



UM MODELO PARA INVESTIGAÇÃO DE ACIDENTES AERONÁUTICOS DECORRENTES DA PERDA DE CONTROLE DE VOO

Felipe Koeller Rodrigues Vieira

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Transportes, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Engenharia de Transportes.

Orientadores: Paulo Cezar Martins Ribeiro
Ilton Curty Leal Júnior

Rio de Janeiro
Fevereiro de 2016

UM MODELO PARA INVESTIGAÇÃO DE ACIDENTES AERONÁUTICOS
DECORRENTES DA PERDA DE CONTROLE DE VOO

Felipe Koeller Rodrigues Vieira

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ
COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE) DA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM
CIÊNCIAS EM ENGENHARIA DE TRANSPORTES.

Examinada por:



Prof. Paulo Cezar Martins Ribeiro, Ph.D.



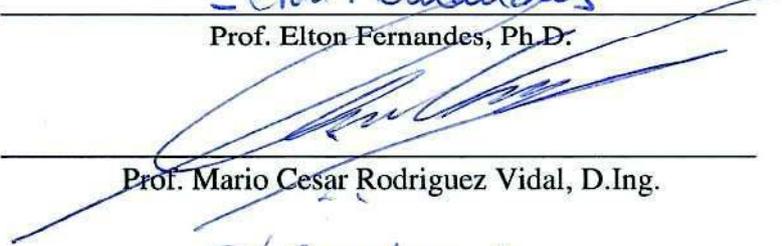
Prof. Ilton Curty Leal Júnior, D.Sc.



Prof. Raul de Bonis Almeida Simões, D.Ing.



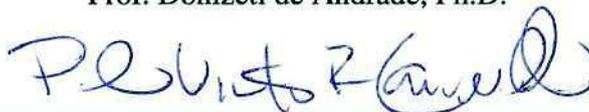
Prof. Elton Fernandes, Ph.D.



Prof. Mario Cesar Rodriguez Vidal, D.Ing.



Prof. Donizeti de Andrade, Ph.D.



Prof. Paulo Victor Rodrigues de Carvalho, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

FEVEREIRO DE 2016

Vieira, Felipe Koeller Rodrigues

Um Modelo para Investigação de Acidentes Aeronáuticos Decorrentes da Perda de Controle de Voo/
Felipe Koeller Rodrigues Vieira. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2016.

XIII, 108 p.: il.; 29,7 cm.

Orientadores: Paulo Cezar Martins Ribeiro

Ilton Curty Leal Júnior

Tese (doutorado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia de Transportes 2016.

Referências Bibliográficas: p. 102-107.

1. Teoria Geral dos Sistemas. 2. Investigação de Acidentes Aeronáuticos. 3. Modelo. I. Ribeiro, Paulo Cezar Martins *et al.* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia de Transportes. III. Título.

Dedico este trabalho a minha mãe, Inês, que criou em mim o gosto pela vida e pelos estudos, e ao meu pai, Henrique, que me mostrou na teoria e na prática que a demonstração mais simples de sucesso profissional na aviação é voltar para casa.

AGRADECIMENTOS

Completar uma Tese de Doutorado não é uma tarefa fácil. Sem a orientação segura, o incentivo e a ajuda de diversas pessoas, é uma saga que se torna impossível. Desta forma, em primeiro lugar, quero registrar meu profundo agradecimento e homenagem póstuma ao primeiro orientador deste trabalho, o Professor Emérito Amaranto Lopes Pereira (★1923 – 2013†).

O querido Professor Amaranto orientou centenas de trabalhos acadêmicos durante os seus mais de cinquenta anos de docência. Posso considerar que esta tese que ora é apresentada é o derradeiro fruto colhido de sua imensa sementeira. Todos que o conheceram e tiveram a honra de absorver seus profundos conhecimentos científicos na área da Engenharia e Teoria Geral dos Sistemas reconhecerão a sua influência nesta Tese. Que Deus o tenha ao Seu lado.

Em complemento, meus sinceros agradecimentos aos professores Doutores Paulo Cezar Martins Ribeiro e Ilton Curty Leal Jr, que assumiram a difícil tarefa de concluir um trabalho já em andamento. Sem seu auxílio, orientação e compreensão eu não conseguiria concluir esta missão. Obrigado.

A todos os professores do Programa de Engenharia de Transportes da COPPE/UFRJ, que participaram diretamente da minha formação, compartilhando não só seus conhecimentos, mas principalmente seu entusiasmo e visão sobre o transporte urbano e multimodal.

Ao Professor Doutor Mario Cesar Vidal e todos os professores, alunos e pessoal administrativo do Grupo de Estudos em Ergonomia - GENTE, meu agradecimento sincero. A acolhida é sempre magicamente cordial na ilha de fraternidade e conhecimento que foi criada entre os ergonômicos da COPPE.

Ao Professor Doutor Donizeti de Andrade, do Instituto Tecnológico de Aeronáutica – ITA, minha admiração pelo trabalho pioneiro na formação científica e difusão do conhecimento especializado em Segurança de Voo e Aeronavegabilidade Continuada. Seu entusiasmo e perseverança, aliados ao profundo e rigoroso conhecimento do tema é inspirador.

Registro a presença sempre atenciosa e alegre da secretária do Programa de Engenharia de Transportes da COPPE/UFRJ, Jane Correa de Souza, e sua assistente, Maria Helena Santos Oliveira. Vocês não me deixaram nunca perder prazos e sempre deram especial atenção às minhas demandas administrativas. Pela sua simpatia e

gentileza sem fim, minha homenagem e agradecimento. Vocês moram em meu coração.

Ao Tenente Brigadeiro do Ar Juniti Saito, Comandante da Aeronáutica no período de 2006-2014, meu agradecimento pelas palavras de orientação proferidas em 1998. Elas me guiaram profissionalmente e me levaram a estudar mais e mais. Também pela autorização formal para eu realizar o Curso de Doutorado em Engenharia de Transportes, meu respeitoso agradecimento.

Ao Major Brigadeiro do Ar Jorge Kersul Filho, cuja liderança e habilidade na condução das mais árduas missões é exemplo de profissionalismo e amor pela Profissão dos Ares meu agradecimento pela inspiração, incentivo e pelo apoio irrestrito nas horas mais difíceis.

À Tenente Bibliotecária Ana Izabel Batista da Silva, que sempre me ajudou a encontrar os artigos mais raros e inacessíveis, obrigado. Sem sua ajuda, incentivo e amizade tudo seria muito mais difícil.

Ao meu amigo o Dr. Alfredo Guarischi, que sempre me apoiou e incentivou. Grande parte das idéias que estão nesta tese surgiu das nossas reflexões em conjunto sobre segurança na aviação e no sistema de saúde.

A todos os meus amigos do Terceiro Serviço Regional de Investigação e Prevenção de Acidentes Aeronáuticos: Cel Av R1 Paulo, Cel Av R1 W. de Almeida, Cel Av R1 Jefferson, Ten Cel QFO Carla Benzecry, Ten Cel Av Pacobahyba, Ten Cel Av Raul de Souza, Ten Cel Av Silvestre, Maj Int Clarissa, Maj Av Raphael Villar, Cap Av Thyago, Cap Av Leonardo, Cap Av Erick, Ten Int Mirian, Ten Psi Gisele, Suboficiais Mayworn, Menezes, Ronaldo, Eraldo Gomes, Maurício, José Luiz, Dias Junior, Erly, Predes, Torres, Da Rocha e Cabos Reis e Louzada, meu agradecimento pela convivência sempre agradável e por suportarem minhas ausências nos momentos de estudo e pesquisa.

Por fim, a todos os meus amigos que sempre me deram força e à minha família: meus pais, meu filho, minhas irmãs e irmãos, meus agradecimentos por fazerem parte da minha vida. A vocês devo tudo o que sou.

Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Ciências (D.Sc.)

UM MODELO PARA INVESTIGAÇÃO DE ACIDENTES AERONÁUTICOS
DECORRENTES DA PERDA DE CONTROLE DE VOO

Felipe Koeller Rodrigues Vieira

Fevereiro/2016

Orientadores: Paulo Cezar Martins Ribeiro

Ilton Curty Leal Júnior

Programa: Engenharia de Transportes

Este trabalho aplica a Teoria Geral dos Sistemas (TGS) para a construção de um modelo de análise da aviação por meio da operação de uma aeronave isolada, realizada por seus pilotos no espaço aéreo. A construção de modelos vem sendo usada para auxiliar os especialistas na investigação de acidentes. A Teoria dos Acidentes Normais de Perrow postula que acidentes são um dos possíveis resultados da operação dos sistemas complexos. Aviação é um sistema socio-técnico complexo e muitos modelos utilizados para avaliar acidentes aéreos mostram o relacionamento entre fatores culturais, técnicos e psicológicos que levam a um desfecho indesejado. O uso da Teoria Geral dos Sistemas mostra onde as interações ocorrem de forma apropriada ou não, o que pode induzir os pilotos a cometerem erros que culminam em um acidente. O modelo construído com o uso da TGS é particularmente aplicável para analisar acidentes com perda de controle em voo. O estudo de caso mostra quais aspectos podem ser classificados como erros ativos e condições latentes.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Science (D.Sc.)

A MODEL FOR THE INVESTIGATION OF AERONAUTICAL
ACCIDENTS DUE TO LOSS OF CONTROL IN FLIGHT

Felipe Koeller Rodrigues Vieira

February/2016

Advisors: Paulo Cezar Martins Ribeiro

Ilton Curty Leal Júnior

Department: Transport Engineering

This work applies the General Systems Theory to build a model to analyze aviation by means of the operation of a single aircraft performed by pilots into the airspace. Model building has been used to help experts to investigate accidents. The Perrow's Normal Accidents Theory postulates that an accident is just one of the possible results of the operation of a complex system. Aviation is a complex socio-technical system and many of the models used to assess air accident investigations show the relationship between cultural, technical and psychological factors that lead to an undesired outcome. The use of General Systems Theory shows where the interactions occur properly or not, which could lead the pilots to an error, which can culminate in an accident. The model built using TGS is particularly suitable for analyzing in-flight loss of control accidents. The case of study show which aspects can be classified as active errors and latent conditions.

SUMÁRIO

ÍNDICE DE FIGURAS	xi
ÍNDICE DE QUADROS	xii
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	xiii
1 INTRODUÇÃO	2
1.1 JUSTIFICATIVA	7
1.2 OBJETIVO DA PESQUISA.....	9
1.2.1 Delimitação.....	9
1.2.2 Objetivos específicos	10
1.3 ESTRUTURA DA TESE.....	10
2 REVISÃO DA LITERATURA.....	13
2.1 INVESTIGAÇÃO DE ACIDENTES AERONÁUTICOS	13
2.1.1 Acidentes aeronáuticos com perda de controle de voo.....	19
2.2 INTERDISCIPLINARIDADE DA INVESTIGAÇÃO DE ACIDENTES AERONÁUTICOS	21
2.2.1 Psicologia da aviação e a interação na cabine	23
2.2.2 Pilotagem e a interação homem x máquina	25
2.3 TEORIA GERAL DOS SISTEMAS	27
2.3.1 Aplicação da Teoria Geral dos Sistemas às aeronaves tripuladas	32
2.4 PRODUÇÃO CIENTÍFICA DOS ÚLTIMOS DEZ ANOS	34
3 CONSTRUÇÃO DO MODELO CONCEITUAL SIMBÓLICO	40
3.1 DEFINIÇÕES DE AMBIENTE E A HIPÓTESE DE NAVE.....	40
3.1.1 A hipótese de nave	41
3.2 METODOLOGIA UTILIZADA PARA A CONSTRUÇÃO DO MODELO ...	44
3.3 SUBSISTEMAS COMPONENTES	46
3.3.1 Subsistemas Piloto (P ₁) e Copiloto (P ₂):.....	46
3.3.2 Subsistema Aeronave (A)	48
3.3.3 Subsistema Entorno Ambiental (E)	49
3.4 INTERFACES DE RESTRIÇÃO	51
3.4.1 Caracterização dos Subsistemas Piloto (P ₁) e Copiloto (P ₂)	51
3.4.2 Caracterização do Subsistema Aeronave (A)	52
3.4.3 Caracterização do Subsistema Entorno Ambiental (E)	53
3.5 VARIÁVEIS DE ESTADO DOS SUBSISTEMAS COMPONTENES	54
3.6 DIAGRAMA FUNCIONAL	55
3.7 METODOLOGIA DE APLICAÇÃO DO MODELO.....	58

4 COMPARAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DO MODELO PERANTE OS MODELOS PREEXISTENTES.....	60
4.1 DESIGUALDADES NAS EQUAÇÕES DE RESTRIÇÃO E AS FALHAS ATIVAS	61
4.1.1 Defeitos nos sensores ou equipamentos embarcados	61
4.1.2 Erros de pilotagem, requisitos, normas e procedimentos	64
4.1.3 Falhas no gerenciamento dos recursos de tripulação.....	67
4.2 ESTADO DOS SUBSISTEMAS E AS CONDIÇÕES LATENTES	69
4.2.1 O subsistema aeronave e os erros latentes de projeto e manutenção.....	70
4.2.2 O subsistema Entorno ambiental e a meteorologia adversa	72
4.2.3 O subsistema piloto e erros latentes no treinamento e supervisão.....	73
4.3 AS CARACTERÍSTICAS DO MODELO VERSUS AS DO <i>STAMP</i>	74
5 APLICAÇÃO DO MODELO EM UM ACIDENTE SELECIONADO	79
5.1 PROCEDIMENTO DE ANÁLISE.....	79
5.2 ESTUDO DE CASO: AIRBUS A330 VOO AF-447	79
5.2.1 Sinopse.....	80
5.2.2 Fatos descobertos na investigação	81
5.2.3 Classificação dos fatos por subsistema componente	83
5.2.4 Interações e desigualdades nas equações de restrição	85
5.2.5 O acidente no diagrama funcional	89
5.2.6 Análise dos resultados da aplicação do modelo	91
5.3 DIFERENCIAL CIENTÍFICO DO MODELO	94
6 CONCLUSÃO.....	97
REFERÊNCIAS	102
GLOSSÁRIO	108

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Ocorrências aeronáuticas nos últimos 10 anos (BRASIL, 2015).	2
Figura 2: Teoria do Dominó - depois de Heinrich, 1931 (adaptado de HOLLNAGEL, 2002, apud FREITAS, 2015).....	14
Figura 3: Teoria do Queijo Suíço de James Reason (1997).	15
Figura 4: Modelo SHELL e seus componentes (HAWKINS, 1987).	18
Figura 5: Variação percentual das causas dos acidentes (HOLLNAGEL, 2002).	19
Figura 7: Modelo HFACS (WIEGMANN; SHAPPELL, 2000, apud VILELA; SAMPAIO, 2011).....	24
Figura 8: Sistema de Voo na concepção de uma nave imersa no ambiente externo.	42
Figura 9: Diagrama Funcional de Venikoff (PEREIRA, 2008).	45
Figura 10: Associação direta entre piloto P e Aeronave A, com <i>loop</i> de controle.....	47
Figura 11: Associação paralela entre os pilotos P ₁ e P ₂ e direta entre estes e a Aeronave A, com <i>loop</i> de controle.	47
Figura 12: Associação mista complexa entre os pilotos P ₁ e P ₂	48
Figura 13: Exemplo de uma das formas de associação indireta entre o Entorno ambiental E e os pilotos P ₁ e P ₂ através da Aeronave A.....	50
Figura 14: Associação mista complexa entre a Aeronave e o Entorno ambiental.	50
Figura 15: Diagrama funcional do Sistema de Voo.	55
Figura 16: Diagrama funcional do Sistema de Voo em relação ao ambiente externo....	56
Figura 17: Representação da funcionalidade dos sensores embarcados, especificamente dos sensores que medem dados do entorno ambiental.	62
Figura 18: No excerto maior o <i>loop</i> de controle manual (pilotos em voo visual ou por instrumentos) e na elipse o <i>loop</i> de controle por piloto automático.....	65
Figura 19: Interação piloto – aeronave mostrada no Modelo SHELL.	66
Figura 20: Controle do processo operacional no modelo STAMP (adaptado de LEVESON, 2004).....	67
Figura 21: Interação dos pilotos entre si. Em destaque a saída do P ₁ e a entrada de P ₂ , constringidas à igualdade. Esta equação representa que as ações do <i>pilot at controls</i> são corretamente monitoradas pelo <i>pilot monitoring</i>	68
Figura 22: Dois tipos de problemas de coordenação (adaptado de LEVESON, 2004)..	69
Figura 23: Forma genérica de modelo de controle sócio-técnico do STAMP (adaptado de LEVESON, 2004).....	75
Figura 24: <i>Loop</i> de controle a partir da detecção de formações meteorológicas.	89
Figura 25: Correlação dos Quadros referentes às variáveis de estado dos subsistemas componentes com o Diagrama funcional do Sistema de Voo.	90
Figura 26: Contribuições das diversas áreas que compõem uma investigação de acidente aéreo mostradas simultaneamente no Diagrama funcional do Sistema de Voo.....	95

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1: Adaptação da Taxonomia do Domínio Psicomotor (SIMPSON, 1966) para aplicação à instrução aérea.	26
Quadro 2: Variável de Estado do Sistema de Voo.	54
Quadro 3: Equações de restrição	57
Quadro 4: Fatos listados no Relatório Final de investigação. Fonte: BEA.	81
Quadro 5: Fatos relativos à Variável de Estado de A.	84
Quadro 6: Fatos relativos à Variável de Estado de E.	84
Quadro 7: Fatos relativos à Variável de Estado de P1 e P2	85
Quadro 8: Eventos que representam interações entre os subsistemas componentes previstas nas equações de restrição	86
Quadro 9: Eventos desigualdades nas equações de restrição	87
Quadro 10: Eventos externos ao Sistema de Voo.	88
Quadro 11: Análise dos fatos (numerados) e equações de restrição no acidente	90

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CENIPA: Centro de Investigação e Prevenção de Acidentes Aeronáuticos

IATA: International Air Transport Association (Associação Internacional de Transporte Aéreo)

LOC-I: Loss of control – inflight (perda de controle em voo)

NTSB: National Transportation Safety Board (Conselho Nacional de Segurança nos Transportes) – órgão do governo dos EUA responsável pela investigação dos acidentes em meios de transporte, inclusive os acidentes aeronáuticos

TGS: Teoria Geral dos Sistemas

1 INTRODUÇÃO

1 INTRODUÇÃO

A história da aviação possui, desde sua origem mais remota, referência aos acidentes aeronáuticos. A mais famosa lenda grega sobre o voo, de Dédalo e Ícaro, mostra a invenção de um artefato voador: asas feitas de cera e penas; uma recomendação de segurança de voo: não voar tão alto que o sol derreta a cera nem tão baixo que as ondas do mar molhem as penas; e um acidente fatal: a queda de Ícaro.

O desenvolvimento da aeronáutica, primeiramente com os balões, fruto da revolução da química dos gases, no século XVIII e, posteriormente com os aviões, criados a partir do entendimento da mecânica dos fluidos ao final do século XIX, foi permeada de acidentes e fatos catastróficos, morte de vários corajosos pioneiros e imprudentes aventureiros (HALLION, 2003).

No século XX, a investigação dos primeiros acidentes aéreos seguia duas linhas principais: ou eram atribuídos à natureza perigosa da aviação (ou à imprudência dos aviadores) e, com isso, reputados como fatos do destino (ou fator humano); ou eram utilizados para entender a aerodinâmica e as formas de falha dos materiais aeronáuticos (fator material) e, com isto melhorar os novos projetos de aviões (CHANUTE, 1894).

No Brasil, os dados estatísticos de acidentes aeronáuticos coletados pelo Centro de Investigação e Prevenção de Acidentes Aeronáuticos (CENIPA) mostram que no decênio de 2005 a 2014 ocorreram 1.198 acidentes aéreos acrescidos de 497 incidentes graves (BRASIL, 2015) (Figura 1).



Figura 1: Ocorrências aeronáuticas nos últimos 10 anos (BRASIL, 2015).

O estudo dos acidentes em bases modernas tem uma de suas origens no

trabalho efetuado por Heinrich (1936). Neste estudo, por meio da análise dos acidentes industriais, foram estabelecidos alguns conceitos de prevenção de acidentes ainda em uso tal como: o modelo denominado triângulo de Heinrich (ou modelo do *iceberg*), a teoria do dominó e os conceitos de condição insegura e ato inseguro.

Após esse trabalho, diversos outros estudos e teorias foram criados e a necessidade de se estabelecer em bases científicas sólidas a atividade de investigação de acidentes, aí incluída a atividade de investigação dos acidentes aeronáuticos, é reiterada por diversos pesquisadores como Benner (1975), Hollnagel (1993, 2002), Ladkin & Loer (1998), Marais, Dulac & Leveson (2004), Sklet (2004) e Stoop & Dekker (2010).

A importância dos modelos de acidente para o processo de investigação e para a condução do raciocínio investigativo dos especialistas é ressaltada por Hollnagel, quando ele afirma:

O quadro de referência é particularmente importante em se pensando sobre acidentes, porque ele determina como nós vemos um acidente e em particular como nós vemos o papel dos humanos. Eu prefiro me referir a este quadro de referência como o ‘modelo de acidente’, isto é, uma forma estereotipada de pensamento sobre como um acidente ocorre (HOLLNAGEL, 2002).

No mesmo sentido, Leveson (2004) afirma que:

modelos de acidentes formam a base para investigar e analisar acidentes, prevenir futuras recorrências e determinar quando sistemas são adequados para uso (assessoramento do risco). Na investigação de acidentes eles [os modelos] impõem padrões ao acidente e influenciam tanto os dados coletados quanto os fatores identificados como causadores do mesmo.

A utilidade prática dos métodos formais de investigação que gerem apresentação de modelos gráficos dos acidentes é, também, defendida por Sklet (2004).

O uso de métodos formais para a investigação de grandes acidentes pode auxiliar os investigadores durante o processo de investigação e na apresentação dos resultados e recomendações.

Uma descrição gráfica da sequência do acidente pode ser útil durante o processo de investigação porque ela permite uma visão geral facilmente inteligível dos eventos que levaram ao acidente e a relação entre os diferentes eventos. Além disso, ela facilita a comunicação entre os investigadores e os leitores dos relatórios de investigação e torna fácil identificar elos perdidos e falta de informações (SKLET, 2004).

Os diversos modelos de acidentes atualmente em uso pelos especialistas e acadêmicos são classificados em três grandes grupos. O de origem mais antiga, que começou com o modelo do dominó (HEINRICH, 1936), é o grupo dos modelos

sequenciais de acidentes. Neste grupo a ligação de causa e efeito é simples e determinística entre os diversos fatores identificados na investigação e seus resultados no cenário do acidente.

Para sanar as deficiências dos modelos sequenciais, inadequados para explicar acidentes em cenários mais complexos, foram desenvolvidos os modelos epidemiológicos de acidentes. Nestes modelos, para a ocorrência dos acidentes existe a contribuição de diversos fatores, alguns latentes (ocultos) e outros ativos (manifestos). O primeiro modelo epidemiológico foi sugerido em 1961, por Suchman (HEINRICH et al 1980), como precursor de diversos modelos importantes tais como o modelo do queijo suíço, proposto por James Reason (1997).

Um terceiro grupo de modelos é chamado de modelos sistêmicos de acidentes. Estes modelos usam como base a teoria do controle (ASHBY, 1956; SHERIDAN, 1992) e a teoria dos acidentes normais de Perrow (1984). “Em geral modelos sistêmicos enfatizam a necessidade de basear a análise dos acidentes no entendimento das características funcionais do sistema [...]” (HOLLNAGEL, 2002).

Favre (1966) define acidente catastrófico ou catástrofe como sendo o acidente grave ou a série de acidentes graves susceptíveis de provocarem elevados prejuízos. Leveson (2004) ressalta que a tolerância da sociedade a cada acidente individual tem sido decrescente, por que o custo e o potencial destrutivo dos acidentes está aumentando. As novas tecnologias criam perigos novos e maiores e expõem um maior número de pessoas ao perigo.

Reason (2006) realizou uma meta-análise das investigações de acidentes catastróficos de repercussão global. De acordo com suas observações, as primeiras investigações de acidente tendiam a atribuir responsabilidade para a “ponta da lança”, os executores das tarefas que culminaram no acidente. Tal atribuição era compatível com o conceito de ato inseguro, de Heinrich (op. cit.).

Pesquisas de psicólogos do trabalho, em 1926, fizeram surgir o conceito de “propensão ao acidente” (*accident proneness*), no qual algumas pessoas, mantidas as mesmas condições ambientais, teriam maior probabilidade de se envolver em um acidente que outras (FROGGATT, SMILEY, 1964).

Com o passar do tempo, a percepção dos investigadores mudou e os mesmos passaram a identificar erros mais acima na estrutura das organizações (STOOP, DEKKER, 2010). Assim, os executores passaram a ser considerados vítimas dos erros cometidos por gerentes, os quais não forneceram aos executores treinamento ou

conhecimento para lidar com as situações que levaram ao desfecho indesejado, tal como mostrado pelos modelos como “queijo suíço”, do próprio Reason.

Reason (2006) mostra que esta tendência continuou até os investigadores atingirem um máximo paradoxal, no qual as causas-raízes dos acidentes foram atribuídas a fatores sociais extremamente genéricos. Para exemplificar, sua apresentação cita os resultados mostrados pelo relatório da investigação do acidente nuclear de Chernobyl, ocorrido em 26 de abril de 1986, no qual é apontada como causa-última do acidente a própria queda do Muro de Berlim e a derrocada do sistema socialista. Analisando este conjunto de fatos, Reason descreveu o processo investigativo como um pêndulo, que se originou na responsabilidade individual e moveu-se em direção à responsabilidade coletiva.

A responsabilização individual por acidentes em sistemas complexos já se mostrou injusta, incompleta e insuficiente para realizar a prevenção de novos acidentes. No outro extremo, a generalidade das “causas” sociais e culturais impede a adoção de medidas corretivas eficazes. Ao final, Reason pergunta: “será que o pêndulo balançou longe demais?”

Ballesteros (2007), analisando a perspectiva da substituição do controle humano pelo automatismo, na aviação, argumentou que:

Quando alguém comenta que 80% dos acidentes vêm do fator humano é muito fácil chegar a uma conclusão: se eliminarmos as pessoas reduziremos a taxa de acidentes em 80%. Isto é falso porque muitos acidentes não ocorrem devido a intervenções humanas – muitas vezes não reportadas - e agora consideradas triviais, que previnem o efeito “bola de neve” que leva a um acidente (BALLESTEROS, 2007).

Além disso, Hollnagel (2002) ressalta que “nenhum sistema tecnológico é criado por si mesmo nem pode tomar conta de si mesmo, e humanos estão envolvidos desde o início até o fim”.

Assim é na aviação. Engenheiros projetam aeronaves que são testadas por pilotos de ensaio em voo. Com a certificação do modelo (*type certificate*), os parâmetros de treinamento são definidos em um programa de instrução para que os pilotos sejam também certificados para voar naquele modelo de aeronave. Estes pilotos realizam treinamentos em centros de treinamento certificados e são avaliados por inspetores, que os avaliam de acordo com o programa de instrução recomendado.

A questão que é abordada nesta tese é que pilotos certificados voando aeronaves certificadas se acidentam, em cenários complexos, difíceis de serem entendidos durante a investigação e que, a princípio, deveriam ter sido previstos e

prevenidos durante os processos de certificação do projeto da aeronave, dos parâmetros de treinamento, na certificação dos pilotos ou em qualquer outro processo prévio de análise deste sistema sócio-técnico aplicável para tal.

Este trabalho procura fazer o percurso inverso do “pêndulo” das investigações, retornando o local de análise para dentro da cabine de uma aeronave em voo. Enfocando as complexas relações que ocorrem entre os humanos, entre os humanos e a tecnologia, e de todos estes e o ambiente utilizando uma abordagem sistêmica.

Marais, Dulac & Leveson (2004) descrevem que:

A abordagem sistêmica assume que algumas propriedades dos sistemas podem somente ser tratadas adequadamente em sua totalidade, levando em consideração todas as facetas e relacionando os aspectos técnicos e sociais. Estas propriedades dos sistemas derivam dos relacionamentos entre as partes do sistema: como as partes interagem e se encaixam umas às outras. Assim, a abordagem sistêmica se concentra na análise e no desenho do conjunto como algo distinto das partes.

Dekker (2011) ressalta que “se nós queremos entender as falhas da complexidade, nós temos que possuir uma teoria que possa iluminar a complexidade”.

Helmreich (1999) acrescenta que está ocorrendo uma mudança na compreensão do conceito de segurança, a qual não depende apenas da tecnologia ou do fator humano para ser melhorada, mas de algo que abranja a complexidade sistêmica.

Existe uma crescente consciência de que a segurança é um fenômeno de sistema e que os acidentes representam uma concatenação de múltiplos fatores que não podem ser mitigados pelo treinamento ou por novas tecnologias isoladamente (HELMREICH, 1999).

Leveson (2004) afirma que o tipo de sistemas que estão sendo construídos e o contexto no qual os mesmos são construídos têm mudado. Essas mudanças têm esticado os limites dos atuais modelos de acidentes e das técnicas de engenharia de segurança, de forma que novas abordagens são necessárias.

Considerando a já mencionada importância dos modelos, particularmente daqueles que geram apresentações gráficas, para a análise dos acidentes, e a necessidade de estabelecimento de modelos menos genéricos, de aplicação mais precisa a situações específicas, esta pesquisa utiliza o entendimento sistêmico para criar um modelo que sirva para a análise das operações aéreas em uma aeronave tripulada, considerada um sistema sócio-técnico complexo, aí incluídas as interações normais e as que resultaram em acidentes aeronáuticos por perda de controle em voo.

A partir da revisão bibliográfica sobre sistemas e modelos, verifica-se que a

modelagem de sistemas complexos é um dos temas amplamente abordados pela Teoria Geral dos Sistemas (TGS), estabelecida pela pesquisa pioneira de Ludwig Von Bertalanffy a partir de trabalhos publicados em 1950 e 1968.

Os conceitos da TGS mostram que uma aeronave em voo pode ser considerada como sendo um sistema sócio-técnico, passível de ser modelado utilizando-se os conceitos teóricos e as técnicas já desenvolvidas e consagradas pela TGS. A criação de um Modelo Conceitual Simbólico deste sistema sócio-técnico, que é uma aeronave em voo tripulado, pode então servir de suporte analítico das operações normais e das interações que culminam em acidentes.

A contribuição desta tese vem ao encontro das necessidades dos investigadores de acidentes aeronáuticos. Com o desenvolvimento deste modelo busca-se uma solução específica para a aplicação nas aeronaves em voo tripulado. Contribui, também, para a prevenção de acidentes uma vez que a utilização do modelo para análise das situações normais de voo serve de suporte para verificar se os programas de treinamento abrangem todas as interações homem-máquina-ambiente previsíveis de ocorrer durante os voos de um modelo específico de aeronave.

Desta forma, torna-se viável abranger as propriedades do sistema como um todo, analisando tanto os aspectos tecnológicos da aeronave propriamente dita e sua interação com a atmosfera (abordados pelos estudos aerodinâmicos da Engenharia Aeronáutica) quanto os aspectos de treinamento da interação dos humanos com a aeronave (abordados pela engenharia, ergonomia, pilotos de ensaio e instrutores de voo) e, também, as interações dos pilotos que tripulam a aeronave entre si (abordados pela psicologia).

Com o desenvolvimento deste modelo busca-se uma solução específica para aplicação ao caso das aeronaves em voo tripulado, porém esta forma de aplicação da TGS para a investigação de acidentes poderia ser aproveitada em outros tipos de investigação em sistemas sócio-técnicos complexos, como acidentes industriais, na área da saúde ou em outros modos de transporte tais como acidentes marítimos e ferroviários, bastando desenvolverem-se os modelos específicos para cada situação.

1.1 JUSTIFICATIVA

Apesar de todo o investimento em treinamento e tecnologia, acidentes aeronáuticos acontecem em todo o mundo. No processo de investigação é possível

verificar diversas situações em que pilotos experientes, conduzindo aeronaves construídas com a melhor tecnologia disponível, perdem o controle da aeronave em voo quer por desconhecer um evento aerodinâmico, quer pela ocorrência de conflitos interpessoais, ou por sofrerem ilusões advindas do ambiente do voo. A busca da solução para este problema de segurança de voo, que pode ser qualificado como sendo de natureza difusa e insidiosa, passa pelo estudo e caracterização da atividade aérea.

De natureza difusa porque a perda da consciência situacional pelos pilotos pode ter diversas origens, como por exemplo, o excesso de confiança no automatismo da aeronave ou o desconhecimento de ações do outro piloto nos comandos de voo; e insidiosa, pois sua ocorrência acomete mesmo aqueles considerados “exemplos” de profissionalismo: pilotos no auge de suas carreiras, com vasta experiência e, muitas vezes, instrutores de voo dos demais tripulantes da empresa.

Existem diversas teorias para lidar com o fenômeno “acidente” e outras ainda para tratar da própria investigação dos mesmos, muitas das quais utilizam modelos adequados para ressaltar aspectos específicos (BENNER, 1975). Porém, todas as teorias pesquisadas possuem uma característica em comum: são adequadas para analisar os acidentes enquanto fenômeno próprio, não possuindo modelos que partam das operações normais para explicá-los (PERROW, 1999). Além do mais, algumas das teorias pesquisadas não separam os conceitos de “sistema” e “organização”, não diferenciando os aspectos relacionados à empresa aérea (organização), dos aspectos diretamente ligados à operação das aeronaves (sistema sócio-técnico) (QURESHI, 2007).

Apesar de as influências organizacionais serem importantes para a compreensão dos acidentes aéreos, estes ocorrem com uma ou mais aeronave. Esta pode ou não pertencer a uma empresa aérea determinada. É a aeronave que cai, fisicamente através do ar, com os pilotos em seu interior, não a empresa. As influências organizacionais, inegavelmente importantes, possuem característica estocástica e não-determinística sobre a ocorrência do acidente. As teorias de acidentes aeronáuticos encontradas na literatura, por realizar a análise após a ocorrência dos acidentes, tendem a não diferenciar esta característica estocástica das influências organizacionais, tratando-as como se determinísticas fossem.

Além disto, mesmo as teorias que reconhecem a natureza sistêmica dos acidentes não utilizaram as ferramentas conceituais e analíticas já desenvolvidas e validadas pela Teoria Geral dos Sistemas de forma direta para a modelagem do sistema

sócio-técnico do voo, tal como feito nesta tese com o desenvolvimento do modelo conceitual simbólico e sua formulação gráfica e matemática.

A Teoria Geral dos Sistemas - TGS, criada especificamente para o trato científico de objetos de estudo compostos por partes de natureza distinta, aplica-se ao estudo das interações que ocorrem entre o entorno ambiental e a aeronave, entre esta e a tripulação e entre os componentes da tripulação.

As ferramentas da TGS permitem analisar as operações aéreas de forma a ressaltar a atuação dentro da cabine de comando, distinguindo de maneira adequada a forma como atuam as influências externas e os fatores organizacionais. Uma vez que um modelo sistêmico da operação de uma aeronave seja construído, o mesmo se prestará tanto para a investigação dos acidentes, quanto para o planejamento e análise das operações cotidianas e de treinamento. Sua utilização pode ser tanto uma ferramenta de análise reativa, após um acidente, quanto uma ferramenta preditiva, se aplicada às operações normais. Esta tese aborda a utilização do modelo como forma de análise para a investigação de acidentes.

1.2 OBJETIVO DA PESQUISA

A pesquisa foi realizada de forma a aplicar a metodologia da Teoria Geral dos Sistemas para a criação de um modelo sistêmico das operações de voo de uma aeronave capaz de ser utilizado para a análise de acidentes aeronáuticos, focado nas operações conduzidas a bordo, pela tripulação. O objetivo da tese é a construção de um modelo que seja adequado à análise de acidentes que ocorram com a participação de uma aeronave, em pleno ar, com perda de controle de voo, e com choque na terra ou água.

1.2.1 Delimitação

A pesquisa está delimitada à criação de um modelo que represente a forma mais básica de uma aeronave tripulada por tripulação composta (dois pilotos). O modelo básico não conterá outros tripulantes além dos dois pilotos, tampouco passageiros ou itens transportados. Contudo, tais acréscimos poderão ser realizados posteriormente, a partir do modelo básico construído. O estudo de caso consiste na aplicação do modelo em um caso de acidente aeronáutico com perda de controle de voo.

1.2.2 Objetivos específicos

Para atingir o objetivo geral foram elencados os seguintes objetivos específicos:

- 1) Realizar a revisão da literatura sobre investigação de acidentes, modelagem de acidentes e perda de controle de voo; realizar a revisão da literatura sobre a Teoria Geral dos Sistemas; e mostrar a aplicabilidade do uso da Teoria Geral dos Sistemas para a modelagem do voo de aeronaves tripuladas;
- 2) Descrever o modelo conceitual simbólico de uma aeronave em voo que foi construído, contendo a descrição dos subsistemas, o diagrama funcional, as interfaces de restrição e as variáveis de estado dos subsistemas componentes;
- 3) Comparar as características do modelo construído com as características das demais teorias de investigação de acidentes;
- 4) Realizar a aplicação do modelo para a análise de um acidente de avião com perda de controle de voo, como estudo de caso.

1.3 ESTRUTURA DA TESE

A Tese está estruturada em seis capítulos, descritos a seguir.

O Capítulo 1 realiza a introdução e justificativa do tema pesquisado, apresentando o objetivo geral com a devida delimitação e cinco objetivos específicos.

O Capítulo 2 apresenta a revisão bibliográfica, dividida em quatro seções, a primeira sobre a investigação de acidentes, inclusive acidentes com perda de controle de voo; a segunda mostrando a interdisciplinaridade das investigações de acidentes aeronáuticos; a terceira parte abordando a Teoria Geral dos Sistemas e demais teorias correlatas; e a quarta, que realiza uma revisão bibliográfica sistemática de artigos em ambos os campos publicados nos últimos dez anos. Este capítulo visa a atingir o primeiro dos objetivos específicos estabelecidos.

O Capítulo 3 mostra a compatibilidade conceitual do uso da Teoria Geral dos Sistemas, verificando sua adequação para aplicação no objeto de estudo, qual seja: um sistema composto de aeronave, pilotos e entorno ambiental, capaz de voar de forma controlada através do espaço aéreo. Na seqüência, desenvolve o Modelo Conceitual

Simbólico, apresentando a metodologia utilizada para a sua construção e descrição das partes componentes do modelo, quais sejam: o Diagrama Funcional, as Interfaces de Restrição e suas Equações e as Variáveis de Estado dos Subsistemas Componentes; ao final, é proposta a metodologia para aplicação do modelo nas investigações de acidentes aeronáuticos. O segundo objetivo específico proposto é atingido.

O Capítulo 4 compara as características do modelo descrito no capítulo anterior com as características dos modelos preexistentes utilizados para a análise de acidentes aeronáuticos. Para isto realiza a interpretação do significado da ocorrência de desigualdades nas equações de restrição, correlacionando-as aos erros ativos da Teoria de Reason e a interpretação do significado das variáveis de estado e sua correlação com as condições meteorológicas adversas e com os erros latentes. Desta forma, este capítulo atende ao terceiro objetivo específico.

O Capítulo 5 mostra a forma de aplicação do modelo selecionado em um caso de acidente com perda de controle de voo selecionado: um acidente envolvendo um avião de transporte regular de grande porte, o Airbus A-330 que fazia o voo AF 447 na rota Rio de Janeiro – Paris, ressaltando o seu diferencial científico. O quarto objetivo específico é alcançado.

O Capítulo 6 realiza a conclusão do trabalho, ressaltando as características da tese que representam avanço científico na área bem como as limitações no emprego do modelo e sugestões de futuras pesquisas.

Ao final são apresentadas as referências utilizadas, da forma prevista pelas normas bibliográficas aplicáveis e um glossário com os termos técnicos utilizados.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2 REVISÃO DA LITERATURA

A fundamentação teórica utilizada neste trabalho de pesquisa possui como ponto de partida as teorias de investigação de acidentes e construção de modelos de acidentes e a Teoria Geral dos Sistemas. A bibliografia do primeiro tema, as teorias de investigação de acidentes, é tratada no item 2.1. A interdisciplinaridade das investigações de acidentes aeronáuticos é mostrada no item 2.2. A bibliografia sobre a Teoria Geral dos Sistemas e sua aplicabilidade ao objeto de estudo proposto é tratado no item 2.3. O item 2.4 mostra o resultado da pesquisa bibliográfica sistemática sobre artigos científicos dos últimos dez anos em ambos os campos.

2.1 INVESTIGAÇÃO DE ACIDENTES AERONÁUTICOS

A bibliografia mundial sobre investigação de acidentes inclui tratados internacionais, como o Anexo 13 da Convenção de Aviação Civil Internacional (ICAO, 2010) e seus correlatos em organizações internacionais cujos temas são atividades espaciais, exploração de óleo e gás, energia atômica, tráfego marítimo, produtos químicos etc. As normas internacionais são refletidas em legislações nacionais e normas técnicas de investigação específicas para cada cenário.

Também fazem parte da bibliografia os relatórios de investigação de acidentes emitidos por agências governamentais e não-governamentais como institutos de pesquisa e universidades que analisam os mais diversos tipos de acidentes, desde a explosão do ônibus espacial *Challenger* (VAUGHN, 1996) até o colapso do complexo químico industrial de Bhopal, na Índia (SRIVASTAVA, 1992) e todos os acidentes aéreos com aeronaves de grande e médio porte.

Tanto as legislações internacionais e nacionais como os próprios relatórios trazem embutidos nos métodos de investigação utilizados, na abrangência da pesquisa realizada e na forma das conclusões, diversos paradigmas sobre o que é e como ocorrem os acidentes, de forma explícita ou implícita.

Vários estudos recentes sobre acidentes vêm sendo publicados tanto no meio acadêmico quanto por outros pesquisadores, como jornalistas e técnicos de diversas áreas. Uma das consequências deste foco nos estudos de acidentes é a redescoberta de estudos pioneiros que ficaram por décadas esquecidos (SCANLON, 1988).

A importância dos estudos acadêmicos sobre as investigações de acidentes encontra eco nas palavras de Prince (1920): “O conhecimento só se tornará científico

depois do mais fiel exame de muitas catástrofes”.

Os trabalhos de revisão bibliográfica sobre as teorias de investigação de acidentes classificam os modelos de acidentes existentes na atualidade em três grandes classes (QURESHI, 2007):

- a) Classe dos modelos sequenciais de acidentes;
- b) Classe dos modelos epidemiológicos; e
- c) Classe dos modelos de abordagem sistêmica.

As teorias classificadas como pertencentes à classe dos modelos sequenciais de acidentes foram as primeiras a surgir, tendo como paradigma a Teoria do Dominó (Figura 2), proposta por Heinrich na década de 1940 (FERRY, 1988).

Como sintetizam Stoop & Dekker (2010), a teoria do dominó foi o primeiro modelo a estabelecer relações causais para explicar um acidente. Uma segunda geração de modelos introduzida por Bird e Loftus caracterizou-se pela criação de diagramas lineares de causa e efeito, acrescidos posteriormente pelo conceito de desvio (*deviation concept*) de Kjellen (1984, 2000).

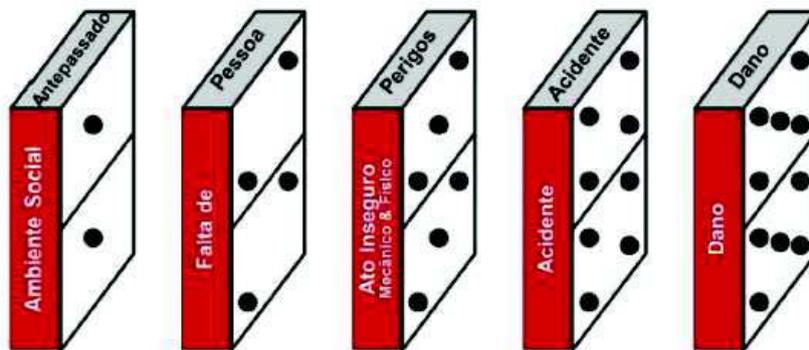


Figura 2: Teoria do Dominó - depois de Heinrich, 1931 (adaptado de HOLLNAGEL, 2002, apud FREITAS, 2015).

Nestas teorias, a relação causa e efeito é destacada por meio do estabelecimento de correlações diretas de causalidade. Tais modelos são úteis para a investigação de falhas físicas de componentes bem como para explicar as consequências do comportamento humano em sistemas de baixa complexidade ou considerados relativamente simples. Por outro lado, sua capacidade de explicar a ocorrência dos acidentes nos sistemas complexos é limitada (HOLLNAGEL, 2004). Modelos lineares encorajam uma limitada noção de causalidade, o que torna difícil incorporar relacionamentos não-lineares, incluindo *feedback* (LEVESON, 2004).

Leveson (1995) e Ferry (1988) citam como exemplos de modelos sequenciais de acidentes, além da teoria do dominó, as teorias como “*Failure Modes and Effects Analysis* (FMEA), “*Fault Tree Analysis*” (FTA), “*Event Tree Analysis*” e “*Cause-Consequence Analysis*”. Estas teorias acrescentam ao paradigma básico da cadeia de eventos a possibilidade de ocorrência de múltiplas cadeias de eventos hierarquizadas na forma de árvore ou rede.

Na década de 1980 começaram a surgir outras teorias e modelos de acidentes que formaram a classe denominada de epidemiológica. Tais modelos deixaram de considerar os acidentes como eventos determinísticos e passaram a compará-los a eventos estocásticos. O objetivo destes modelos é analisar os eventos ocorridos em ambientes complexos, cujas características não eram bem elucidadas pelos modelos sequenciais (HOLLNAGEL, 2004; REASON, 1990).

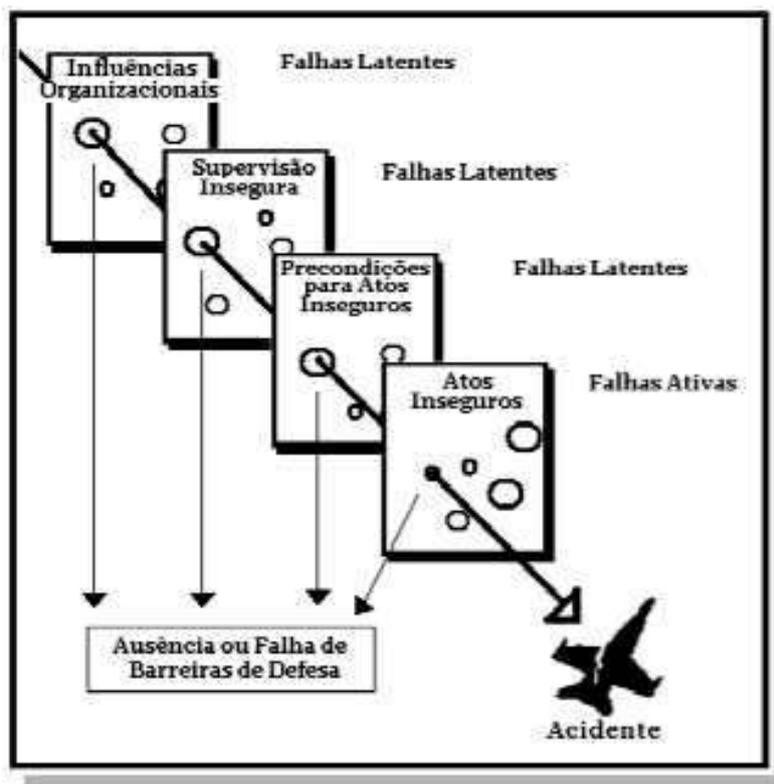


Figura 3: Teoria do Queijo Suíço de James Reason (1997).

O modelo mais famoso desta classe é o Modelo do Queijo Suíço de James Reason (1997) (Figura 3). O novo paradigma formado compara os acidentes com as doenças epidêmicas, cuja probabilidade de ocorrer aumenta de acordo com a presença de alguns fatores e cujo aparecimento pode ser desencadeado por eventos específicos. A

combinação dos fatores, ou das falhas nas diversas camadas de defesa, é a forma de explicar a ocorrência dos acidentes. A forma de prevenir a ocorrência dos acidentes ou minimizar suas consequências é semelhante à prevenção de doenças epidêmicas, com foco na profilaxia dos fatores latentes e na interposição de barreiras de proteção para evitar a progressão do acidente.

Um dos avanços dos modelos epidemiológicos em relação aos modelos sequenciais é que estes últimos permitem a diferenciação entre as causas imediatas e as causas latentes, acrescentando à investigação dos acidentes o aspecto organizacional. O conceito de “*sharp end*”, associado aos operadores dos sistemas, é contraposto ao conceito de “*blunt end*”, associado aos níveis gerenciais (REASON, 1990; WOODS et al., 1994). As falhas ocorridas nos níveis gerenciais da organização permanecem latentes até se associarem a uma falha ativa de algum operador, passando pelas falhas nas barreiras de proteção e gerando o acidente.

Apesar de adicionar a dimensão organizacional à análise dos acidentes, as teorias epidemiológicas ainda seguem a lógica linear de causa e efeito, não abrangendo a complexidade das interações não-lineares típicas dos sistemas complexos (HOLLNAGEL, 2004; SHORROCK et al., 2003).

A Teoria dos “*Normal Accidents*” de Perrow (1984) apresenta uma abordagem explicativa para a ocorrência dos acidentes em organizações complexas que gerenciam tecnologias críticas ou perigosas. Estudando diversos acidentes de grande vulto ocorridos nos mais diversos tipos de ambientes, como usinas nucleares, aviões, navios, naves espaciais e indústrias químicas e petrolíferas, Perrow mostrou que interações complexas não-lineares podem fazer com que duas ou mais falhas pequenas possam interagir de maneiras inesperadas, não previstas pelos projetistas e não compreendidas pelos operadores, levando a um resultado catastrófico.

Com a teoria de Perrow, surge a terceira classe de modelos, os modelos de abordagem sistêmica, baseada na teoria sócio-técnica.

A teoria sócio-técnica sugere que agentes humanos e instituições sociais são partes integrais dos sistemas técnicos e que o alcance dos objetivos organizacionais não são atingidos meramente por meio da otimização do sistema técnico, mas pela otimização conjunta dos aspectos sociais e técnicos (TRIST, BAMFORTH, 1951, apud QURESHI, 2007).

Sklet (2004) enumera e compara quinze diferentes métodos para a investigação de acidentes: *Events and causal factors charting*; *Events and causal factors analysis*;

Barrier analysis; Change analysis, Root cause analysis; Fault tree analysis; Influence diagram; Event tree analysis; Management and Oversight Risk Tree (MORT); Systematic Cause Analysis Technique (SCAT); Sequential Timed Events Plotting (STEP); Man, Technology and Organization (MTO) – analysis; The Accident Evolution and Barrier Function (AEB) – method; TRIPOD; e Acci-map.

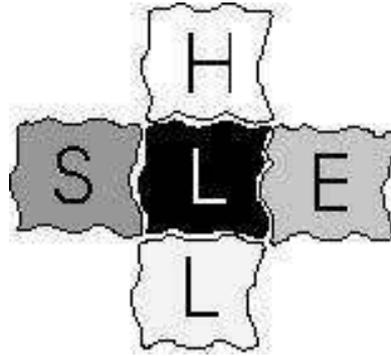
Cada método de investigação é influenciado por um ou mais de um modelo de acidente (KJELLÉN, 2000, apud SKLET, 2004). No estudo realizado por Sklet (*op. cit*) são comparadas sete características de cada um dos modelos sendo que uma destas características é qual abordagem analítica é utilizada pelo método, podendo ser: dedutiva, indutiva, morfológica ou abordagem “não-sistêmica” (*non system oriented approach*). As abordagens dedutiva e indutiva são pertencentes a classe dos modelos sequenciais de acidentes; a abordagem “não-sistêmica” é típica dos modelos da classe epidemiológica, enquanto a abordagem morfológica utiliza conceitos da teoria de sistemas.

Sklet chega à conclusão que, dos quinze métodos de investigação, quatro são dedutivos, indutivos ou ambos, dez possuem abordagem “não-sistêmica” e apenas um, o *AEB-Method*, possui abordagem morfológica.

Svenson (2000) descreve os sistemas e componentes no *AEB-Method*, dividindo-os entre os sistemas técnicos e os sistemas de “fatores humanos” (*human-factors systems*), divisão esta oriunda da teoria sócio-técnica.

A atividade de investigação de acidentes desenvolveu, principalmente a partir da década de 1970, uma série de teorias de análise de fatores humanos. Com grande influência da psicologia nas suas vertentes organizacional e cognitivo-comportamental, as teorias foram desenvolvidas para ser uma ferramenta de análise dos operadores humanos nos acidentes e das condições pré-existentes que facilitam sua ocorrência.

O nome do modelo postulado por Hawkins (1987), conhecido como modelo SHELL, surgiu da junção das letras iniciais das partes do modelo: *software, hardware, environment, liveware* e *liveware*. Este último é repetido, pois representa a interação entre dois operadores humanos entre si, como os pilotos na cabine de uma aeronave, ou entre algum destes e o pessoal de apoio em solo. A Figura 4 ilustra esse modelo. A borda ondulada entre os componentes do modelo significa que a interação entre eles possui irregularidades inerentes à própria diferença de natureza dos mesmos.



Componentes:

S = *Software* (leis, regulamentos, regras, manuais, procedimentos operacionais padrão)

H = *Hardware* (máquinas, ferramentas, sinais)

E = *Environment* (meteorologia, condições de trabalho, ambiente do dia)

L = *Liveware* (operador, piloto, controlador, mecânico)

L = *Liveware* (igual acima, membro do time, participante no sistema)

Figura 4: Modelo SHELL e seus componentes (HAWKINS, 1987).

Leveson (2004) ressalta que, devido à revolução dos sistemas computacionais digitais embarcados, há mais relacionamentos complexos entre humanos e automação, o que aumenta o número de novos modos de falhas e introduz novos tipos de erros que se tornam importantes fatores nos acidentes contemporâneos.

Hollnagel (2002), verificando a diversidade dos modelos e das investigações conduzidas segundo as premissas de cada um, conclui que o conjunto dos fatores aos quais se atribui a “causa” dos acidentes evoluiu ao longo da história, partindo de causas técnicas para os fatores humanos de natureza individual e destes para níveis cada vez mais abrangentes da organização como o ambiente de trabalho, a organização e a estrutura de regulação, até atingir a cultura da sociedade como um todo.

Esta mudança pode ser percebida na Figura 5, que mostra a variação percentual dos fatores causais encontrados nas investigações de acidente ao longo das décadas de 1960 até o ano 2000.

Underwood e Waterson, (2013b) descrevem que que foram desenvolvidos modelos que permitem a aplicação da abordagem sistêmica, por exemplo, *Systems-Theoretic Accident Model and Processes* (STAMP) (LEVESON, 2004, 2011), o Método de Análise Ressonância de Funcional (FRAM) (HOLLNAGEL, 2004, 2012) e o ACCIMAP (RASMUSSEN, 1997).

Leveson (2004) apresenta o *Systems-Theoretic Accident Model and Processes*, STAMP. Com referência na Teoria Geral dos Sistemas, o STAMP utiliza como base as noções de *control loops* e modelos de processos, restrições (*constraints*) e níveis de

controles (baseado na noção de hierarquia entre subsistemas). Este modelo se tornou, ao lado do FRAM e do ACCIMAP uma das referências acadêmicas mais utilizadas como modelo sistêmico de acidentes (UNDERWOOD; WATERSON, 2013b), porém é desconhecido ou considerado de difícil aplicação prática pelos investigadores atuantes em campo (UNDERWOOD; WATERSON, 2013a).

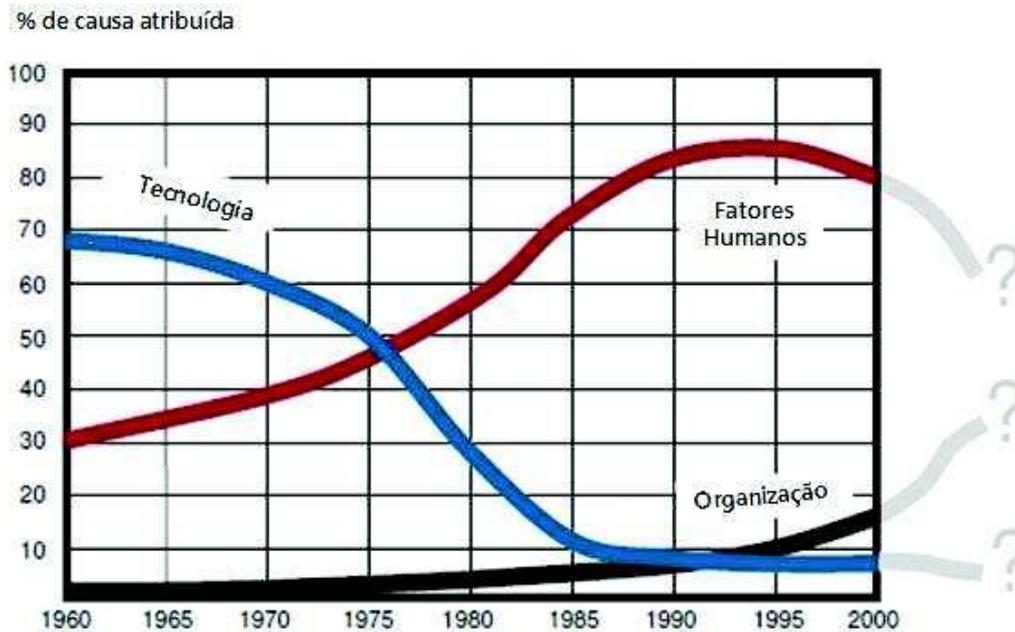


Figura 5: Variação percentual das causas dos acidentes (HOLLNAGEL, 2002).

Salmon et al. (2012) realiza uma análise comparativa entre a aplicação dos métodos STAMP, ACCIMAP e HFACS em um acidente com um grupo de turistas adolescentes em uma excursão sob supervisão de adultos. O trabalho mostra a diferença de facilidade de aplicação e de alcance entre os três métodos.

Essas teorias, elaboradas para explicar a atuação dos fatores humanos nos acidentes aeronáuticos, bem como seus desenvolvimentos teóricos posteriores, são aplicáveis para gerar uma interface entre a teoria geral dos sistemas, cibernética e macro-ergonômica e as análises de acidentes aeronáuticos constantes nos relatórios de investigação.

2.1.1 Acidentes aeronáuticos com perda de controle de voo

Os acidentes com perda de controle de voo (*Loss of control – inflight*) conhecidos mundialmente na comunidade da aviação pela sigla LOC-I são quase

sempre catastróficos. Devido à sua severidade, os acidentes LOC-I têm sido considerados pela indústria um dos maiores riscos à segurança da aviação (IATA, 2015). O estudo da IATA – *International Air Transport Association*, mostra que, no período de 2010 – 2014, 97 por cento dos acidentes com perda de controle de voo (com aeronaves acima de 5700kg) causou fatalidades e perda total da aeronave (*hull loss*).

Os acidentes aeronáuticos resultantes de perda do controle de voo tem sido a principal causa de fatalidades na aviação há mais de uma década, mas apenas recentemente se tornaram um tema de grande preocupação na indústria da aviação. Há um crescimento no número de acidentes nos quais pilotos altamente treinados e experientes perderem o controle de aeronaves de grande porte, resultando em acidentes catastróficos, com muitas baixas (MICHALES, 2012).

LOC-I refere-se a acidentes em que a tripulação não consegue manter o controle da aeronave em voo, resultando em um desvio irrecuperável da trajetória de voo. LOC-I podem resultar de falhas de motor, gelo, perda de sustentação (*stall*) ou outras circunstâncias que interferem com a capacidade da tripulação de voo para controlar a trajetória de voo da aeronave. É uma das categorias de acidentes mais complexas, envolvendo inúmeros fatores contribuintes que atuam individualmente ou, mais frequentemente, em combinação. Esses fatores contribuintes incluem condições latentes no sistema, ameaças externas à tripulação de voo, erros no manejo dessas ameaças e situações indesejadas na aeronave resultantes de deficiências na gestão de ameaças ou erros (IATA, 2015).

O CENIPA, na taxonomia dos “Tipos de Ocorrência” constante no Manual de Investigação do SIPAER, define a “Perda de controle em voo” como sendo o tipo de ocorrência em que:

O piloto não mais controla a aeronave por falta de condições ou ineficácia da atuação dos comandos, no período entre a saída da aeronave do solo até o toque no pouso. Este tipo não inclui decolagem de planador rebocado nem helicóptero taxiando sem contato com o solo (BRASIL, 2011).

A perda de controle em voo ocorreu em 19,1 por cento dos acidentes no Brasil no decênio de 2004 – 2013 (BRASIL, 2014a). Fajer et al. (2011) mostra que 16,7 por cento dos acidentes aeronáuticos ocorridos no Estado de São Paulo, entre os anos de 2000 -2005, ocorreu com perda de controle de voo. E Houston et a. (2012) afirma que 78 por cento dos acidentes em voos de instrução aérea nos Estados Unidos (EUA) são causados pela falha em manter o controle direcional da aeronave.

2.2 INTERDISCIPLINARIDADE DA INVESTIGAÇÃO DE ACIDENTES AERONÁUTICOS

O desafio para os investigadores de acidentes aeronáuticos é integrar, de forma correta e com um sentido lógico, as informações colhidas em todas as áreas de uma investigação: os fatores humanos, o aspecto operacional, o fator material e as influências do ambiente físico, organizacional e social.

Por causa disso, a atividade de investigação de acidentes não constitui um ramo do conhecimento exclusivo das ciências aeronáuticas. Porém devido à gravidade das consequências de um acidente aeronáutico, a investigação dos mesmos influencia de maneira tão direta e intrínseca o desenvolvimento do campo que a mesma se torna uma atividade essencial.

Por definição, a área denominada de “Fatores Humanos” é a área de abordagem da segurança de voo que se refere ao complexo biológico do ser humano e que compreende os aspectos médico, psicológico e operacional (BRASIL, 2014b). O aspecto operacional é tão importante nas investigações de acidentes aeronáuticos que algumas vezes é denominada como sendo um fator à parte dos fatores humanos, denominado “Fator Operacional”. Nessa tese, as expressões “aspecto operacional do Fator Humano” e “Fator Operacional” são tratadas como sinônimas, não cabendo aqui a discussão sobre taxonomia para resolver esta questão.

A investigação do “Fator Material” abrange os aspectos relacionados com a fabricação da aeronave, o manuseio de material, o projeto e ligados à certificação do tipo da aeronave. Também são analisados os aspectos relativos aos equipamentos e aos sistemas de tecnologia para o Serviço de Tráfego Aéreo (BRASIL, 2013).

A interação da aeronave com a atmosfera próxima (o entorno ambiental) faz parte do projeto da mesma e seu estudo pertence ao escopo da engenharia aeronáutica, sendo então, abordada pelo fator material em uma investigação. Por outro lado, as ações de pilotagem que efetuam o controle da aeronave por meio dos comandos de voo (os quais efetuam alterações no entorno ambiental permitindo a evolução da aeronave) são investigadas pelo aspecto operacional.

A atmosfera em suas características meteorológicas é investigada por um especialista em meteorologia, que é incluído na constituição básica de uma comissão caso as circunstâncias do acidente tornem necessário o aprofundamento deste aspecto.

Chaves (1998, p.5), citando Piaget, diferencia multidisciplinaridade e interdisciplinaridade.

A multidisciplinaridade ocorre, quando “a solução de um problema torna necessário obter informação de duas ou mais ciências ou setores do conhecimento sem que as disciplinas envolvidas no processo sejam elas mesmas modificadas ou enriquecidas” e o termo interdisciplinaridade deve ser reservado para designar “o nível em que a interação entre várias disciplinas ou setores heterogêneos de uma mesma ciência conduz a interações reais, a uma certa reciprocidade no intercâmbio levando a um enriquecimento mútuo”.

Além destes dois conceitos, é apresentado também, o conceito de transdisciplinaridade.

O conceito de transdisciplinaridade envolve não só as interações ou reciprocidade entre projetos especializados de pesquisa, mas a colocação dessas relações dentro de um sistema total, sem quaisquer limites rígidos entre as disciplinas (PIAGET apud Chaves, 1998, p.5).

Em relação às definições de multidisciplinaridade, interdisciplinaridade e transdisciplinaridade, a investigação de acidentes aeronáuticos encontra-se, ora como um campo interdisciplinar ora como transdisciplinar.

A segurança de voo perpassa todas as atividades aeronáuticas sem exceção, utilizando-se de todas e contribuindo para o aprimoramento de todas em seu objetivo de prevenir acidentes.

A transdisciplinaridade, como o prefixo trans indica, lida com o que está ao mesmo tempo entre as disciplinas, através das disciplinas e além de todas as disciplinas. Sua finalidade é a compreensão do mundo atual, para o que um dos imperativos é a unidade do conhecimento (NICOLESCU, 1996. p.12).

A investigação de acidentes aeronáuticos cria um sentido de unidade a todos os campos da ciência aeronáutica, em um sentido transdisciplinar. Por outro lado, enfrenta o desafio de congregar ciências tão diferentes quanto engenharia e psicologia em um mesmo escopo, passando ainda por meteorologia, física, metalurgia e outras ciências.

Cada uma destas áreas possui técnicas e modelos próprios para obter, organizar e analisar as informações do seu objeto de estudo. Desta forma, os modelos utilizados pela engenharia aeronáutica são completamente diferentes, e em alguns casos incompatíveis, com os modelos utilizados pela psicologia da aviação e com os modelos adequados para a análise dos aspectos operacionais. Cada um dos modelos adotados por uma das ciências em particular, é adequado à sua base teórica e epistemológica, não o sendo para as outras ciências.

Especificamente para o uso da Teoria Geral dos Sistemas no desenvolvimento de um modelo transdisciplinar, observa-se que: “O modelo serve não apenas para ‘um melhor entendimento e controle dos sistemas na natureza e sociedade’, mas também para resolver problemas científicos particulares”. (LIN; CHENG, 1998, DRACK; SCHWARZ, 2010).

2.2.1 Psicologia da aviação e a interação na cabine

Ergonomia (ou Fatores Humanos) é a disciplina científica relacionada com a compreensão das interações entre seres humanos e outros elementos de um sistema, e a profissão que aplica teoria, princípios, dados e métodos nos projetos a fim de otimizar o bem-estar humano e o desempenho sistêmico global. Ergonomistas contribuem para a concepção e avaliação de tarefas, trabalhos, produtos, ambientes e sistemas, a fim de torná-los compatíveis com as necessidades, habilidades e limitações das pessoas (INTERNATIONAL ERGONOMICS ASSOCIATION, 2008).

Faz parte da investigação dos Fatores Humanos uma análise dos aspectos médico e psicológico, considerando as características fisiológicas, psicológicas, organizacionais e sociais.

A investigação do aspecto psicológico dentro dos Fatores Humanos é realizada por psicólogos especializados na investigação de acidentes aeronáuticos. O aspecto psicológico é a participação de variáveis psicológicas individuais, psicossociais ou organizacionais no desempenho da pessoa envolvida (BRASIL, 2013).

Como em qualquer outra observação de características ligadas à mente e ao comportamento humano, as técnicas utilizadas para levantar dados e efetuar análises do aspecto psicológico utilizam os modelos desenvolvidos pela psicologia. O campo de pesquisa da psicologia da aviação é bastante desenvolvido, com vasta bibliografia no mundo e com uma comunidade profissional bastante atuante no Brasil (RIBEIRO; PEREIRA, 2001).

Dentro das variáveis psicológicas individuais, os modelos utilizados para a avaliação dos pilotos envolvidos em acidentes aéreos não são exclusivos para este fim. Os testes são focados no desempenho humano em geral e nas psicopatologias comuns que podem estar, também, presentes na aviação.

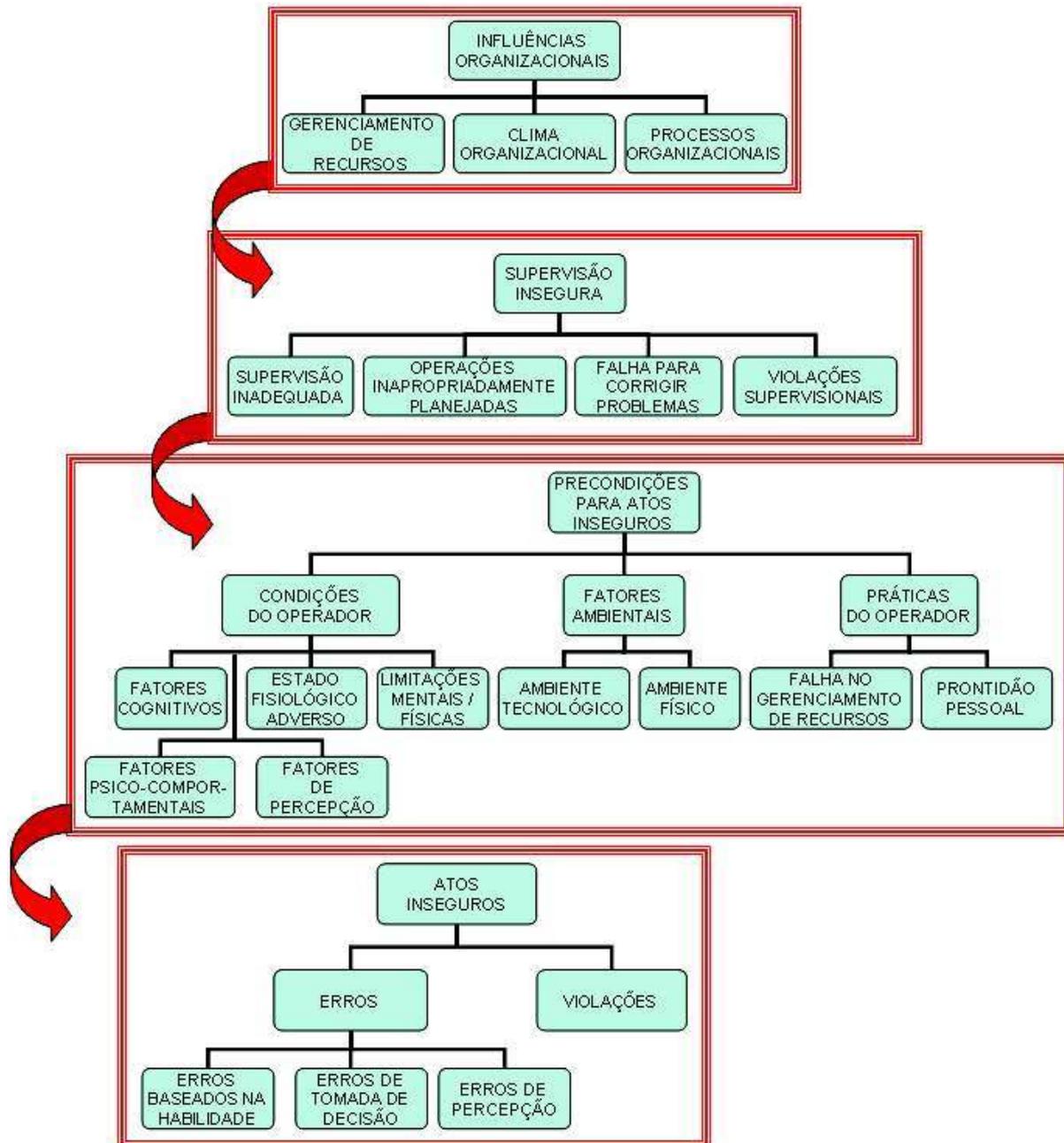


Figura 7: Modelo HFACS (WIEGMANN; SHAPPELL, 2000, apud VILELA; SAMPAIO, 2011).

As variáveis psicológicas organizacionais são avaliadas por metodologias especializadas. Uma destas metodologias é denominada *Human Factors Analysis and Classification System* (HFACS) (Figura 7). Este sistema de classificação e análise dos fatores humanos é uma metodologia reativa que foi desenvolvida ao final da década de 1990 especificamente para a investigação de acidentes aeronáuticos (SHAPPELL, WIEGMANN, 2000).

A real contribuição do HFACS para o processo de investigação de acidentes aeronáuticos foi a criação de um sistema de classificação estruturado para os Fatores

Humanos. Os fatores considerados no modelo HFACS são: influências organizacionais (clima organizacional, processo organizacional, gestão de recursos), supervisão insegura (supervisão inadequada, planejamento inadequado das operações, falha em corrigir problemas conhecidos, violações de fiscalização), condições prévias de atos inseguros (fatores ambientais físicos e tecnológicos), condições do operador (estado mental e fisiológico adversos, limitações físicas e mentais), fatores pessoais (gestão da tripulação a bordo e prontidão pessoal) e atos inseguros (erros de decisão, de habilidade e de percepção, e violações de rotina e excepcionais) (FAJER et al., 2011).

Em relação às variáveis psicológicas psicossociais, o ambiente de cabine possui uma especificidade em relação aos demais ambientes laborais. Duas ferramentas específicas foram desenvolvidas para a aplicação no ambiente da cabine, o *Cockpit Resource Management* (CRM) e o *Line Oriented Safety Assessment* (LOSA).

O CRM, que atualmente evoluiu de forma a extrapolar o ambiente da cabine, mudando sua denominação para *Crew Resource Management* e posteriormente para *Corporate Resource Management*, tem sua base nas habilidades não-técnicas importantes para um bom desempenho da tripulação dentro da cabine de uma aeronave em voo. As capacidades não-técnicas estão agrupadas nos temas: comunicação, relacionamento interpessoal, consciência situacional, tomada de decisão e gerenciamento do erro.

O LOSA é uma auditoria especializada realizada em voo na qual o desempenho das habilidades não-técnicas da tripulação é avaliado por um observador especialmente treinado. Um observador LOSA pode não ser um piloto e não possuir conhecimento técnico para a operação da aeronave. Isto é feito propositalmente para que a observação seja focada estritamente nos aspectos não-técnicos. A avaliação da técnica de operação da aeronave é realizada durante voos de verificação denominados voos de cheque, que podem ser realizados em simulador de voo ou na própria aeronave (VILELA; SAMPAIO, 2011).

2.2.2 Pilotagem e a interação homem x máquina

Toda aeronave tripulada é projetada tendo em vista as características humanas tais como dimensão, força física, acuidade sensorial e capacidade cognitiva. Da mesma

forma, todo candidato a piloto tem a sua saúde avaliada nestas mesmas características de forma que tem-se, conceitualmente, toda aeronave projetada de forma a ser humanamente “pilotável”.

A formação de um piloto inclui, como um fator fundamental para demonstração de proficiência, a sua avaliação psicomotora. Esta avaliação é realizada com base na sua capacidade de realizar tarefas de pilotagem em determinada aeronave. Simpson (1966) desenvolveu um sistema de classificação dos objetivos educacionais para o domínio psicomotor. Este sistema taxonômico é utilizado como base de mensuração da capacidade dos pilotos no Brasil (Quadro 1). A qualidade de um piloto é medida com base na sua proficiência em pilotar a aeronave na qual ele está sendo avaliado.

Quadro 1: Adaptação da Taxonomia do Domínio Psicomotor (SIMPSON, 1966) para aplicação à instrução aérea.

	Nível	Descrição aplicada à instrução aérea
PR	Preparação	O piloto possui todo o conhecimento teórico necessário para a realização da manobra
PE	Percepção	O piloto vê a manobra executada pelo instrutor de voo
RO	Resposta Orientada	O piloto executa a manobra com auxílio manual do instrutor
RM	Resposta Mecânica	O piloto executa a manobra com auxílio verbal do instrutor
RC	Resposta Aberta Complexa	O piloto executa a manobra, percebendo e corrigindo seus erros de forma independente. O instrutor dá orientações para aperfeiçoar a manobra
AD	Adaptação	O piloto consegue adaptar a manobra para novas situações de voo
CR	Criação	O piloto é capaz de criar uma nova manobra com base em seu conhecimento e habilidade psicomotora

Nota: Para fins didáticos, a instrução aérea na Força Aérea Brasileira utiliza os níveis PR e PE condensados em um só (PR) e o mais alto nível avaliado é o RC, o que não significa que os outros níveis não sejam atingidos ao longo da carreira do oficial aviador.

Fonte: autor.

Em um acidente aeronáutico, a investigação do aspecto operacional “refere-se ao desempenho do ser humano nas atividades diretamente relacionadas com o voo” (BRASIL, 2012). O investigador do aspecto operacional deverá ser “preferencialmente com experiência no tipo de aviação ou na aeronave envolvida na ocorrência” (BRASIL, 2013). De tal forma que o investigador estará mais capacitado para perceber as nuances da interação homem-máquina, uma vez que conhece a aeronave, o tipo de missão realizada e, também, as capacidades necessárias ao piloto para efetuar a pilotagem da aeronave na realização da missão.

2.3 TEORIA GERAL DOS SISTEMAS

Se alguém tentar entender o funcionamento de um equipamento mecânico, como um carro, só olhando as suas partes separadamente, talvez não consiga compreender o que é e para que serve só olhando suas peças. É preciso entender de que forma as diferentes partes do sistema interagem entre si e com o motorista. Da mesma forma, um observador que foque apenas nas estruturas microscópicas de um ser vivo macroscópico, não consegue formar a imagem completa daquela espécie.

A teoria de sistemas foi proposta pelo biólogo Ludwig Von Bertalanffy, na primeira metade do séc. XX, como um instrumento de análise baseada numa visão diferente do reducionismo científico até então aplicado pela ciência convencional. A partir de conceitos definidos com precisão, foi desenvolvida uma linguagem simbólica matemática abstrata, capaz de reduzir o “babelismo científico” e servir como um instrumento que objetiva criar a unificação dos diversos ramos da ciência por meio de uma visão holística.

Pereira (2008) considera que outros cientistas que colaboraram com a construção dos aspectos conceituais, teóricos e matemáticos da TGS, cujos trabalhos formam o corpo da Teoria Geral dos Sistemas são: Ackoff, Ashby, Balakrishnam, Certhy, Chinal, Desoer, Goode, Hall, Jumarie, Kalmann, Klir, Kuhn, Laslo, Lussato, Machol, Mélése, Mesarovick, Morris, Pereira, Polak, Rubin, Shannon, Tomovic, Venikoff, Vullierme, Wiener, Wilson, Wymore e Zadeh.

Segundo a teoria de sistemas, ao invés de se reduzir uma entidade (um animal ou um carro, por exemplo) para o estudo individual das propriedades de suas partes ou elementos (órgãos, células ou peças), deve-se focalizar no arranjo do todo, ou seja, nas relações entre as partes que se interconectam e interagem organicamente entre si e com o meio, formando um sistema aberto.

Ackoff ressalta que:

Evidentemente, os sistemas já eram estudados há séculos, mas algo novo foi agora acrescentado... A tendência a estudar os sistemas como uma entidade e não como um aglomerado de partes está de acordo com a tendência da ciência contemporânea que não isola mais os fenômenos em contextos estreitamente confinados, mas abre-se ao exame das interações e investiga setores da natureza cada vez maiores (ACKOFF, 1959, apud BERTALANFFY, 1968).

Sendo um campo transdisciplinar desde a sua própria origem, a Teoria Geral dos Sistemas permite diversas descrições do seu objeto primordial de estudo, o sistema. Assim, diferentes definições são encontradas na literatura, cada uma delas estabelecida pelos pesquisadores de acordo com a necessidade de precisão de seu campo de atuação.

Desta forma, Dias e Gazzaneo (1975) definem sistema ressaltando seu objetivo, como sendo: “Conjunto de partes coordenadas, que concorrem para a realização de um conjunto de objetivos”.

Chiavenato (1983), pesquisador na área das Ciências da Administração, define sistema ressaltando a interação das partes: “Conjunto de objetos unidos por alguma forma de interação ou interdependência”.

A definição de sistema de Ballesteros Alvarez (1990) enfoca na formação de uma unidade: “O sistema pode ser definido como um conjunto de elementos interdependentes que interagem com objetivos comuns formando um todo”.

A definição de Sistema que é utilizada para a construção do modelo nesta Tese é a proposta por Pereira (2008):

Um conjunto determinado de elementos discretos (componentes ou subsistemas) interconectados ou em interação dinâmica, organizados e agenciados em função de um objetivo, fazendo o referido conjunto objeto de um controle.

As aplicações da teoria de sistemas abrangem o desenvolvimento de todos os ramos da ciência. Alguns exemplos são: engenharia, computação, ecologia, administração, psicoterapia familiar, termodinâmica, dinâmica caótica, vida artificial, inteligência artificial, redes neurais, modelagem, simulação computacional, jogos desportivos coletivo, turismo, aviação e cibernética.

A cibernética é “a ciência do controle e comunicação no animal e na máquina”, conforme foi definida por Wiener (apud ASHBY, 1956). Sua teoria trata de temas como estabilidade e *feedback* (retorno) e aplica-se de maneira direta na descrição das interações avião-aeronave realizadas nesta tese.

Em 1956, Ross Ashby introduziu a abordagem sistêmica na ciência cibernética, desenvolvendo os conceitos de regulação e retroação. O esquema de retroação simples é mostrado na Figura 6.

Mel Campbel, piloto de helicóptero no Alasca e veterano da guerra do Vietnã, descreve de forma intuitiva a importância dos efeitos descritos pela teoria cibernética quando afirma que: “se você sabe o que a aeronave irá fazer em todas as circunstâncias você poderá salvar sua pele” (CAMPBEL apud CHILES, 2007).

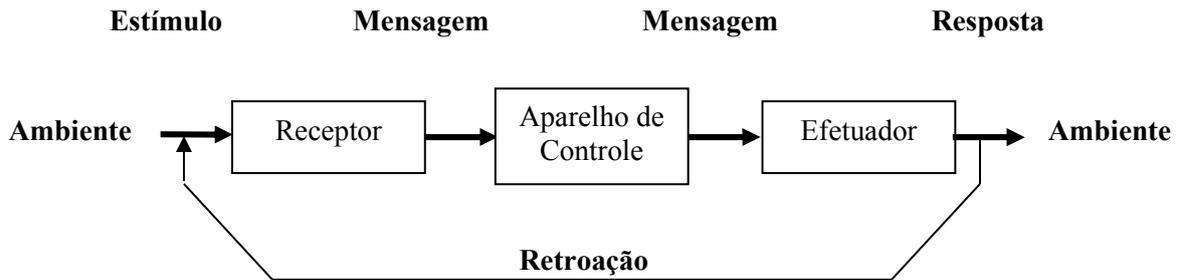


Figura 6: Esquema de retroação simples (BERTALANFFY, 1968).

É possível vislumbrar a aplicabilidade da TGS nas áreas citadas ao se entender o problema dos procedimentos analíticos da ciência.

O problema do sistema é essencialmente o problema das limitações dos procedimentos analíticos na ciência [...]. “Procedimento analítico” significa que uma entidade pode ser estudada resolvendo-se em partes e por conseguinte pode ser constituída ou reconstituída pela reunião destas partes.

A aplicação do procedimento analítico depende de duas condições. A primeira é que as interações entre as “partes” ou não existam ou sejam suficientemente fracas para poderem ser desprezadas [...]. A segunda condição é que as relações que descrevem o comportamento das partes sejam lineares, pois só então é dada a condição de aditividade.

Estas condições não são satisfeitas pelas entidades chamadas sistemas, isto é, consistindo de partes “em interação” (BERTALANFFY, 1968, p.37-38).

A conclusão de que a análise linear é insuficiente para determinados objetos de estudo foi uma das motivações dos pesquisadores desde a gênese da TGS. A necessidade da abordagem sistêmica resulta do fato que o “esquema mecanicista das séries causais isoláveis e do tratamento por partes tem se mostrado insuficiente para atender aos problemas teóricos [...] e aos problemas práticos propostos pela moderna tecnologia” (idem, p. 28).

A Sociedade de Pesquisa Geral dos Sistemas surgiu em 1954 e estabeleceu como principais funções da TGS:

- 1) investigar a isomorfia de conceitos, leis e modelos em vários campos e promover a transferência útil de um campo para outro;
- 2) encorajar a criação de modelos teóricos adequados em campos onde os mesmos não existam;
- 3) reduzir ao mínimo a duplicação do esforço teórico em diferentes campos; e
- 4) promover a unidade da ciência mediante a melhoria da comunicação entre os especialistas (ibidem, p.33).

Esta tese utiliza o resultado da investigação dos conceitos e leis, citada na primeira função para criar um modelo teórico conforme postula a segunda função, dentro do campo da investigação de acidentes aeronáuticos. Quando se leva em consideração que para a investigação de acidentes aeronáuticos concorrem investigadores de diversas áreas como a área dos aspectos operacionais (aviação, controle de tráfego aéreo, gestão da infraestrutura aeroportuária), do fator material (engenharia) e fatores humanos (psicologia e medicina), a proposta de utilizar a linguagem padronizada da TGS promove a melhoria da comunicação entre os especialistas destas diversas áreas desde a sua aplicação interna nas Comissões de Investigação de Acidente Aeronáutico (CIAA).

O conflito entre os especialistas no “hardware” dos sistemas de engenharia e os especialistas nos fatores humanos é observado desde a origem da engenharia de sistemas. Um dos considerados “utopistas” do novo mundo cibernético afirmou, em 1965, que:

É o elemento humano que se revela ser precisamente o componente falível de suas criações. Este elemento ou tem de ser eliminado de todo e substituído pelos equipamentos dos computadores, pela maquinaria auto regulável e coisas semelhantes, ou tem de ser tornado algo tão digno de confiança quanto possível, isto é, mecanizado, conformista, controlado e padronizado (BOGUSLAW, 1965, apud BERTALANFFY, 1968, p.26).

A resposta para este tipo de afirmativa encontra-se na citação de Ballesteros (2007), feita na introdução desta tese (pág. 5). Ao invés de ser uma verdade, este tipo de visão encerra em si a própria incompreensão da interação entre as partes de um sistema aeronáutico. Por uma visão tradicional, uma aeronave tripulada seria vista como um sistema de engenharia conduzida por operadores humanos.

Na visão sistêmica, um sistema aeronáutico é um sistema composto pela reunião, em conjunto, de um subsistema projetado e construído por engenheiros e demais profissionais ligados ao “*design* aeronáutico” (a aeronave), tendo como subsistema de controle um ou mais de um subsistema humano (os pilotos e engenheiro de voo, quando houver), que são organizados (pilotos e aeronave) para interagir dinamicamente com o fluxo de ar no qual estão imersos para obter sustentação e propulsão (aeronave) e controle (pilotos), de forma a atingir o objetivo do sistema, que é voar.

Esse mesmo conceito se aplica para o cenário das aeronaves “não-tripuladas”. A diferença é que o controle possui mais de um nível diferente. O controle do nível mais básico é realizado automaticamente, por computadores instalados na aeronave, e o controle de nível avançado (decisório) é realizado por profissionais que estão em terra, inclusive pilotos, através de conexão de dados por rádio convencional ou via satélite.

A análise de recentes acidentes ocorridos no Brasil e no mundo, no contexto da aviação de helicópteros mostra que muitos dos conceitos necessários para a pilotagem segura das aeronaves não são conhecidos pelos pilotos, mesmo alguns considerados experientes e profissionais. Isto mostra uma deficiência em um dos subsistemas (de controle) sobre as características da interação dos outros dois subsistemas cuja interação ele deve controlar.

Nos aviões, os efeitos aerodinâmicos do estol em grandes altitudes, da mesma forma que nos helicópteros, os efeitos aerodinâmicos como a perda da efetividade do rotor de cauda, que pode ocorrer em giros no pairado ao redor do eixo vertical com grande velocidade angular, e o estol de vórtex do rotor principal, em voos de descida vertical com grande razão de afundamento, são exemplos de eventos que levam a acidentes. Sobre o componente humano, os efeitos fisiológicos como a desorientação espacial e a ilusão de óptica também continuam a provocar acidentes.

O estudo da interação destes efeitos por meio dos conceitos da teoria cibernética: controle, *feedback*, estabilidade e outros pode mostrar os caminhos para o aperfeiçoamento dos programas de treinamento teórico e práticos bem como podem propor novos cenários de simulação de voo.

Estas ferramentas a serem desenvolvidas vão permitir o aumento da consciência situacional dos pilotos capacitando-os para o desempenho da atividade aérea com mais segurança. A partir desta base teórica, as teorias macro-ergonômica e cibernética servirão para descrever o relacionamento entre os componentes humano e mecânico no contexto da aviação.

As teorias de Análise de Fatores Humanos, fartamente utilizadas nas investigações de acidentes e incidentes aeronáuticos complementam o escopo teórico da pesquisa permitindo a harmonização dos conceitos das demais teorias e a validação dos mesmos no contexto da aviação.

2.3.1 Aplicação da Teoria Geral dos Sistemas às aeronaves tripuladas

As aeronaves são projetadas e construídas em uma concepção sistêmica. A partir da estrutura básica de um avião: fuselagem, asas, estabilizadores, superfícies de controle e trem de pouso; são acrescentados o sistema motopropulsor, o sistema de combustível, os sistemas elétrico e hidráulico, o sistema de comandos de voo e todos os demais sistemas contidos no projeto.

Os pilotos, enquanto seres humanos, podem ser estudados fisiologicamente a partir dos seus sistemas componentes: sistema nervoso central, sistema músculo-esquelético, sistemas sensoriais, sistema proprioceptivo e vestibular, sistema cardiovascular e outros. O estudo dos aspectos psicológicos e psicomotores também podem ser realizados utilizando-se a abordagem sistêmica (VASCONCELLOS, 2008).

Na atmosfera, o meio físico onde ocorre o voo, os conceitos de sistema são aplicados pelos meteorologistas: sistema frontal (frentes frias e frentes quentes), sistemas de instabilidade, etc. No “meio” onde o voo ocorre existe ainda outra classe de sistemas. Uma classe criada para a organização da circulação das aeronaves no espaço aéreo, o sistema de tráfego aéreo. Este sistema possui aerovias e espaços aéreos controlados e é operado pelos controladores de voo por meio do uso de sistemas de radares e de comunicações aeronáuticas.

Percebe-se, então, que em várias das suas faces, a aviação foi construída por meio da concepção sistêmica. Essa possibilidade vem ao encontro da própria natureza da ciência de sistemas, que, nas palavras de Azambuja, complementa a ciência tradicional.

A meta da ciência de sistemas era, porém, não substituir, mas complementar a ciência tradicional. A perspectiva maior de sistemas significa naturalmente a aquisição com a complexidade crescente de todos os sistemas, incluindo e envolvendo o homem. Gerald Weinberg (1975) diz que a ciência de sistemas, no contexto da evolução, tem a tarefa de ajudar os cientistas desvendar a complexidade, os tecnólogos ao domínio disto, e os outros a aprender a viver com isto (AZAMBUJA, 2004).

O conhecimento advindo da análise da aviação pela teoria geral dos sistemas possibilita o domínio das interfaces entre os diversos subsistemas existentes. Como exemplo cita-se a confecção dos *check-list* usados pelos pilotos das empresas aéreas. Esses podem ser definidos como um protocolo de interação entre o componente humano e o componente mecânico, o primeiro pelo uso do seu sistema cognitivo e o segundo

pelo sistema de instrumentos de voo e navegação existentes na cabine de comando.

Para que a atividade aérea seja possível é necessário o conjunto piloto-aeronave imerso em um meio: atmosfera. Decorrem das interações homem-máquina encontrados nessa atividade diversos efeitos, advindos não só das características dos humanos e das máquinas, mas próprias da interação em si. Essas interações são objeto de estudo da teoria macro-ergonômica.

Para Robertson a macro-ergonomia liga-se à teoria dos sistemas para obter uma visão analítica do ambiente de trabalho:

Baseada na sustentação conceitual da teoria dos sistemas sócio-técnicos, a macro-ergonomia integra uma visão analítica do sistema de trabalho para entender os subsistemas físico, psicossocial, organizacional e tecnológico e suas interações (ROBERTSON, 1991).

Essas interações são analisadas nas interfaces entre suas sub-partes tais como as interfaces homem-máquina, homem-ambiente, homem-*software*, homem-tarefa e homem-organização.

No contexto da aviação todas essas subpartes postuladas teoricamente estão presentes. A interface homem-máquina ocorre diretamente na pilotagem e na interpretação dos instrumentos e dispositivos de alarme. A interface homem-ambiente ocorre durante o voo, na interação com os fenômenos meteorológicos e aerodinâmicos. A interface homem-*software* encontra-se cada vez mais presente nos sistemas computacionais embarcados. A interface homem-tarefa está expressa objetivamente nos padrões operacionais e *check-lists* que devem ser utilizados. A interface homem-organização acontece por meio dos processos de seleção, formação e treinamento, bem como durante todo o acompanhamento da vida operacional do piloto.

Perrow (1984), em sua Teoria dos “acidentes normais” (*normal accident theory*), postula que acidentes são apenas uma das saídas normais de um sistema, fazendo parte do universo de possíveis resultados na operação do sistema. A incidência de acidentes está ligada a duas características relativas à relação entre os subsistemas componentes: interação e acoplamento.

Quanto à interação dos subsistemas em um sistema, Perrow a classifica como podendo ser linear ou complexa. Quanto ao acoplamento, este pode ser forte (*tight coupling*) ou frouxo (*loose coupling*).

O potencial para interações inesperadas de pequenas falhas em um sistema complexo que o torne propenso a um acidente sistêmico é maior em sistemas complexos

com acoplamento forte. Este é o caso da aviação. Nas palavras de Perrow (1984, p.146): “tem sido apresentada evidência suficiente para sugerir considerável complexidade e acoplamento em um ‘Sistema de Voo’ – o equipamento, tripulação e ambiente próximo”.

2.4 PRODUÇÃO CIENTÍFICA DOS ÚLTIMOS DEZ ANOS

A base teórica escolhida para esta Tese já pode ser considerada clássica: a Teoria Geral dos Sistemas. Para garantir que a abordagem adotada permanece atualizada com as práticas científicas mais recentes, apesar de a base teórica possuir várias décadas de existência, é necessário um estudo da bibliografia recente sobre o assunto.

Foi realizado o levantamento da produção científica nas áreas de investigação de acidentes aeronáuticos e da Teoria Geral dos Sistemas por meio de pesquisa bibliográfica sistemática dos artigos científicos produzidos nos últimos dez anos, seguindo a metodologia descrita por Shaw (1995) e Levy e Ellis (2006). A base de dados do portal Periódicos CAPES contém artigos publicados em periódicos e em anais de seminários e congressos. Esta base de dados foi utilizada através de acesso remoto via intranet da UFRJ.

As pesquisas na base de dados foram realizadas de forma sucessiva e sistemática utilizando as seguintes palavras-chave no campo de investigação de acidentes aeronáuticos: *aircraft accident*, *accident investigation*, *accident model*, *accident investigation technique*, *investigation model*, *flight safety model*, *aeronautical accident investigation*, *aeronautical accident model*, *aeronautical accident investigation* e *accident investigation theory*.

A primeira busca, utilizando como chave para a busca a entrada “*aircraft accidents*” gerou inicialmente 11.689 retornos. Ao refinar a busca, por meio da seleção exclusiva de artigos que passaram por um processo de revisão por pares, o número foi reduzido para 3.034 objetos. Ao realizar a busca cruzada dos termos “*aviation*” e “*accident*”, nos últimos dez anos para trabalhos escritos em inglês com revisão por pares, obtêm-se o número de 741 artigos. Por fim, buscando-se a expressão completa “*aircraft accident*” nos últimos dez anos, para trabalhos em inglês revisados por pares, o número total retornado pela base de busca foi de 107 artigos, os quais foram posteriormente analisados individualmente.

A segunda busca, utilizou a entrada “*General System Theory*” buscando artigos em inglês, revisados por pares, publicados nos últimos dez anos. Como resultado, o sistema retornou 39.022 objetos. Um número substancialmente maior do que o obtido na busca sobre acidentes aeronáuticos.

A grande amplitude dos temas nos artigos publicados no campo da TGS pode ser observada na própria sugestão de refinamento da busca fornecida pelo portal Periódicos CAPES. A página atribuiu, automaticamente, para o tópico “*Mathematical Models*” o número de 8.650 artigos; para “*Mathematical Analysis*” – 6.364 artigos; “*Algorithms*” – 3.842 artigos; “*Dynamical Systems*” – 3.781 artigos; “*Theory*” – 565 artigos; “*System Theory*” – 280 artigos; “*Systems Theory*” – 228 artigos; e “*General Systems Theory*” – 39 artigos.

O refinamento desta busca foi realizado com o cruzamento dos termos “*General System Theory*” e “*Accident*”, mantendo-se o filtro para artigos em inglês, revisados por pares, publicados nos últimos dez anos. A busca com estes parâmetros na base de dados resultou na lista de 63 artigos científicos, os quais também foram selecionados para análise.

Por fim, foi realizada a busca cruzada dos termos “*Aircraft Accident Model*” e “*General System Theory*”, sem qualquer outro filtro. O resultado desta busca foi a indicação de dois artigos, ambos do ano de 2014. O primeiro, intitulado “*Safety modelling and simulation of multi-factor coupling heavy-equipment airdrop*” (ZHANG et al., 2014), foi publicado pelo Chinese Journal of Aeronautics. O seguinte, “*Human-in-the-loop (HITL): Probabilistic Predictive Modeling (PPM) of an Aerospace Mission/Situation Outcome*” (SUHIR, 2014), foi publicado pela revista *Aerospace*.

Todos os 107 artigos encontrados na primeira busca, os 63 artigos da segunda busca e os dois artigos da busca cruzada foram submetidos a uma análise mais profunda. Pela leitura do resumo, palavras chave e título do artigo, foram descartados os que não teriam relação direta com a tese. Vinte e dois artigos científicos foram selecionados para leitura completa. Dentre estes 22 artigos, doze se mostraram relevantes para esta pesquisa e são citados na Tese.

Drack e Schwarz (2010) estudaram os desenvolvimentos recentes na Teoria Geral dos Sistemas em um artigo que desenvolve um estudo da evolução da TGS no mundo científico utilizando para tal a metodologia de busca sistemática dos artigos publicados entre os anos de 1995 e 2006 na base de dados do *Institute for Scientific Information (ISI) Web of Knowledge*.

Drack e Schwarz (2010) concluem que “a investigação dos artigos em TGS revela um domínio expandido; vai desde a lógica e tentativas matemáticas de construir um novo arcabouço para a TGS sobre as ciências sociais e da natureza até tratados filosóficos”.

O artigo intitulado “*Systemic accident analysis: examining the gap between research and practice*” (UNDERWOOD; WATERSON, 2013b) apresenta diversos conceitos que corroboram a atualidade da pesquisa realizada nesta tese. Para começar, é estabelecido que “A abordagem sistêmica é sem dúvida o paradigma dominante na análise de fatores humanos e investigação de acidentes” (SALMON et al., 2012; STANTON et al., 2012 apud UNDERWOOD; WATERSON, 2013).

Muitos acidentes em sistemas complexos não são simplesmente o resultado de uma falha de equipamento catastrófica ou uma ação humana insegura, conforme exigido de acordo com os modelos tradicionais de acidentes de causa e efeito; pelo contrário, acidentes surgem como fenômenos complexos dentro da variabilidade normal de funcionamento um sistema (DE CARVALHO, 2011, apud UNDERWOOD; WATERSON, 2013b).

Underwood e Waterson, (2013a) também mostram que grande maioria dos investigadores desconhece os métodos sistêmicos, em uso pelos acadêmicos, com destaque para STAMP, FRAM e ACCIMAP.

Saleh et al. (2010) revisam as idéias principais, as contribuições recentes e os desafios extraídos da literatura sobre acidentes e segurança sistêmica. Em sua conclusão são emitidas duas importantes recomendações. Uma é a respeito da necessidade de mais pesquisa básica e intercâmbio de idéias através de diversas disciplinas acadêmicas (especialmente entre engenharia de sistemas, ciência da computação, psicologia e ciências organizacionais). A criação de “*hubs*” acadêmicos e ambientes colaborativos é indicada como uma poderosa ferramenta para o estudo multidisciplinar da segurança em sistemas complexos.

A segunda recomendação visa a criar mais intercâmbio entre o setor acadêmico e as agências de investigação especializadas, onde é citada especificamente a agência de investigação de acidentes aeronáuticos dos EUA (NTSB), cujo equivalente brasileiro em termos aeronáuticos é o CENIPA – Centro de Investigação e Prevenção de Acidentes Aeronáuticos.

Suhir (2014), em seu estudo probabilístico para modelar o resultado de uma missão aeroespacial, propõe uma análise sistêmica de conceito muito semelhante, ao adotado nesta pesquisa. Seu objetivo é quantificar e mensurar incertezas em um sistema

onde há um “*human-in-the-loop*” (HITL). Na análise realizada, a aviação seria um sistema complexo, em suas palavras: “*a complex man–instrumentation–equipment–vehicle–environment system*”. Apesar de o trabalho diferir desta Tese no seu objetivo de criar um modelo probabilístico preditivo ao invés de um modelo conceitual simbólico, o conceito adotado é semelhante ao do Sistema de Voo, desenvolvido aqui.

Vuorio et al. (2013), ao estudar o que investigadores de acidentes de trabalho fatais podem aprender dos investigadores de acidentes aeronáuticos, cita:

a visão sistêmica tem influenciado as investigações de acidentes de aviação. Quase todos os acidentes envolvem uma interação complexa de características inerentes à performance humana, demandas da tarefa, condições e eventos ambientais e fatores organizacionais e sociais (DISMUKES et al., 2007 apud op. Cit.).

A análise econômica da segurança da aviação comercial mundial realizada por Oster, Strong e Zorn (2013), conclui que, para atingir os índices desejados de segurança, a próxima geração de desafios da segurança requer o desenvolvimento e a compreensão de novas formas de dados, mudando de uma forma reativa, com uma abordagem baseada em incidentes, em direção a uma abordagem mais preditiva, baseada na abordagem sistêmica.

Pruchnicki, Wu e Belenky (2010) realizam uma modelagem matemática do desempenho dos pilotos em relação ao seu ciclo circadiano de fadiga e descanso. A conclusão do artigo é que o estado de atenção dos pilotos pode ser calculado matematicamente com base na sua fadiga.

Esta conclusão corrobora a ideia de Lin e Cheng (1998), que afirmaram que cada subsistema componente possui um estado interno que influencia sua resposta a determinada entrada:

Comportamento, ou a ação externa de um sistema, é uma função do seu estado interno e da entrada recebida do ambiente; o sistema propriamente dito consiste de partes que “reagem umas as outras” e as equações de relacionamento entre as partes podem ser governadas por leis naturais ou sociais (LIN; CHENG, 1998).

Neste exemplo do ciclo circadiano, a função de atenção desenvolvida com base nos dados de repouso é uma lei natural que governa o comportamento dos pilotos, podendo alterar as saídas referentes a uma entrada determinada.

Cowlagi e Saleh (2013) aplicam os conceitos teóricos de sistemas formais para estabelecer a relação entre falhas de coordenação e consistência entre subsistemas em interação e a ocorrência de acidentes. Particularmente, seu caso de estudo do acidente

aeronáutico em Tenerife é analisado mostrando a falha de coordenação entre a Torre de Controle (subsistema de controle) e as tripulações de ambos os aviões que se chocaram no solo (subsistemas componentes). O artigo não cria um modelo conceitual simbólico, porém aborda de forma sistemática a falha na interação entre os subsistemas e a ocorrência do acidente.

A revisão bibliográfica sistemática mostrou, assim, que o tema desta tese é atual. Além disto, mostra também que vários trabalhos abordam aspectos importantes ligados ao tipo de modelo que está descrito nesta tese, porém não foi encontrado na bibliografia nenhum artigo que tenha, de fato, construído um modelo conceitual simbólico tal qual o desta Tese.

A Teoria Geral dos Sistemas é utilizada em diversos campos científicos e a abordagem sistêmica é considerada a mais indicada para a análise de acidentes em sistemas complexos. A utilização da TGS diretamente para modelar um Sistema de Voo, como ferramenta para auxiliar os investigadores de acidentes aeronáuticos é, então, um avanço científico que está alinhado com as mais recentes pesquisas no campo.

3 CONSTRUÇÃO DO MODELO CONCEITUAL

SIMBÓLICO

3 CONSTRUÇÃO DO MODELO CONCEITUAL SIMBÓLICO

A compreensão do Sistema de Voo e a construção do Modelo Conceitual Simbólico são etapas concomitantes na compreensão do ponto de vista do observador. Considera-se que a forma de um modelo é uma escolha baseada na utilidade do mesmo. Sendo uma redução da realidade, haverá outras formas de construir um modelo, mesmo utilizando-se metodologia semelhante.

3.1 DEFINIÇÕES DE AMBIENTE E A HIPÓTESE DE NAVE

A Teoria Geral dos Sistemas classifica os sistemas em fechados e abertos. Em um sistema fechado, os subsistemas interagem apenas entre si, não efetuando trocas com nenhum elemento externo. Um sistema é aberto quando sofre interação com o ambiente onde está inserido. Um sistema aberto e seu ambiente estão em permanente inter-relação, a qual gera realimentações. Um sistema realimentado é um sistema dinâmico. (BERTALANFFY, 1968).

Ambiente é um conceito de difícil definição. Compreende todos os elementos que interagem com o sistema e alteram suas saídas presentes e futuras; porém, não são considerados parte integrante do sistema. “De modo geral, todo sistema está imerso em um meio ambiente (elementos que não fazem parte do sistema), interagindo com este na forma de entradas (ações do meio sobre o sistema) e saídas (ações do sistema sobre o meio)” (NOBRE, 2011).

Para que sejam estabelecidas quais partes são ou não integrantes de um sistema, são levados em consideração o conceito de hierarquia, o ponto de vista do observador e os limites do sistema. O conceito de hierarquia é inerente aos sistemas, sendo utilizado de forma bidirecional. Todo sistema é composto de subsistemas bem como todo sistema pode compor outro sistema maior. A definição de ambiente onde um sistema está inserido é dependente da definição dos limites desse sistema. O estabelecimento dos limites depende do ponto de vista do observador deste sistema.

A definição de ambiente em uso na investigação de acidentes aeronáuticos reflete esta flexibilidade de ponto de vista e busca uma forma abrangente de incluir todas as possíveis nuances de ambiente. O ambiente inclui, então, desde o meio ambiente físico, externo à aeronave – o ambiente meteorológico – até o ambiente físico interno – a atmosfera da cabine, sua pressurização, composição, temperatura, umidade

etc. Inclui também os aspectos psicossociais internos e externos – o clima de cabine e o clima psicossocial do ambiente de trabalho (BRASIL, 2011)

O primeiro refere-se à interação imediata entre os pilotos e demais tripulantes, que em sua convivência geram o clima da cabine. O clima organizacional refere-se desde o ambiente psicossocial na qual os tripulantes estão inseridos na empresa aérea ou unidade aérea até a cultura profissional de aviação em determinado país ou região.

Hollnagel (2002), analisando o papel dos humanos nos acidentes comenta que, mesmo que não se considerem as pessoas como causa primária dos acidentes, elas têm um papel na forma como os sistemas falham, simplesmente porque são parte indispensável em qualquer sistema complexo. A posição relativa das funções humanas em relação à falha de um sistema é classificada em “*Sharp end*” e “*Blunt end*” – a ponta da lança ou o outro extremo de sua haste, a extremidade cega.

A ponta da lança refere-se às pessoas diretamente ligadas à execução das atividades relacionadas à falha investigada. A outra ponta, “*blunt end*”, extremidade cega, refere-se a todas as demais pessoas que influenciaram a ponta da lança. Roberts (apud HOLLNAGEL, 2002) considera também que: toda extremidade cega de alguém, é a ponta de lança de outro alguém (“*everybody’s blunt end is somebody else’s sharp end*”).

Suhir (2014) considera que é necessário criar pontes entre três conjuntos de conhecimento críticos responsáveis pelo desempenho e segurança do sistema homem-instrumentação-equipamento-veículo-ambiente, quais sejam, engenharia de confiabilidade (*reliability engineering*), as tecnologias veiculares e os fatores humanos.

3.1.1 A hipótese de nave

A hipótese de nave é uma forma, criada nesta tese, de definir os limites do sistema, e com isso, os subsistemas componentes. Por exclusão define-se, também, o ambiente. A criação da hipótese de nave baseia-se na ausência de limites claros entre a ponta da lança e o “*blunt end*” nos modelos já existentes de acidentes. Parte do ponto de vista de que uma aeronave em voo carrega em si todos os elementos que podem contribuir para uma falha e contém todos os elementos que podem ser utilizados para a recuperação desta falha.

A inspiração para o estabelecimento da hipótese de nave partiu do ponto de vista de um investigador de acidente aéreo tomando-se como exemplo extremo o acidente ocorrido com o voo Air France 447, em 1º de junho de 2009. Este acidente com um avião Airbus 330 ocorreu no ponto médio da rota sobre o Oceano Atlântico Sul, em um ponto no qual nenhuma comunicação de rádio era possível e a aeronave estava fora do alcance dos radares, tanto situados na América do Sul, quanto na costa oeste da África, bem como dos radares situados nas ilhas oceânicas.

O avião estava isolado, como uma cápsula, dentro de uma concepção de nave. Todos os fatores contribuintes para o acidente, latentes ou ativos, estavam presentes a bordo da aeronave, assim como todos os recursos disponíveis para efetuar a recuperação da crise, os quais na ocasião, não foram suficientes. Os subsistemas componentes, então, foram considerados os elementos que interagiram de forma ativa por estarem presentes no local do acidente: pilotos, aeronave e entorno ambiental (Figura 8).



Figura 8: Sistema de Voo na concepção de uma nave imersa no ambiente externo.

Para a hipótese de nave, o ambiente externo distante é considerado fora dos limites do sistema. Sua influência, física ou organizacional, alcança o sistema na forma de entradas que alteram a variável de estado do sistema, seus efeitos permanecendo latentes nos elementos do sistema até a ocorrência de uma possível interação que altere as saídas futuras.

Por exemplo: imagine que haja no ambiente externo, em algum ponto da rota de uma aeronave, condições propícias para a formação de gelo. Quando a aeronave

alcançar este ponto, estas condições passarão a estar presentes no entorno ambiental, alterando o estado desse entorno de forma que, um sistema em que não havia a formação de gelo, passará a ter potencial latente para essa formação. Essa mudança é representada por uma alteração na variável de estado do entorno ambiental, que é um subsistema do Sistema de Voo considerado.

Dependendo do estado do subsistema aeronave e dos subsistemas piloto e copiloto, a formação de gelo pode se concretizar. Caso estes não estejam cientes das condições propícias para a formação de gelo (estado dos pilotos) ambos podem deixar o aquecimento dos tubos de *pitot* desligados (estado da aeronave), o que em conjunto com o estado do entorno ambiental já exemplificado culminaria na formação de gelo nos *pitots*.

Considerando a definição de ambiente em uso nas investigações de acidentes aeronáuticos, é considerado como parte integrante do sistema o ambiente interno da cabine, tanto físico quanto psicossocial. O ambiente físico interno é o meio pelo qual ocorrem interações entre o subsistema aeronave e os subsistemas piloto e o ambiente psicossocial da cabine é o meio pelo qual ocorrem interações entre os pilotos.

Pela hipótese de nave, o entorno ambiental em interação direta com a aeronave, é considerado um subsistema componente, representado no modelo. A inclusão do entorno ambiental como subsistema baseia-se no reconhecimento das interações mistas complexas instantâneas existentes entre a aeronave, por meio das suas características aerodinâmicas, sensores e superfícies de controle, e o escoamento do ar em contato com a mesma.

Do ambiente externo proveem os elementos externos ao sistema que por ventura podem tornar-se entradas do sistema. Uma nuvem de cinzas vulcânicas presente no ambiente, ou um raio que surja de uma nuvem são elementos pertencentes ao ambiente externo até o momento que seja incorporado ao sistema, atingindo o Sistema de Voo como entradas do entorno ambiental ou da aeronave, alterando o estado desses subsistemas e o comportamento do sistema como um todo.

As transmissões de rádio recebidas e efetuadas pelos pilotos são, também entradas e saídas do subsistema aeronave posto que não são realizadas diretamente pelos pilotos, mas através do equipamento. Uma falha no equipamento, ou a falta de energia, impede sua realização.

Da mesma forma, elementos pertencentes a outros sistemas de voo podem ser saídas do Sistema de Voo para o ambiente e lá permanecerem até se tornarem, eventualmente, entradas em outro Sistema de Voo. Um exemplo é uma parte de aeronave que se desprenda e atinja outra aeronave, no solo ou em voo. Ao desprender-se passou a ser uma saída do Sistema de Voo para o ambiente, ao atingir a outra aeronave, passou a ser uma entrada para este outro Sistema de Voo.

3.2 METODOLOGIA UTILIZADA PARA A CONSTRUÇÃO DO MODELO

A notação de Venikoff para a descrição de sistemas complexos é aplicada na construção do modelo conceitual simbólico representativo de um “Sistema de Voo”, seguindo a concepção proposta de “nave”. As consequências da utilização do modelo TGS para as relações epistemológicas das ciências aeronáuticas são ressaltadas como um avanço na compreensão do campo científico, que passa a ter um modelo abrangente que comporta todas as disciplinas constitutivas, da engenharia à psicologia, passando pela aviação propriamente dita.

A notação simbólica a ser utilizada na representação gráfica do sistema e de cada um de seus subsistemas será o diagrama de bloco ou diagrama funcional estabelecido por Venikoff (Figura 9). Neste diagrama, os subsistemas (SS_n) são representados por caixas e as interações entre os componentes por setas indicativas das entradas (u_n) e saídas (y_n). Não são representados os mecanismos ou estruturas internas a cada subsistema, mas sim o relacionamento entre os subsistemas componentes do sistema considerado (ZEIGLER; PRAEHOFER; KIM, 2000).

É importante observar que a uma entrada u não necessariamente corresponde somente uma saída y . Na realidade, uma entrada $u = u [t_o, t_l]$, (onde t_o é o tempo inicial e t_l o tempo final da entrada) pode estar relacionada a mais de uma saída possível pois a saída é influenciada pela situação interna do sistema no momento da aplicação da entrada. Este estado do sistema, (KALMAN; FALB; ARDIB, 1969; LIN; CHENG, 1998), é caracterizado por uma variável x chamada variável de estado, onde X é o espaço desta variável. Este representa uma “memória” de todas as entradas passadas do sistema que têm influência na saída $y(t)$.

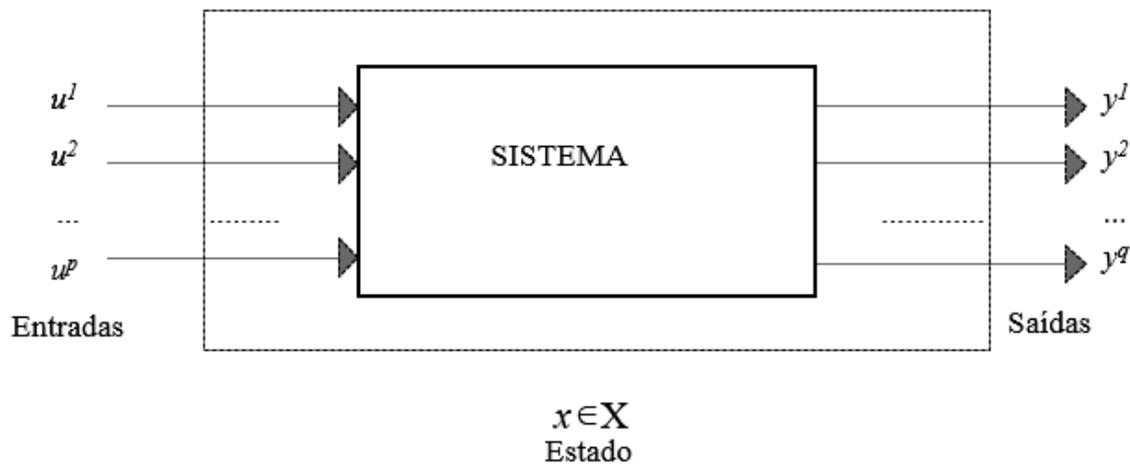


Figura 9: Diagrama Funcional de Venikoff (PEREIRA, 2008).

É por esta razão que a saída do sistema não deve ser definida com uma função ou como um operador relacionado diretamente à entrada, mas como uma relação entre conjuntos de entradas, conjuntos de saídas e conjunto de estados estabelecidos no tempo. O comportamento do sistema é a sua ação externa na forma de uma função de seu estado interno e sua entrada (LIN; CHENG, 1998).

A denominação das entradas e saídas dos sistemas e subsistemas é padronizada. As entradas e saídas do Sistema de Voo como um todo são numeradas com índices em algarismos romanos sobrescritos. Por exemplo:

- u^I : entrada I do Sistema de Voo;
- y^{II} : saída II do Sistema de Voo;

Nas estradas e saídas dos subsistemas, o índice inferior corresponde ao subsistema ao qual a entrada ou a saída pertence e o índice superior remete ao subsistema de onde se origina a entrada ou para onde se destina a saída. Conforme os exemplos de notação que se seguem:

- u_2^1 : entrada 1 do Subsistema P2 (originária da entrada u^I do Sistema de Voo);
- y^p_a : saída do Subsistema A para os Subsistemas P (P_1 e P_2);
- y^{I2}_{ae} : saída para os Subsistemas P_1 e P_2 do subsistema E através do subsistema A.

Para evitar ambiguidade na notação das variáveis, o índice p foi reservado para a saída e entrada de informações relativas ao voo visual do Subsistema A para P_1 e P_2 , pois essas informações são essencialmente iguais para ambos, haja vista que são obtidas

olhando através das janelas da aeronave (basicamente a atitude da aeronave no espaço tridimensional). O índice 12 foi reservado para as informações relativas ao voo por instrumentos, pois representa o conjunto das informações que são apresentadas separadamente para cada um dos pilotos, P_1 e P_2 , em seus respectivos instrumentos de voo. O índice *ae* foi reservado para identificar as entradas e saídas a respeito do Subsistema Entorno ambiental que são repassadas aos pilotos através do Subsistema Aeronave.

Os mesmos índices são utilizados para identificar as variáveis de estado x referentes a cada um dos subsistemas.

3.3 SUBSISTEMAS COMPONENTES

Complexidade “é o caráter da organização cuja descrição comporta uma pluralidade de níveis lógicos solidários, mas irreduzíveis entre si”. Complicação é “o caráter do objeto cuja descrição exige um número relativamente elevado ou uma diversidade de relações” (VULLIERME apud PEREIRA, 2008).

Tendo como base os dois conceitos, de complexidade e de complicação, conforme citado, o objetivo perseguido na descrição dos subsistemas foi conseguir obter uma representação que exprimisse toda a complexidade das interações entre os mesmos, com o mínimo de complicação. A descrição dos subsistemas componentes é feita seguida da caracterização funcional de cada um.

Da observação das partes necessárias para a construção do modelo, definiu-se como subsistemas componentes do modelo: PILOTO (P_1), COPILOTO (P_2), AERONAVE (A) e ENTORNO AMBIENTAL (E).

3.3.1 Subsistemas Piloto (P_1) e Copiloto (P_2):

No Sistema de Voo, conforme concebido neste trabalho, o piloto e o copiloto são considerados subsistemas, denominados P_1 e P_2 . Ambos possuem função de controle do sistema e atuam em paralelo, tendo uma associação mista complexa. Ambos recebem entradas do meio ambiente externo, bem como os diversos sinais do subsistema Aeronave (A), recebidos através do painel de instrumentos e do próprio comportamento em voo da aeronave.

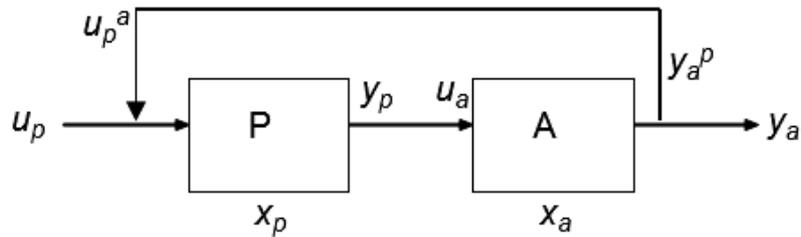


Figura 10: Associação direta entre piloto P e Aeronave A, com *loop* de controle.

Ambos constituem o subsistema de controle do sistema sócio-técnico e sua interface com os outros subsistemas ocorre de forma direta com o subsistema aeronave e de forma indireta com o subsistema entorno ambiental, pois apenas em situações muito específicas, o ar em contato com a aeronave torna-se visível (através de condensação da água ou da presença de fumaça e outras partículas em suspensão). A interação de controle de um piloto com o subsistema aeronave é mostrada na Figura 10, na forma de associação direta e *loop* de controle.

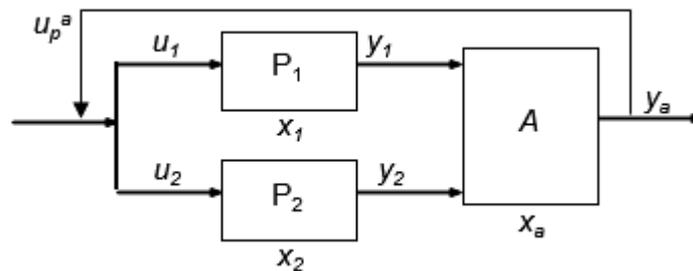


Figura 11: Associação paralela entre os pilotos P_1 e P_2 e direta entre estes e a Aeronave A, com *loop* de controle.

Além disso, ambos os pilotos têm acesso aos controles e atuam em paralelo no comando da aeronave, podendo substituir-se mutuamente nas interações realizadas com a aeronave. Isso significa que há uma associação em paralelo dos pilotos, além da associação direta destes com a aeronave, conforme mostrado na Figura 11.

A interação de ambos os pilotos P_1 e P_2 entre si ocorre na forma de associação mista complexa, conforme mostrado na Figura 12. Tal associação significa que as ações executadas por P_1 são saídas que realimentam P_2 , tanto as que são feitas por P_1 para A quanto as feitas por P_1 para P_2 e vice-versa.

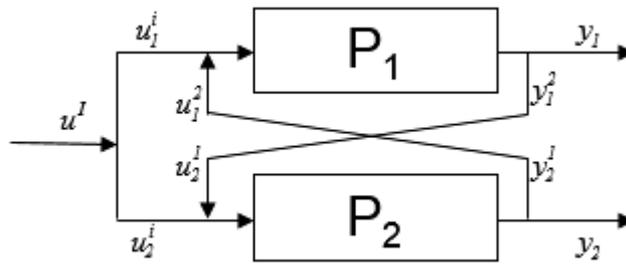


Figura 12: Associação mista complexa entre os pilotos P_1 e P_2 .

Os sinais oriundos do subsistema Entorno ambiental (E) chegam até o Piloto (P_1) e o Copiloto (P_2) por meio do subsistema Aeronave (A), pois a única forma de captação dos atributos pertinentes deste último é através de sensores da aeronave e instrumentos de voo tais como velocímetro, altímetro, termômetro do ar externo, medidor de ângulo de ataque, conforme mostrado pela linha tracejada que atravessa o subsistema Aeronave A no diagrama funcional (Figura 15).

3.3.2 Subsistema Aeronave (A)

O subsistema Aeronave é o avião ou helicóptero, propriamente dito. Máquina de construção mecânica, podendo ser dotada de diversos mecanismos de auto-regulação mecânicos, hidráulicos, pneumáticos ou eletroeletrônicos. A aeronave pode, por si só, ser analisada como um sistema, sendo decomposta em diversos subsistemas tais como: estrutura, grupo moto propulsor, comandos de voo, sistema de combustível, sistema elétrico, sistema de trem de pouso etc.

Em se tratando da análise do sistema sócio-técnico, o detalhamento da interação dos subsistemas internos ao subsistema aeronave, os quais não proveem saída para os demais subsistemas Pilotos e Entorno ambiental não seria benéfico. Tal detalhamento, ao invés de facilitar o entendimento da interação entre o Piloto (P_1) e copiloto (P_2) com a Aeronave (A) e com o Entorno ambiental (E), dificultaria o mesmo adicionando complicação a um sistema que já é complexo por sua própria natureza.

Nesta representação do subSistema de Voo, a Aeronave (A) vai ser caracterizada pelas entradas, recebidas do Piloto (P_1) e do Copiloto (P_2), bem como do Entorno ambiental (E). Sua saída principal também é a saída principal do sistema, qual seja o próprio movimento do conjunto $\{P_1, P_2, A, E\}$ através do Entorno ambiental (E). Outras saídas importantes representadas são os sinais enviados aos pilotos (P_1 e P_2) e a perturbação causada no Entorno ambiental (E).

3.3.3 Subsistema Entorno Ambiental (E)

Faz parte do pensamento sistêmico, e é um dos elementos teóricos da Teoria Geral dos Sistemas, o ambiente onde o sistema está inserido. Em um sistema aberto o ambiente é a origem das entradas para o sistema e o destino de suas saídas. Um lugar-comum na criação de um modelo sistêmico na aviação seria utilizar a interação piloto-aeronave como base de estabelecimento do modelo e considerar a atmosfera apenas como o ambiente onde o sistema formado pelos subsistemas piloto e aeronave está imerso.

A partir da Hipótese de Nave postulada nesta tese e tendo como motivação o ponto de vista do observador do sistema, conforme já descrito no Capítulo 3, nesse modelo que está sendo apresentado o Entorno ambiental foi incorporado como um subsistema componente do Sistema de Voo, ao invés de ser considerado apenas como parte do meio ambiente externo. Esta opção ocorreu devido à percepção de que os sinais de comando enviados pelo Piloto (P_1) e Copiloto (P_2) para a Aeronave (A) modificam sensivelmente a influência desta no próprio Entorno ambiental (E). Este por sua vez, interfere no movimento da Aeronave (A) e nos sinais desta para o Piloto (P_1) e Copiloto (P_2).

Um dos exemplos dessa influência mútua entre Aeronave e o Entorno ambiental é o fato de que, em um avião, o descolamento da camada limite das asas durante o fenômeno do estol provoca um fluxo de ar turbulento que atinge a superfície do comando de profundor, na cauda. Isto provoca um movimento de trepidação (*buffeting*) que é transmitido pela cadeia de comando até o manche dos pilotos, que percebem este movimento como um sinal da ocorrência do estol (Figura 13).

Esta interação na qual um estado da aeronave (ângulo de ataque elevado) gera uma saída (o descolamento da camada limite) para seu entorno ambiental, esta saída modifica o estado do entorno ambiental (a turbulência) e este, por sua vez, se torna uma nova entrada para a aeronave (*buffeting* do profundor) é uma interação mista complexa.

A Teoria Geral dos Sistemas estabelece que entre um sistema e seu ambiente externo há apenas a existência de entradas do ambiente para o sistema e saídas do sistema para o ambiente. A percepção de que entre a aeronave e os elementos contíguos do seu ambiente físico há uma associação mista complexa justifica a representação deste entorno ambiental como um subsistema (E) do Sistema de Voo.

Neste caso, adotar a representação dos elementos do ambiente contíguos à aeronave como um subsistema componente do Sistema de Voo possibilita a análise das inter-relações entre o subsistema Aeronave (A) e o subsistema Entorno ambiental (E) com maior clareza e robustez, como será mostrado na utilização do modelo na análise do estudo de caso.

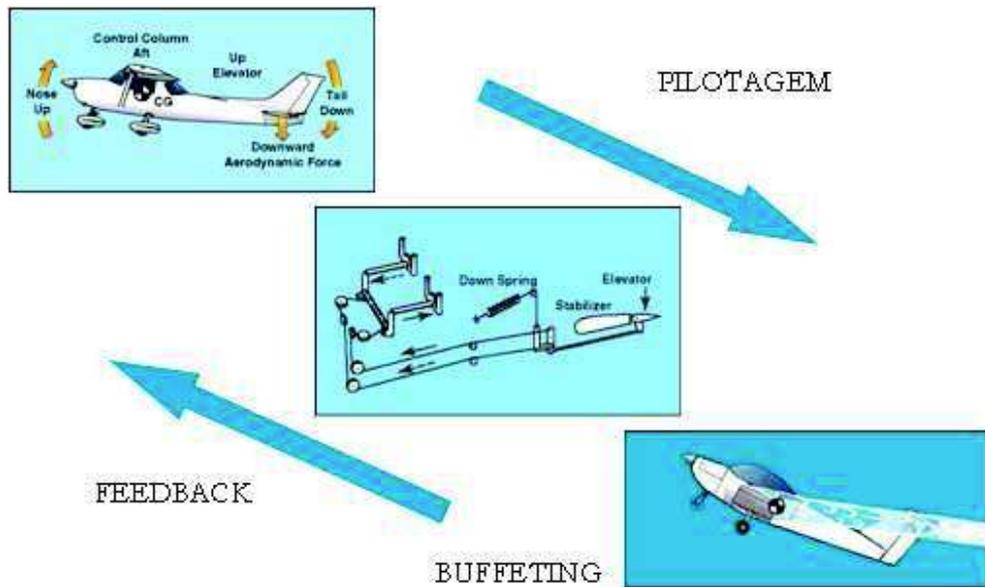


Figura 13: Exemplo de uma das formas de associação indireta entre o Entorno ambiental E e os pilotos P₁ e P₂ através da Aeronave A.

O diagrama representativo da associação entre o subsistema Aeronave (A) e o subsistema Entorno ambiental (E), na forma mista complexa é mostrado na Figura 14.

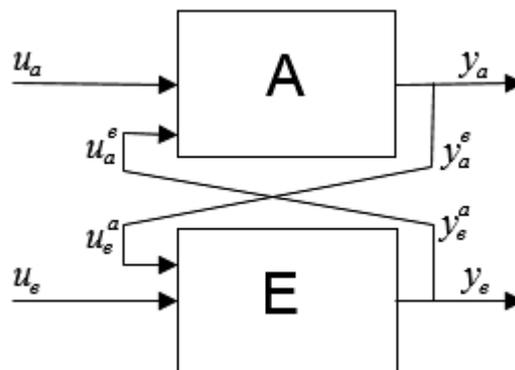


Figura 14: Associação mista complexa entre a Aeronave e o Entorno ambiental.

3.4 INTERFACES DE RESTRIÇÃO

As interfaces de restrição são as superfícies de contato entre os subsistemas em interação, servindo para moldar a estrutura do sistema e escolher os atributos mensuráveis pertinentes do fim para o qual o subsistema foi desenvolvido. As relações entre os subsistemas havidas nas interfaces podem ser representadas matematicamente por meio das equações de restrição, revelando as estruturas e os diferentes aspectos das interações do sistema.

As Interfaces definem os limites funcionais dos componentes do sistema. [...] Um fator importante na concepção das interfaces é a segurança, e análise de segurança deve ser uma parte da análise de interface do sistema. Porque as interfaces tendem a ser particularmente susceptíveis a erros de concepção e estão implicadas na maior parte dos acidentes, um objetivo primordial de projeto de interfaces é a simplicidade (LEVESON, 2002).

Para a análise sistêmica do conjunto e a determinação de suas interações, o conhecimento funcionamento interno de cada subsistema não é necessário, sendo cada um deles considerado uma “caixa preta”.

A constituição e estrutura da caixa são totalmente irrelevantes para a abordagem em questão, que é puramente externa ou fenomenológica. Em outras palavras, apenas o comportamento do sistema será explicado (BUNGE, 1963).

Os processos internos que regem a operação de cada subsistema é objeto de discussão das ciências específicas. Para o estabelecimento preciso das interfaces de restrição por meio das equações faz-se necessário caracterizar as entradas e saídas de todos os subsistemas componentes.

3.4.1 Caracterização dos Subsistemas Piloto (P_1) e Copiloto (P_2)

A caracterização de um subsistema é feita por meio da descrição de suas entradas e saídas, de forma consoante com a teoria da caixa preta. Assim, as entradas e saídas dos Subsistemas P_1 e P_2 são estabelecidas como:

u_1 = Entrada de P_1 (conjunto de informação, energia e recursos materiais recebido por P_1).

u_1^2 = Entrada de P_1 , vinda de P_2 (interações do copiloto com o piloto).

u_2 = Entrada de P₂ (conjunto de informação, energia e recursos materiais recebido por P₂).

u_2^I = Entrada de P₂, vinda de P₁ para P₂ (interações do piloto com o copiloto).

u_p^a = Movimento da aeronave (A) percebido pelos pilotos P₁ e P₂ através da observação direta de referências visuais exteriores (VFR).

u_{12}^a = Entrada de Informação, energia e recursos para os pilotos P₁ e P₂ vindas da aeronave (A). (Informações do painel sobre o movimento no espaço (IFR), funcionamento, instrumentos de navegação, aquecimento/ar condicionado, dados informatizados do FMS – *flight management system*, manuais e procedimentos existentes a bordo da aeronave, *check-lists*, etc).

u_{12}^{ea} = Entrada de informação a respeito do Entorno ambiental (E) obtida através dos sensores da aeronave (A) enviada aos pilotos P₁ e P₂ através dos instrumentos de voo (altímetro, indicador de velocidade, termômetro do ar externo, sensor de ângulo de ataque, etc.).

y_1 = Saída 1 de P₁ (conjunto de informação, energia e recursos materiais emitidos por P₁).

y_1^2 = Saída de P₁ direcionada para P₂ (conjunto de informação, energia e recursos materiais emitidos por P₁ para P₂).

y_2 = Saída de P₂ (conjunto de informação, energia e recursos materiais emitidos por P₂).

y_2^1 = Saída de P₂ direcionada para P₁ (conjunto de informação, energia e recursos materiais emitidos por P₂ para P₁).

3.4.2 Caracterização do Subsistema Aeronave (A)

As entradas e saídas do Subsistema A são estabelecidas como:

u_a^1 = Entrada de A vinda de P₁ (conjunto das ações de pilotagem de P₁, nos comandos de voo e nos equipamentos da aeronave).

u_a^2 = Entrada de A vinda de P₂ (conjunto das ações de pilotagem de P₂, nos comandos de voo e nos equipamentos da aeronave).

u_a^{ii} = Entrada de A equivalente à entrada do Sistema de Voo referente à aeronave.

u_a^e = Entrada de A relativa ao Entorno ambiental (E). Refere-se tanto à informação a respeito do Entorno ambiental (E) obtida através dos sensores da aeronave (A) quanto aos efeitos do mesmo sobre a aeronave (A).

y_a^l = Saída 1 de A. Representa o próprio movimento da aeronave durante o voo e demais efeitos deste movimento.

y_a^e = Saída de A para E. Representa a influência da aeronave no escoamento do entorno ambiental.

y_a^p = Saída de A para os pilotos P₁ e P₂, representando o movimento da aeronave que deveria ser percebido pelos pilotos para efetuar a pilotagem em condições de voo visual (VFR).

y_a^{l2} = Saída de A para os pilotos P₁ e P₂. (Conjunto de informação, energia e recursos materiais disponibilizados pela aeronave para os pilotos - inclui todas as informações disponíveis para os pilotos na cabine de pilotagem para o voo por instrumentos - IFR).

y_{ae}^{l2} = Saída de A relativa ao Entorno ambiental (E) para os pilotos P₁ e P₂. Refere-se à informação do Entorno ambiental (E) obtida através dos sensores da aeronave (A) e mostrada para os pilotos através de instrumentos no painel da cabine, alarmes luminosos e sonoros.

3.4.3 Caracterização do Subsistema Entorno Ambiental (E)

As entradas e saídas do Subsistema E são estabelecidas como:

u_e^{iii} = Entrada de E equivalente à entrada do Sistema de Voo referente ao Entorno ambiental.

u_e^a = Entrada de E vinda de A. Equivale à influência da aeronave sobre o comportamento do Entorno ambiental.

y_e^l = Saída 1 do Subsistema E. Representa o movimento resultante no Entorno ambiental considerando todas as influências recebidas e sua própria natureza física. Inclui a turbulência gerada pela passagem da aeronave e os gases por ela emitidos.

y_e^a = Saída de E para A. Significa o conjunto de todas as influências do Entorno ambiental sobre o comportamento da aeronave.

3.5 VARIÁVEIS DE ESTADO DOS SUBSISTEMAS COMPONENTES

Considerando-se um sistema dinâmico, não há como determinar de forma inequívoca a saída do sistema no tempo baseado unicamente na última entrada realizada. Isto ocorre porque entradas passadas podem ter alterado o sistema, as suas capacidades internas ou sua preparação, influenciando nas saídas futuras. Ou seja, a saída do sistema depende, em geral, da entrada presente no tempo e da sua história passada, ou seja, o estado do sistema.

Pereira et al. (1991) definem que “o estado (atual) de um sistema pode ser definido como: a parte da história presente e passada desse sistema que é relevante para a determinação das suas saídas presentes e futuras”. Este estado é um certo atrito interno do sistema, em um instante determinado no tempo, que determina a saída presente ou atual e afeta as saídas futuras.

A variável de estado de um sistema pode ser expressa como conjunto multidimensional determinado composto pelas variáveis dos subsistemas componentes. Desta forma, define-se a Equação da variável de estado X do Sistema de Voo como sendo o conjunto das variáveis de estado dos subsistemas P_1 , P_2 , A e E (Quadro 2).

Quadro 2: Variável de Estado do Sistema de Voo.

$$X(t) = [xP_1, xP_2, xA, xE | t]$$

As variáveis de estado xP_1 e xP_2 , são de natureza humana e compreendem todos os estímulos cognitivos, emocionais e físicos que os pilotos receberam em sua história que possam alterar a resposta de saída dos mesmos, enquanto subsistema componente, a uma determinada entrada recebida.

A variável de estado xA , relativa à aeronave, é de natureza física e corresponde a todas as características do projeto com as alterações provocadas pela passagem do tempo, as intervenções de manutenção e as modificações do projeto. Também inclui todas as cargas armazenadas, combustível, fluidos e gases, bem como o conteúdo lógico dos computadores de bordo e sensores.

A variável de estado x_E , relativo ao entorno ambiental é de natureza física relativa a mecânica dos fluidos e traduz a forma do escoamento. Inclui parâmetros como ângulo de ataque e derrapagem, velocidade relativa à aeronave, temperatura do ar, pressão, densidade, composição química e forma de escoamento, se perturbado ou não perturbado, linear ou turbulento.

3.6 DIAGRAMA FUNCIONAL

Para a elaboração do modelo conceitual simbólico representativo do SISTEMA DE VOO, é necessário construir uma estrutura na qual a relação entre os subsistemas componentes represente as interfaces de restrição já descritas. Com isso é possível construir o diagrama funcional representativo do sistema em sua forma gráfica, com o uso da notação de Venikoff.

O entendimento da dinâmica destas interações complexas pode ser utilizado para explicar e descrever eventos causadores de acidentes aéreos como a perda do controle em voo. Tal utilidade, por si só, já é suficiente para justificar esta forma de construção do modelo. A união dos subsistemas leva à construção do seguinte Diagrama Funcional representativo do Sistema de Voo (Figura 15).

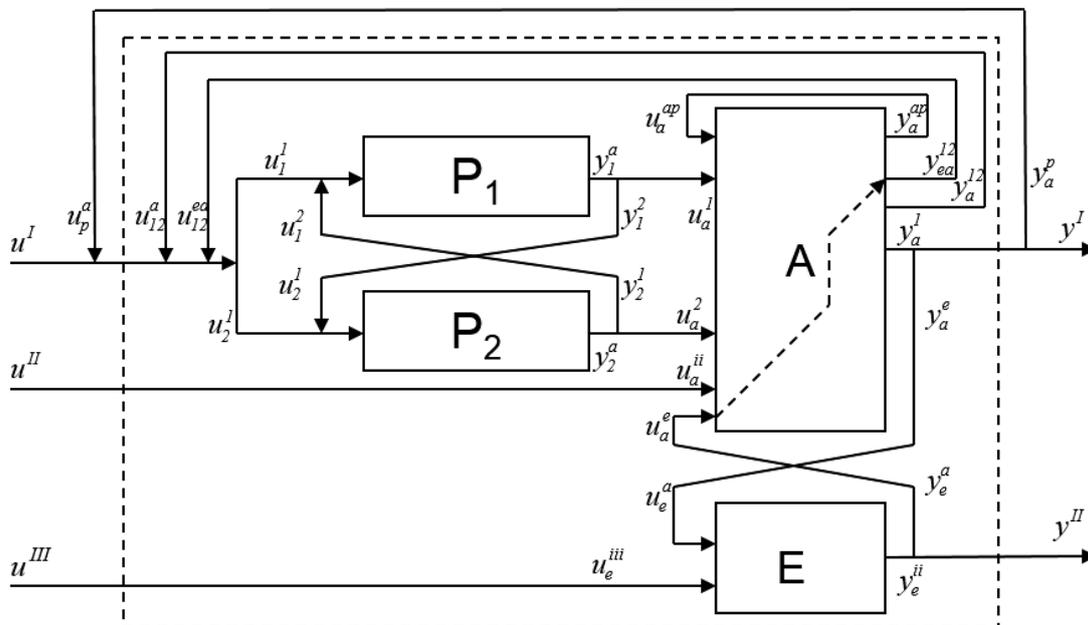


Figura 15: Diagrama funcional do Sistema de Voo.

As entradas do Sistema de Voo são os conjuntos de informação, energia e recursos materiais vindos do ambiente externo ao sistema.

u^I = Entrada 1 do Sistema de Voo referente aos pilotos (ordens operacionais, observação de outras aeronaves em voo, orientações dos órgãos de controle de tráfego aéreo, interferências dos passageiros, problemas com a carga transportada, visibilidade, etc);

u^{II} = Entrada 2 do Sistema de Voo referente à aeronave (combustível, ações de manutenção, distribuição da carga e dos passageiros, impacto de ave, formação de gelo, impacto de granizo, cinzas vulcânicas, etc);

u^{III} = Entrada 3 do Sistema de Voo referente ao entorno ambiental (condições atmosféricas, esteira de turbulência de outras aeronaves, correntes de ar ascendentes e descendentes, vento, pressão barométrica, regiões de ar aquecido junto à plantas industriais e plataformas de petróleo, etc).

As saídas do Sistema de Voo são os conjuntos de informação, energia e matéria originados do sistema e que são passados para o ambiente externo ao sistema.

y^I = Saída 1 do Sistema de Voo. Representa o próprio voo do sistema e seu movimento através do espaço aéreo realizando transporte de passageiros e carga. Também fazem parte desse conjunto, as transmissões de rádio e todas as demais coisas oriundas da aeronave ou dos pilotos.

y^{II} = Saída 2 do Sistema de Voo. Representa a turbulência residual provocada pela passagem da aeronave através do espaço aéreo bem como os gases de exaustão. Representa as saídas do Sistema de Voo oriundas do subsistema Entorno ambiental E.

As entradas e saídas do Sistema de Voo são mostradas na Figura 16.

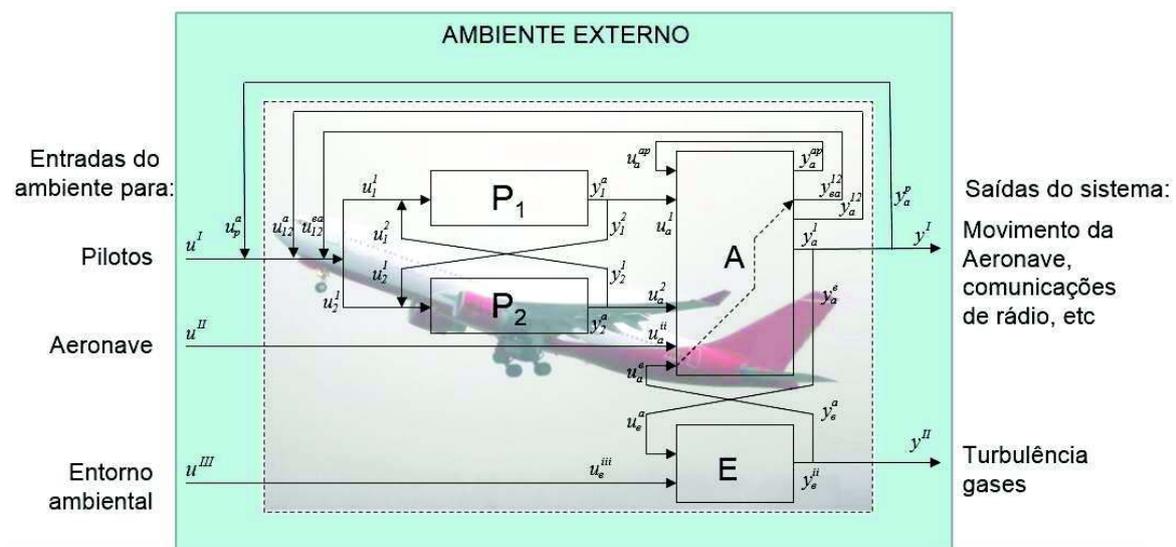


Figura 16: Diagrama funcional do Sistema de Voo em relação ao ambiente externo.

No Sistema de Voo, tal como está definido, as seguintes Equações de restrição definem a relação entre os subsistemas considerados (Quadro 3).

Quadro 3: Equações de restrição

$u_1^1 = u^I + u_p^h + u_{12}^h + u_{12}^{hf} + u_1^{2-1}$	(I)
$u_2^1 = u^I + u_p^h + u_{12}^h + u_{12}^{hf} + u_2^{1-2}$	(II)
$y_1^1 = y_1^{1-2} + u_h^1$	(III)
$y_2^1 = y_2^{2-1} + u_h^2$	(IV)
$y_1^{1-2} = u_2^{1-2}$	(V)
$y_2^{2-1} = u_1^{2-1}$	(VI)
$u^{II} = u_h^3$	(VII)
$y_{hf}^{12} = u_{12}^{hf}$	(VIII)
$y_h^{12} = u_{12}^h$	(IX)
$y_h^1 = y_h^p + y^I$	(X)
$y_h^f = u_f^h$	(XI)
$u^{III} = u_f^1$	(XII)
$y_f^1 = y_f^h + y^{II}$	(XIII)
$y_f^h = u_h^f$	(XIV)
$u_h^f \sim y_{hf}^{12}$	(XV)

O conjunto do total de informação, energia e recursos recebidos pelos pilotos estão representados nas Equações (I) e (II).

Todas as ações dos pilotos em voo, sejam as ações de pilotagem e sobre todos os tipos de comandos existentes ou ações sobre o outro piloto, são representadas pelas Equações (III) e (IV).

A relação entre os subsistemas P₁ e P₂, ou seja, entre os pilotos, é estudada no contexto da psicologia da aviação. Questões como comunicação, relação interpessoal e divisão de tarefas aparecem no diagrama funcional como as linhas de ligação entre P₁ e P₂ e são representados nas Equações de restrição (V) e (VI).

As ações de manutenção recebidas pela aeronave estão representadas na Equação (VII). As influências meteorológicas ao entorno ambiental, como turbulências e formação de gelo estão na Equação (XII).

A relação entre os subsistemas A e E, ou seja, entre a aeronave e o entorno ambiental é estudada no contexto da engenharia aeronáutica, estando representada nas Equações (XI) e (XIV).

Os instrumentos de voo, também estudados pela engenharia aeronáutica estão no subsistema A, porém existem para efetuar a medida dos parâmetros do subsistema E e transmiti-los para os pilotos, P1 e P2. Isto está representado nas Equações (VIII), (XI) e (XV).

3.7 METODOLOGIA DE APLICAÇÃO DO MODELO

A metodologia proposta para aplicação do modelo pelos investigadores de acidentes é estabelecida de forma objetiva em seis etapas assim descritas:

- 1) Investigar do acidente utilizando a metodologia específica de cada uma das áreas científicas envolvidas;
- 2) Listar dos fatos descobertos em cada uma das áreas da investigação;
- 3) Classificar os fatos descobertos de acordo com a sua relação com as variáveis de estado dos subsistemas Aeronave, Piloto 1 e 2, e Entorno ambiental;
- 4) Identificar as inter-relações entre os estados dos subsistemas e as entradas e saídas dos mesmos com uso das equações de restrição;
- 5) Utilizar o diagrama funcional para evidenciar a sucessão de eventos que levou ao acidente, correlacionando as descobertas de todas as áreas científicas distintas;
- 6) Analisar os resultados da aplicação do modelo em conjunto por todos os envolvidos.

A adoção integral das seis etapas propostas permite a participação de todos os envolvidos na investigação. A confecção de um modelo único que comporte todas as descobertas feitas pela equipe visa proporcionar interação entre os especialistas das diversas áreas científicas distintas, permitindo a troca de informações e a melhor compreensão das inter-relações que contribuíram para o acidente.

4 COMPARAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DO MODELO PERANTE OS MODELOS PREEXISTENTES

4 COMPARAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DO MODELO PERANTE OS MODELOS PREEXISTENTES

O modelo do Sistema de Voo, tal como está concebido, visa a suprir a necessidade de um modelo que atenda à investigação de acidentes aeronáuticos decorrentes da perda de controle de voo. A comparação do modelo criado com os modelos já existentes tem por objetivo diferenciá-lo, ressaltando a sua utilidade e suas características específicas.

Pela Teoria Geral dos Sistemas, uma das características intrínsecas ao conceito de sistema é possuir um objetivo predefinido, ou seja, sistemas são teleológicos (BERTALANFFY, 1968). Sempre que o sistema está chegando ao seu objetivo previsto, o mesmo encontra-se em uma situação operacional normal. Tudo está ocorrendo da forma como deveria e a saída final do sistema está dentro do intervalo de variações projetado no desenho do sistema.

A teoria dos acidentes normais (PERROW, 1984) postula que os acidentes são apenas um subconjunto dentro do conjunto “teleológico” de saídas “normais” de um sistema. A complexidade inerente à interação dos subsistemas componentes gera, eventualmente, uma saída final do sistema fora do intervalo de variação desejado. Essas saídas, que antes da teoria de Perrow eram consideradas “anormais”, são chamadas de ocorrências, incidentes, acidentes e outras denominações semelhantes.

A estrutura de todo sistema é definida pelos subsistemas e as suas inter-relações. Uma característica inerente a qualquer subsistema é a sua variável de estado e uma característica inerente à inter-relação entre subsistemas é a Equação de restrição. Desta forma, estas duas características básicas do modelo formam a base de comparação com os outros modelos: as equações de restrição e as variáveis de estado.

As equações de restrição representam a relação entre dois subsistemas componentes. Ela representa a relação entre a saída de um subsistema e a entrada no subsistema seguinte. Caso, em uma interação entre dois dos subsistemas componentes do Sistema de Voo, houver uma diferença entre a saída de um subsistema e a entrada no subsistema seguinte, esta diferença é relatada como sendo uma “desigualdade” na Equação de restrição que define a relação entre esses dois subsistemas.

As desigualdades nestas equações são analisadas no contexto de um acidente, comparando os seus significados no modelo de Sistema de Voo proposto com conceitos semelhantes presentes em outros modelos de investigação de acidentes, notadamente os erros ativos do modelo do queijo suíço de Reason.

O estado do sistema é o conjunto de entradas passadas e presentes que interferem na saída atual do sistema. As variáveis de estado representam o estado interno de cada um dos subsistemas componentes. Este estado influencia a relação entre a entrada do subsistema e a sua saída. A comparação dos efeitos desta carga histórica acumulada em um subsistema na saída do sistema como um todo é correlacionada com os erros latentes da teoria de Reason.

Esta análise não pretende ser exaustiva, ao contrário, visa a exemplificar as características do modelo proposto, deixando margens para outras análises interpretativas posteriores.

4.1 DESIGUALDADES NAS EQUAÇÕES DE RESTRIÇÃO E AS FALHAS ATIVAS

Uma equação de restrição representa, no modelo do sistema, a forma de interação entre dois subsistemas. Todo modelo de sistema é desenhado de forma que a saída de um subsistema deve, por restrição definida na concepção do sistema, ser igual à entrada no subsistema ao qual está conectado. Se aquilo que deveria ser igual na concepção do sistema, não o for durante a prática do funcionamento do sistema, afirma-se que houve uma “desigualdade” na equação de restrição que representa a interface entre os subsistemas.

Uma “desigualdade” em uma equação de restrição durante a operação do sistema significa que houve uma alteração entre a saída de um subsistema e a entrada no subsistema seguinte. Esta alteração pode ser considerada como sendo um ruído de comunicação, uma falha na entrada de dados ou um erro de interpretação, no caso de um subsistema composto por seres humanos. Os casos a seguir não pretendem esgotar o assunto, mas servir como exemplos.

4.1.1 Defeitos nos sensores ou equipamentos embarcados

Toda aeronave possui diversos sensores que mensuram dados do entorno

ambiental. Velocímetro, altímetro e indicador de velocidade vertical são exemplos de sensores presentes em quase a totalidade das aeronaves, excetuando-se apenas as mais simples e primitivas. A utilização original destes dados servia para que, por meio da sua leitura, os pilotos pudessem agir como os elementos de controle do sistema.

Desta forma, caso os parâmetros de velocidade, altitude ou razão de subida ou descida se tornassem diferentes do requerido para a fase do voo, os pilotos poderiam atuar nos controles aerodinâmicos da aeronave e do sistema motopropulsor, corrigindo a trajetória do voo para mantê-la dentro do padrão desejado.

Em aviões mais modernos, onde o controle por retroação é realizado também de forma automática, o piloto automático caso esteja em funcionamento (engajado) utiliza dados de sensores semelhantes para realizar a sua função.

Se ocorrer um mau funcionamento de um sensor, por defeito mecânico, elétrico, de software ou por características da própria interação entre o entorno ambiental e o sensor, poderá haver uma desigualdade na equação de restrição, onde o valor do dado medido vai ser diferente do valor real existente no Entorno ambiental (Figura 17).

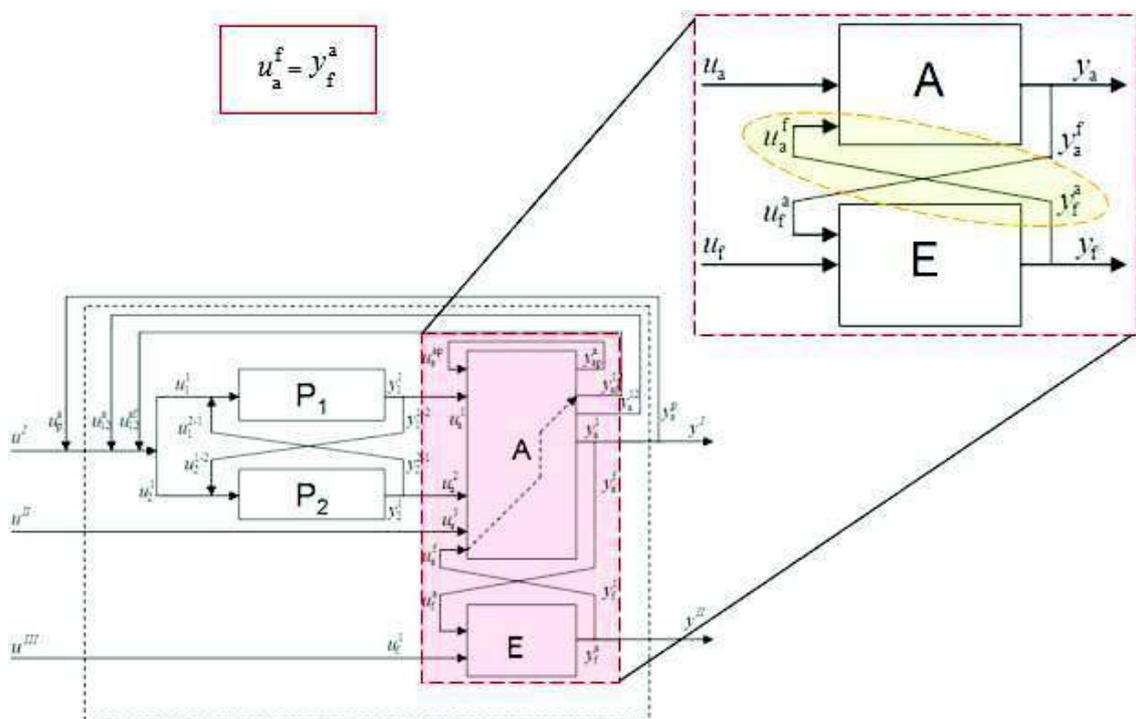


Figura 17: Representação da funcionalidade dos sensores embarcados, especificamente dos sensores que medem dados do entorno ambiental.

Um dos exemplos que pode ser citado é o congelamento do tubo de *pitot* dos aviões e helicópteros. O tubo de *pitot* atua em conjunto com as tomadas de pressão estáticas para permitir a medição da pressão total do escoamento e, a partir dela, a medição da velocidade de uma aeronave através do ar. Esta velocidade é um dos parâmetros que compõe a variável de estado do Entorno ambiental (E). Outros parâmetros são a temperatura, a umidade e a pressão “atmosférica” (estática), a densidade do ar, a existência e qualidade de partículas em suspensão, entre outros.

Ocorre que em determinados estados do Entorno ambiental (E), a passagem do ar pelo tubo de *pitot* pode causar formação de gelo no interior do tubo, causando com isso o estreitamento do tubo por acúmulo de gelo nas paredes interiores e alterando a medição do valor da velocidade.

De forma diferente, uma ação de manutenção mal feita pode alterar as condições do tubo de *pitot*, por exemplo, se durante a limpeza da aeronave alguma impureza, como sabão, óleo lubrificante ou cera, entrar no interior do tubo este pode sofrer estreitamento de sua seção reta interior, também alterando a medição da velocidade. Ou alguma ferramenta pode bater contra o sensor, amassando-o e causando resultado semelhante.

Nestes dois exemplos acima, a equação de restrição sofreu uma desigualdade. No primeiro, o estado do Entorno ambiental E, qual seja a combinação de temperatura, pressão e umidade, provocou a alteração através da formação de gelo. No segundo exemplo a desigualdade foi provocada devido ao estado da aeronave A. Um defeito introduzido no equipamento (que é um componente do subsistema aeronave) alterou seu estado, gerando a desigualdade na equação do modelo, representando no sistema real, a medição errada da velocidade.

No modelo de queijo suíço, de Reason, a ação de manutenção que provocou o defeito ou contaminação do tubo de *pitot*, seria um erro ativo. O erro de treinamento ou de procedimento que causou a ação de manutenção errônea seria um erro latente. No modelo proposto, a ação de manutenção errônea é uma entrada passada (u^H) do subsistema aeronave A, que provocou uma alteração na sua variável de estado (x_a). Esta alteração na variável de estado gerou uma desigualdade na equação de restrição entre os subsistemas A e E.

No outro exemplo, as condições de temperatura, umidade e pressão são entradas passadas do subsistema E (u^{III}), que geraram alteração na variável de estado do subsistema E (x_e). Esta alteração provocou a desigualdade na equação de restrição entre os subsistemas A e F, representando o congelamento do *pitot* e a medição errônea da velocidade

4.1.2 Erros de pilotagem, requisitos, normas e procedimentos

Conforme descrito anteriormente, o piloto de uma aeronave é o mecanismo de controle por retroação do sistema. A pilotagem consiste basicamente em observar a trajetória da aeronave e atuar sobre os controles da mesma de forma a fazer com que a aeronave mantenha ou altere a sua trajetória conforme a vontade do piloto.

Obviamente que esta descrição realiza um reducionismo radical nas atividades de um piloto antes, durante e após qualquer voo. Normalmente também fazem parte das atividades do piloto controlar subsistemas e componentes pertencentes à aeronave. Pilotos atuam para controlar e corrigir temperaturas excessivas nos motores, pressões de óleo muito altas ou muito baixas, parâmetros de pressão atmosférica de cabine em aviões pressurizados etc. Porém, todas estas atividades poderiam ser realizadas ou por um elemento “não-piloto”, como um mecânico ou engenheiro de voo ou, nas aeronaves mais modernas, por controles automáticos.

A atividade de pilotagem, em si, consiste em conduzir a aeronave: literalmente pilotá-la, através de uma trajetória desejada. Pode-se realizar a pilotagem de uma aeronave tripulada de três formas: em voo visual, voo por instrumentos ou por meio de sistemas automáticos.

Na pilotagem visual, o *loop* de controle ocorre da seguinte forma: o piloto devidamente posicionado na cabine olha para o espaço aéreo e, observando a posição relativa da aeronave em relação à referência básica de atitude, que é a linha do horizonte, atua nos controles da aeronave.

No voo por instrumentos, por não haver visibilidade externa, o piloto utiliza o indicador de atitude (horizonte artificial) instalado no painel para saber a atitude da aeronave e, conforme esta atitude esteja de acordo ou não com o requerido, ele atua nos controles da aeronave para mantê-la ou corrigi-la.

No diagrama funcional, a trajetória da aeronave é representada pela saída y_a . A saída y_a^p , que passa por fora da linha tracejada que encapsula o sistema e a entrada u_p^a que chega aos pilotos também por fora da linha tracejada representa o *loop* de pilotagem visual (Figura 18). Por utilizar referência externa ao sistema, o diagrama representa esta interface de restrição por uma linha externa à “cápsula” da nave. Para representar a pilotagem por instrumentos, existe no diagrama outra linha, interna à cápsula, ligando a saída y_a^{12} à entrada u_{12}^a , de forma interna ao tracejado que delimita a cápsula da nave.

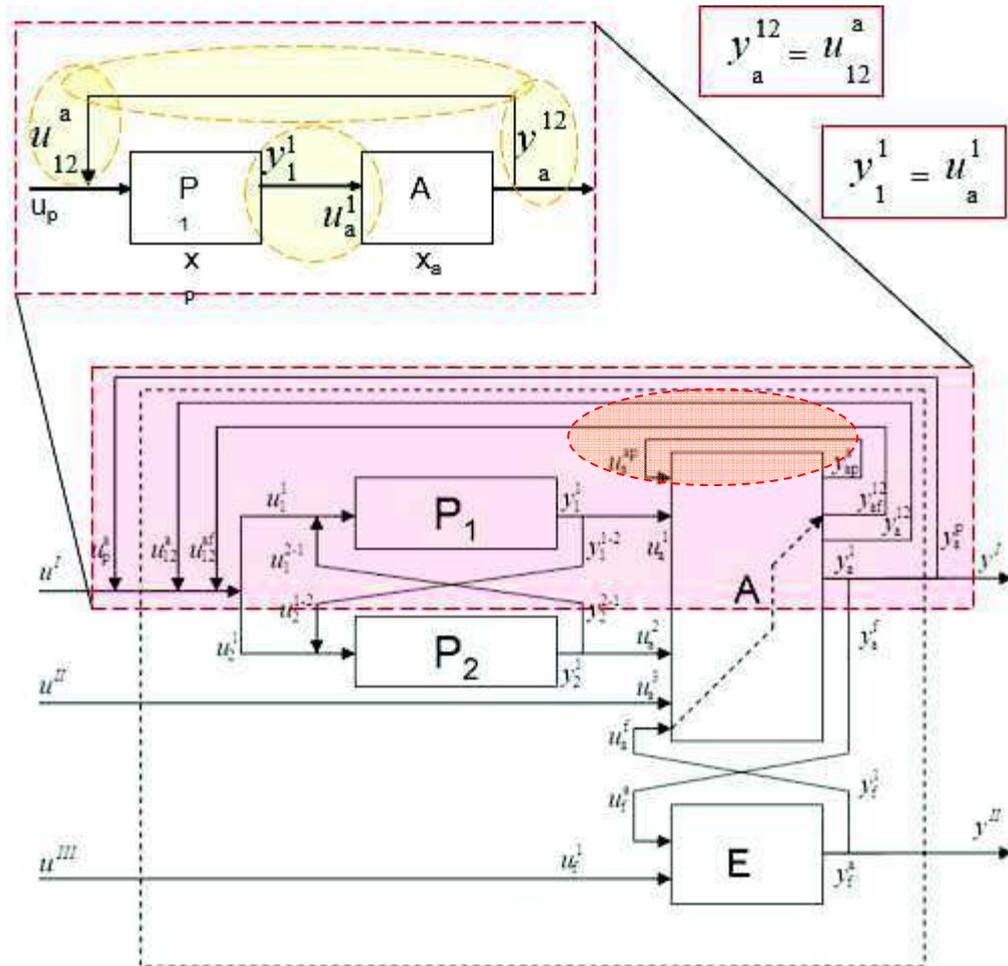
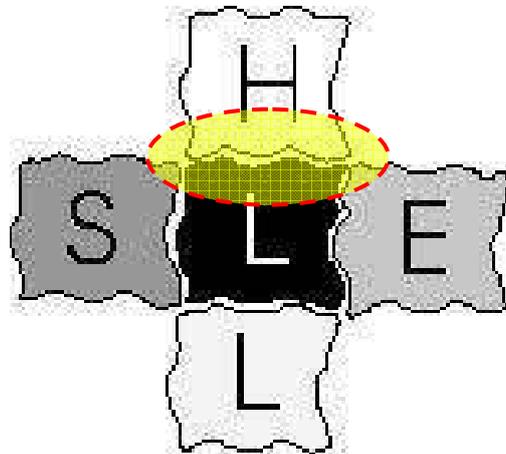


Figura 18: No excerto maior o *loop* de controle manual (pilotos em voo visual ou por instrumentos) e na elipse o *loop* de controle por piloto automático.

É interessante notar que, por estar interna à cápsula e utilizar recursos da aeronave para permitir a observação da trajetória, a saída y_a^{12} não necessariamente é igual à saída y_a^p . Um defeito no horizonte artificial ou uma falha elétrica podem alterar o instrumento, o que pode introduzir uma entrada espúria no *loop* de controle, induzindo ações errôneas de pilotagem.

O controle por retroação ocorre, então, por meio de duas equações de restrição, uma da trajetória para os pilotos e outra destes para a aeronave. As ações do subsistema piloto para controlar a aeronave dependem da entrada recebida (a percepção da trajetória atual da aeronave) e da variável de estado do subsistema piloto. Este histórico de entradas passadas remonta às aulas teóricas de aerodinâmica e pilotagem e todos os voos anteriores, inclusive os de instrução aérea recebida, além de todos os demais aspectos da personalidade que possam alterar a saída deste subsistema humano.

No modelo SHELL, a interface de qualquer um dos pilotos com a aeronave é representada, genericamente, pelo binário *Liveware-Hardware* (Figura 19). A borda irregular entre os dois subsistemas significa que o intercâmbio de informação entre estes dois subsistemas nem sempre é perfeita.



H = *Hardware* (máquinas, ferramentas, sinais)
L = *Liveware* (operador, piloto, controlador, mecânico)

Figura 19: Interação piloto – aeronave mostrada no Modelo SHELL.

A comparação da representação da interação entre os subsistemas P e A (piloto e aeronave) do modelo SHELL com o modelo construído nesta tese mostra diretamente o quanto a primeira é inespecífica e imprecisa e a segunda pode ser detalhada com precisão.

O modelo STAMP (LEVESON, 2004), considera que o controle sobre o processo físico é realizado pelos controladores humanos através de um controle automatizado. Esse controle automatizado utiliza atuadores que interferem no processo físico controlado e sensores verificam as mudanças no processo, retroalimentando o controle automatizado. Os controladores humanos têm atuação direta nos controles automatizados e indireta nos atuadores e sensores do sistema (Figura 20).

Este processo operacional, no modelo STAMP, é apenas o nível inferior do controle sócio-técnico mais amplo, que se inicia na legislação nacional e desce por vários níveis até os procedimentos operacionais disponíveis para os controladores humanos.

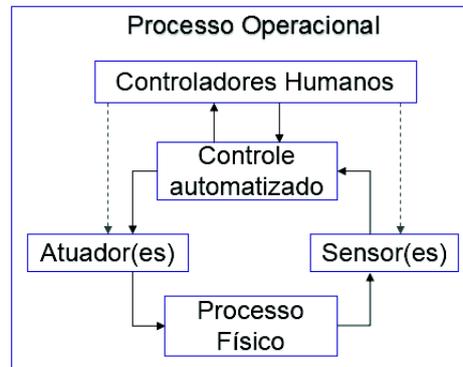


Figura 20: Controle do processo operacional no modelo STAMP (adaptado de LEVESON, 2004).

4.1.3 Falhas no gerenciamento dos recursos de tripulação

Com exceção das aeronaves *monoplace*, tais como aviões militares de caça, de competição acrobática e de pulverização agrícola, a maioria das aeronaves possui tripulação mínima de dois pilotos. A opção por criar o modelo contendo dois pilotos partiu do objetivo de realizar o mapeamento mais complexo, pois para modelar uma aeronave *monoplace* basta omitir o subsistema P₂, que representa o segundo piloto: copiloto, segundo em comando, primeiro oficial ou instrutor de voo.

O modelo considera que há dois pilotos na cabine, e ambos dispõem de acesso aos controles, podendo pilotar a aeronave e selecionar os controles da mesma. Em um voo normal, a carga de trabalho na cabine é dividida entre ambos os pilotos e as tarefas realizadas por ambos são complementares e, em quase a totalidade dos casos, intercambiáveis.

A atual técnica de gerenciamento de recursos de tripulação (*crew resource management*) prevê que ambos os pilotos interajam de forma coordenada e sinérgica, tanto em condição normal de voo quanto durante uma emergência. As funções são divididas de forma que um dos pilotos seja o *Pilot at controls* (PAC) e o outro seja o *pilot monitoring* (PM), de forma intercambiável.

Para exemplificar, uma forma comum de divisão de tarefas é o PAC atuar nos comandos de voo e realizar todas as ações que alterem a trajetória da aeronave, como efetuar seleções de altitude, velocidade e rota no sistema de piloto automático. Enquanto isso o PM efetua as comunicações com os órgãos de controle pelo rádio, controla os subsistemas da aeronave e monitora as ações do PAC enquanto este atua nos comandos de voo, observando as reações da aeronave (Figura 21).

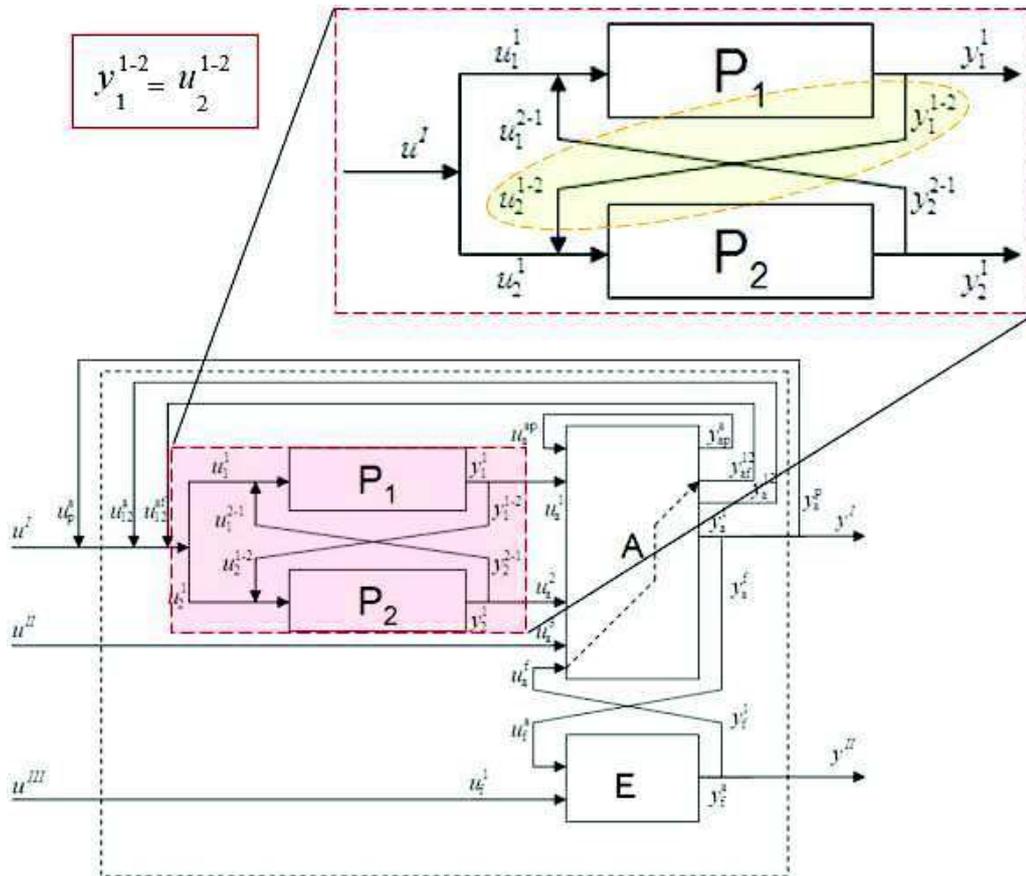


Figura 21: Interação dos pilotos entre si. Em destaque a saída do P₁ e a entrada de P₂, constrangidas à igualdade. Esta equação representa que as ações do *pilot at controls* são corretamente monitoradas pelo *pilot monitoring*.

No modelo criado, tanto o P₁ quanto o P₂ podem estar nas funções de *pilot at controls* ou *pilot monitoring*, dependendo do momento do voo. No funcionamento adequado do sistema, as ações de cada um dos pilotos sobre a aeronave e as comunicações dos pilotos entre si ocorrem de maneira que as equações de restrição estejam em igualdade.

Se na dinâmica do voo as ações de um piloto não correspondem à percepção dessas mesmas ações pelo outro piloto, ocorrerá uma desigualdade na equação de

restrição. Por exemplo simples: numa situação em que P_2 está na função de *pilot monitoring* e o mesmo recebe do controle de tráfego aéreo uma informação via rádio para curvar a esquerda, ele informa ao P_1 , que está nos comandos, e o P_1 vira para a direita, houve uma desigualdade na equação de restrição que modela as saídas de P_2 para P_1 .

No modelo STAMP (LEPLAT, 1987, apud LEVESON, 2004), é considerado que os dois tipos de problema de coordenação que podem ocorrer no controle de um processo são causados por áreas limítrofes no processo a ser controlado ou pela existência de controles sobrepostos (Figura 22).

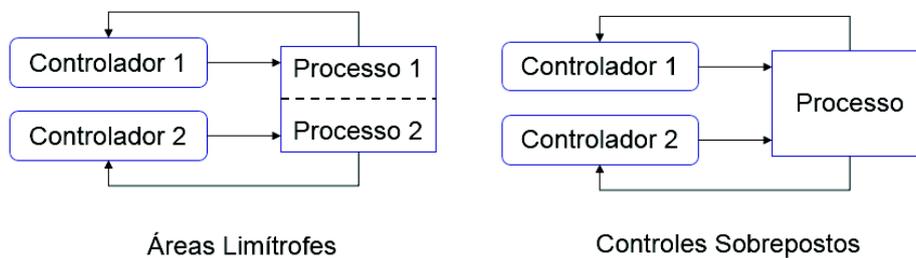


Figura 22: Dois tipos de problemas de coordenação (adaptado de LEVESON, 2004).

Da mesma forma que no exemplo anterior, o modelo SHELL mostra a interação entre os pilotos apenas pela interface irregular entre L e L, representando *Liveware* e *Liveware*, ambos os pilotos, de forma inespecífica. Pela teoria de Reason, seguindo o modelo de queijo suíço, o erro nas comunicações entre os pilotos seria um erro ativo, e estaria representado como um furo na penúltima camada do diagrama. Caso a última camada, de filtros e bloqueios, fosse também ineficaz, o acidente ocorreria pela trajetória do alinhamento entre os furos.

4.2 ESTADO DOS SUBSISTEMAS E AS CONDIÇÕES LATENTES

As variáveis de estado são a representação do conjunto de entradas presentes e futuras que alteram a saída de um sistema em face de uma determinada entrada (KALMAN; FALB; ARDIB, 1969; LIN; CHENG, 1998). Isto significa que um sistema pode não produzir apenas uma saída específica para cada entrada discreta, mas apresentar mais de uma alternativa possível de saídas para aquela mesma entrada, dependendo do seu estado.

Considerando a já citada teoria dos acidentes normais (PERROW, 1984),

dentro do conjunto de saídas possíveis existem as saídas “esperadas” e uma fração de saídas consideradas “indesejadas”. Observando os subsistemas componentes do Sistema de Voo proposto, é possível perceber que o estado de um ou mais subsistemas componentes pode provocar o surgimento das saídas indesejadas, causando acidentes.

4.2.1 O subsistema aeronave e os erros latentes de projeto e manutenção

O projeto de uma aeronave é desenvolvido, testado e certificado para garantir a máxima segurança possível dentro do conhecimento técnico-científico disponível. Mesmo assim, o projeto pode conter dois tipos de falhas latentes, um erro de projeto que tenha passado despercebido por todo o processo de certificação, e para o qual já existe conhecimento a respeito; ou uma característica sobre a qual ainda não se sabe o grau de periculosidade e que, a despeito de toda a ciência disponível, apenas no futuro revelar-se-á com algum grau de perigo.

O primeiro exemplo refere-se aos casos de erros comuns de projeto, no qual itens são subdimensionados em alguma característica. A falha de um item por subdimensionamento revela a falha em cascata, também, do projeto e da certificação, a qual não foi suficiente para perceber o erro e determinar a sua correção. Caso a característica seja grave a ponto de contribuir para um acidente, a identificação de sua inadequação ensejará a correção do projeto para que se adeque aos critérios de certificação já existentes.

O segundo exemplo dificilmente será considerado um erro, mas a ausência de um conhecimento que está além da tecnologia disponível no campo da engenharia aeronáutica. A descoberta de uma condição latente ligada ao projeto, nesta situação, é um avanço da ciência e da tecnologia, que incorporará esta nova informação nos projetos subsequentes.

Um exemplo deste caso pode ser extraído do acidente com uma aeronave da Esquadrilha da Fumaça, cuja asa entrou em condição de ressonância aeroelástica (*flutter*) e se partiu durante uma apresentação ao público em Santos-SP no ano de 1996. A investigação descobriu que a peça que realizava a junção das duas asas, sob a fuselagem do avião, havia sido projetada e confeccionada com uma nova liga metálica, considerada mais resistente e mais leve. O dado novo, levantado pela investigação, é que o acabamento desta peça no processo de fabricação (polimento) a tornou menos

resistente à fadiga do que se supunha e, esta fadiga inesperada provocou a quebra da peça (CENIPA, 1997). Como resultado da investigação houve o reforço daquele ponto da estrutura em toda a frota de aeronaves T-27 ao redor do mundo e a publicação de estudos sobre a fadiga de peças confeccionadas com o tipo de polimento em questão.

Nas duas situações citadas acima, uma condição introduzida no projeto da aeronave permanece latente até que sua combinação com outras situações mostre seu potencial de perigo. No modelo do Sistema de Voo criado, esta condição é uma entrada passada recebida no subsistema aeronave (A) a qual altera o estado do subsistema. Ao receber um determinado conjunto de entradas a influência da variável de estado pode fazer com que o subsistema apresente uma saída indesejada.

No caso do avião da Fumaça, para o comando do piloto ao puxar o manche aplicando carga G vertical na aeronave, a saída esperada era uma manobra de *looping* vertical, para a apreciação do público. Com a alteração provocada pela variável de estado (x_a), a saída para a mesma entrada foi o desprendimento da asa seguida de uma trajetória descendente até a colisão na água. A variável de estado x_a é a representação, no modelo, da característica introduzida no projeto pelo processo de polimento que gerou a fadiga precoce e pela própria passagem do tempo, ambas representadas pela entrada U^{II} .

A passagem do tempo é uma entrada constante para o subsistema aeronave. Esta entrada provoca a alteração gradual das características originais do projeto, sendo incorporada à variável de estado (x_a). As ações de manutenção preventiva são entradas realizadas no subsistema aeronave cujo objetivo é manter o valor da variável de estado dentro do intervalo previsto no projeto. As ações de manutenção corretiva são entradas realizadas no subsistema aeronave com o objetivo de retornar o valor da variável de estado para um valor dentro do intervalo previsto no projeto.

A ausência de uma manutenção preventiva impede que se detecte uma excursão do valor da variável de estado para fora do limite previsto pelas entradas geradas pela simples passagem do tempo e pela utilização da aeronave. Uma manutenção corretiva inadequada pode provocar esta excursão, da mesma forma que qualquer outra ação inadequada da manutenção (o esquecimento de uma ferramenta dentro de um compartimento da aeronave, por exemplo).

4.2.2 O subsistema Entorno ambiental e a meteorologia adversa

O Entorno ambiental foi considerado na construção do modelo como sendo um subsistema do Sistema de Voo. Esta visão é original, tendo em vista que a atmosfera poderia ter sido considerada no modelo como sendo apenas o ambiente onde o sistema está inserido. A opção por adotar a parte da atmosfera em contato direto com a aeronave como sendo um subsistema componente do Sistema de Voo, está explicado no item 4.2.3 desta tese.

A fração da atmosfera que não está em contato direto com a aeronave é a troposfera, e a mesma pode ser considerada uma das dimensões do ambiente no qual o Sistema de Voo é operado, no caso: a dimensão física. A atmosfera possui, em cada uma das suas camadas paralelas à superfície da terra, uma extensão contínua ao redor do planeta. Ainda assim, o ambiente atmosférico possui diferentes características em cada tempo e espaço. Quando uma aeronave cruza com partes da atmosfera que tenha características diferentes do estado presente no subsistema Entorno ambiental (E), estas características, ao entrarem em contato com a aeronave, são entradas do subsistema E que alteram o seu estado x_e .

Pelo modelo criado, uma região da atmosfera afastada da aeronave pertence ao ambiente. Uma parte do ambiente atmosférico que tenha características de baixa temperatura e grande umidade, características geradoras de formação de gelo, só afetaria o Sistema de Voo quando houvesse troca do sistema com esta parte do ambiente. A passagem do Sistema de Voo por esta região faria com que as características de frio e umidade elevada se tornassem uma entrada do subsistema E, alterando o estado do subsistema Entorno ambiental.

Este, por sua vez, através de sua interação mista complexa com o subsistema aeronave A, poderia gerar formação de gelo em componentes da aeronave, alterando o estado do subsistema A. A principal vulnerabilidade neste caso é a alteração dos perfis dos aerofólios com o acúmulo de gelo nos bordos de ataque e zonas de baixa pressão, como o extradorso de asas e superfícies de controle. O gelo acumulado altera também o peso do Sistema de Voo, modificando velocidades de estol e pode interferir na atuação das superfícies de comando de voo.

Caso os subsistemas de controle P_1 e P_2 não percebam a alteração do

subsistema E e a interação de E com o subsistema A, suas ações podem, por influência do estado de E e do estado de A, gerar saídas indesejadas, como as observadas em diversos acidentes nos quais a formação de gelo foi fator contribuinte.

4.2.3 O subsistema piloto e erros latentes no treinamento e supervisão

Para uma pessoa tornar-se um piloto de aeronave, são necessárias diversas características. Primeiro é averiguada a sua aptidão psicofísica, nessa seleção, procura-se garantir uma série de características da variável de estado do subsistema P, tais como acuidade visual e auditiva, sanidade mental e aptidão psicológica, características de coordenação motora e ausência de doenças que possam gerar mal súbito.

Da mesma forma que a passagem do tempo é uma entrada constante ao subsistema Aeronave, também o é para os subsistemas Piloto. O envelhecimento causa degradação das características físicas dos pilotos até o ponto em que as medidas corretivas não são mais eficazes para manter o estado x_{P1} e x_{P2} dentro das margens aceitáveis pela certificação médica.

O candidato a piloto, uma vez obtida a sua certificação médica, inicia uma longa jornada de modificação do seu estado x_P . A cada aula teórica e a cada instrução de voo prática, as características do estado do piloto são modificadas até que o mesmo seja aprovado no voo de cheque.

Isso significa que as suas características, conhecimento teórico, capacidade psicomotora, orientação espacial e outras, representadas em conjunto pela variável de estado, foram consideradas adequadas e suficientes para que ele possa servir como subsistema de controle de um Sistema de Voo. O indivíduo, agora considerado piloto, está apto a controlar uma aeronave e voar.

Para cada diferente aeronave, se avião ou helicóptero, dependendo do modelo da mesma, são necessárias características diferentes do estado dos subsistemas Piloto. O estado x_P deve ser adequado ao subsistema aeronave que o piloto vai controlar e, dependendo do ambiente operacional, adequado ao subsistema entorno ambiental que fará parte do Sistema de Voo. Deve ser também, adequado à interação com o outro subsistema Piloto durante a operação da aeronave. Ambos os pilotos devem ser capacitados a interagir entre si com eficiência, segurança durante a atividade aérea.

Exemplificando, um piloto de Boeing 737-800 tem que ter o curso específico da sua aeronave e, se ele for operar em região de frio extremo, ou calor extremo, deve ter instruções específicas de como interagir com a aeronave e com o ambiente na qual a mesma estará sendo operada. Deve ter também conhecimento das técnicas de gerenciamento de recursos de cabine para interagir com o outro piloto.

As falhas no treinamento são representadas no modelo proposto como entradas passadas U^I do subsistema P, as quais foram incorporadas na variável de estado x_P , como parte do histórico do piloto, tornando-se um erro latente que afetará o seu desempenho presente. Essa entrada pode ser, por exemplo, simplesmente um fator estressor externo à atividade aérea, como um problema familiar ou financeiro que afete a capacidade do piloto de interagir adequadamente, por estresse. Essa entrada passada ingressa dentro da “nave”, que é o Sistema de Voo, na forma da variável de estado do piloto afetado.

As falhas na supervisão são características presentes no ambiente operacional da empresa ou organização onde o piloto está inserido. Essas falhas podem chegar aos pilotos, por meio de um efeito cascata, também na forma de entradas U^I inadequadas, tornando-se latentes.

Outra forma de as mesmas chegarem até os pilotos é a falha em identificar um piloto que não possui mais, de forma permanente ou temporária, o estado adequado para compor uma tripulação de voo. Por motivos vários, as características do indivíduo tornaram-se inadequadas, o que é representado pela variável de estado fora do intervalo normal de variação.

4.3 AS CARACTERÍSTICAS DO MODELO VERSUS AS DO *STAMP*

O *STAMP* (LEVESON, 2004, 2011), o Método de Análise Ressonância de Funcional (FRAM) (HOLLNAGEL, 2004, 2012) e o ACCIMAP (RASMUSSEN, 1997) são citados como as mais relevantes referências em modelos de acidentes baseados na abordagem sistêmica. Para ressaltar as características inovadoras do modelo desenvolvido nesta tese, foi escolhido um destes três diferentes métodos, o *STAMP*, para realizar uma análise comparativa. O objetivo desta comparação não é realizar uma análise exaustiva nem determinar qual método é melhor ou pior, mas apenas ressaltar algumas semelhanças e diferenças entre os mesmos.

Como semelhanças imediatamente observáveis encontram-se a base teórica utilizada, no caso a Teoria Geral dos Sistemas, e a noção de hierarquia entre os sistemas. A noção de hierarquia é, porém, abordada de forma diferente em ambos os modelos.

No STAMP há a intenção expressa de atingir os níveis mais distantes e elevados do sistema de controle sócio-técnico, visível no próprio estabelecimento da forma genérica de modelo de controle sócio-técnico (Figura 23).

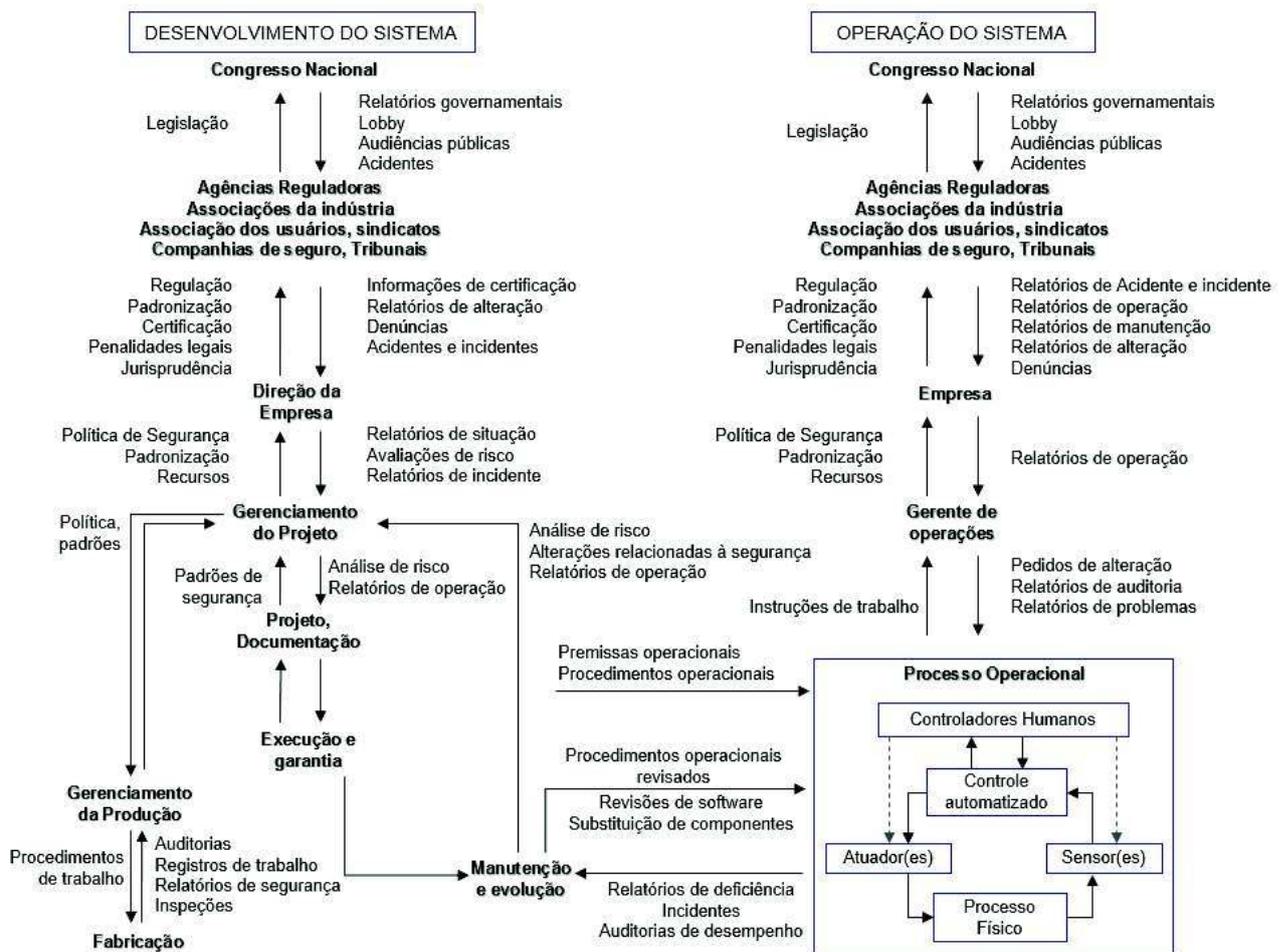


Figura 23: Forma genérica de modelo de controle sócio-técnico do STAMP (adaptado de LEVESON, 2004).

Tanto no desenvolvimento do sistema quanto na operação do mesmo, os níveis de controle ascendem até o nível legislativo, que é um dos componentes da esfera política da sociedade. No modelo apresentado nesta tese, o foco é concentrado no sistema passível de sofrer o acidente (o Sistema de Voo). A diferença, neste caso, é que o controle exercido acima do nível hierárquico do sistema acidentado, pela hipótese de

nave, influencia este sistema de forma indireta, através das variáveis de estado do mesmo. Esta forma de controle extemporâneo (pode-se dizer *offline* ou “indireto”) difere do controle direto exercido pelos operadores do sistema (o subsistema de controle do sistema). Tal diferença é intencional e visa reverter a “tendência de pêndulo” para longe das causas ativas das ocorrências, descrita por Reason (2006).

O STAMP, apesar de utilizar a noção de sistema, não utiliza o desenvolvimento lógico-matemático desenvolvido pelos teóricos da TGS. Com isto, não há diferenciação entre as entradas e saídas e as interfaces de restrição entre os subsistemas. No STAMP o sistema de controle sócio-técnico é descrito de forma vertical, ao invés de utilizar a noção de conjunto (um sistema de hierarquia inferior é um subconjunto do sistema de hierarquia superior e o compõe), não havendo diferenciação entre subsistemas componentes do mesmo sistema e elementos que fazem parte do ambiente.

A metodologia de investigação de acidentes utilizando STAMP é chamada CAST - *Causal Analysis using System Theory*. A análise de acidentes pelo CAST segue os seguintes passos (LEVESON, 2004; 2011 apud PEREIRA et al, 2015):

1. Identifique os acontecimentos próximos ao evento;
2. Identifique o perigo do sistema violado e as restrições projetadas para o sistema de segurança;
3. Construa a estrutura de controle como ela foi projetada para funcionar;
4. Para cada componente, determine se ele preenche todas as responsabilidades ou fornece controle inadequado. Examine a coordenação e comunicação. Considere a dinâmica e migração para riscos maiores;
5. Determine as mudanças que poderiam eliminar o controle inadequado (falta de reforço nas restrições) no futuro. Elabore recomendações.

O passo 1 do método mostra que o mesmo realiza a análise a partir dos eventos ocorrido, ao invés de partir da estrutura do sistema em seu funcionamento normal, como o Sistema de Voo proposto. Além disto, a execução do passo três não diferencia as entradas atuais dos sistemas das entradas passadas que se tornaram parte do histórico que influencia as saídas atuais (ou seja, se tornaram parte do Estado do sistema, representado pela sua variável de estado).

Por fim, a maior diferença entre ambos os métodos é que o STAMP é um método desenhado para ser de aplicação genérica enquanto o Sistema de Voo

desenvolvido nesta Tese é para aplicação específica para o caso de uma aeronave em voo. O que não significa que o tratamento realizado aqui não possa ser estendido para outros contextos e aplicações diversas, respeitando-se as características específicas da Teoria Geral dos Sistemas.

5 APLICAÇÃO DO MODELO EM UM ACIDENTE

SELECIONADO

5 APLICAÇÃO DO MODELO EM UM ACIDENTE SELECIONADO

De forma geral, as comparações efetuadas no capítulo anterior mostram que todas as diferentes áreas da ciência que interagem em uma investigação de acidentes se beneficiam do modelo construído. Assim, será efetuada uma aplicação pioneira do modelo.

Foi escolhido como estudo de caso o acidente ocorrido com um avião de carreira, o qual se acidentou no meio de uma rota transatlântica, no dia 1º de junho de 2009: o caso do Airfrance 447. Este caso foi escolhido por representar bem a hipótese de nave, pois o acidente ocorreu com a aeronave e tripulação completamente isolados de qualquer contato exterior, fora do alcance dos radares, rádios de comunicação e outras aeronaves. Todo o ocorrido restringiu-se aos subsistemas propostos no modelo.

5.1 PROCEDIMENTO DE ANÁLISE

Considerando que a investigação do acidente do estudo de caso já está concluída pela autoridade de investigação, a metodologia de aplicação do modelo proposta no item 3.7 foi adaptada para os seguintes passos:

- 1) Identificação da documentação de referência e sinopse da ocorrência;
- 2) Listagem dos fatos (*findings*) descobertos na investigação na forma que se encontram no relatório final do acidente;
- 3) Classificação dos fatos de acordo com a sua relação com as variáveis de estado dos subsistemas Aeronave, Piloto 1 e 2, e Entorno ambiental;
- 4) Identificação das inter-relações entre os estados dos subsistemas e as entradas e saídas dos mesmos com uso das equações de restrição;
- 5) Utilização do diagrama funcional para evidenciar a sucessão de eventos que levou ao acidente;
- 6) Análise dos resultados da aplicação do modelo face às conclusões apresentadas no relatório de investigação oficial.

5.2 ESTUDO DE CASO: AIRBUS A330 VOO AF-447

Documentação de referência: “*Final Report on the accident on 1st June 2009*”

to the Airbus A330-203, registered F-GZCP, operated by Air France, flight AF 447 Rio de Janeiro – Paris” (FRANCE, 2012).

5.2.1 Sinopse

“Em 31 de maio de 2009, o Airbus A330 voo AF 447 decolou do Aeroporto do Galeão, no Rio de Janeiro, em direção ao Aeroporto de Charles de Gaulle, em Paris. O avião estava em contato com o Centro de Controle ATLÂNTICO na rota INTOL – SALPU – ORARO – TASIL no FL350. Por volta de 02h02, o Comandante deixou o *cockpit*. Por volta de 02h08, a tripulação fez uma mudança de curso de 12 graus para a esquerda, provavelmente para evitar retornos detectados pelo radar meteorológico.”

“Às 2h10min 05s, aparentemente em seguida a obstrução dos tubos de *Pitot* por cristais de gelo, as indicações de velocidade tornaram-se incorretas e alguns sistemas automáticos se desconectaram. A trajetória de voo do avião não foi controlada pelos dois copilotos. Em 1 minuto 30s o Capitão se juntou a eles, enquanto o avião estava em uma situação de estol que durou até o impacto com o mar, às 2h 14min 28s.”

“O acidente resultou da seguinte sucessão de eventos:”

- “Inconsistência temporária entre as medições de velocidade indicada, aparentemente seguindo à obstrução dos tubos de Pitot por cristais de gelo que levaram, em particular, à desconexão do piloto automático e à reconfiguração para “lei alternada” [de controle de voo];”

- “*Inputs* inapropriados nos comandos que desestabilizaram a trajetória de voo;”

- “A tripulação não reconheceu a conexão entre a perda das indicações de velocidade e o procedimento adequado;”

- “A identificação tardia, pelo “PNF” do desvio na trajetória de voo e insuficiente correção pelo “PF”;”

- “A falha da tripulação em identificar a aproximação do estol, a falta de reação imediata de sua parte e a saída [da aeronave] do envelope de voo;”

- “A falha da tripulação em diagnosticar a situação de estol e, conseqüentemente, a falta de qualquer ação que poderia tornar a recuperação possível.”

“O BEA (*Bureau d'Enquêtes et d'Analyses*) emitiu 41 Recomendações de

Segurança para o DGAC (*Direction générale de l'aviation civile*), EASA (*European Aviation Safety Agency*), FAA (*Federal Aviation Administration*), ICAO (*International Civil Aviation Organization*) e para as autoridades brasileiras e senegalesas relativas aos gravadores de voo, certificação, treinamento e treinamento recorrente de pilotos, comandante substituto, busca e salvamento e controle de tráfego aéreo, simuladores de voo, ergonomia de cabine, *feedback* operacional e supervisão dos operadores pela autoridade nacional de supervisão” (FRANCE, 2012, p. 17).

5.2.2 Fatos descobertos na investigação

Todos os fatos que são listados no Relatório Final de investigação foram transpostos para o Quadro 4.

Quadro 4: Fatos listados no Relatório Final de investigação. Fonte: BEA.

1	A tripulação possuía as licenças e marcas requeridas para realizar o voo;
2	O avião possuía um Certificado de Aeronavegabilidade válido e era mantido de acordo com a regulamentação;
3	O peso e balanceamento do avião estavam dentro dos limites operacionais;
4	O avião decolou do Rio de Janeiro sem qualquer problema técnico conhecido, exceto em um dos três painéis de gerenciamento de rádio;
5	A composição da tripulação estava de acordo com os procedimentos do operador;
6	A situação meteorológica não era excepcional para o mês de junho na Zona de Convergência Intertropical (ITCZ);
7	Havia poderosas formações de cumulonimbus na rota do AF-447. Algumas das quais poderiam ter significantes centros de turbulência;
8	Análise meteorológica adicional mostrou a presença de forte condensação no nível de voo do AF 447, provavelmente associada ao fenômeno da convecção;
9	A composição precisa das massas de nuvens acima de 30.000 pés é pouco conhecida, em particular a respeito da proporção entre água super-resfriada e cristais de gelo, especialmente a respeito do tamanho desses últimos;
10	Vários aviões que estavam voando antes e após o AF 447, na mesma altitude, realizaram desvios para evitar formações de nuvens;
11	A tripulação identificou alguns retornos do radar meteorológico e efetuou uma mudança de curso de 12° para a esquerda da sua rota;
12	No momento da desconexão do piloto automático, o comandante estava descansando;
13	A saída do comandante foi realizada sem descumprir nenhuma instrução específica para cruzamento da ITCZ;
14	Havia uma designação implícita de um piloto como comandante substituto;
15	Houve uma inconsistência entre as medições de velocidade, aparentemente em seguida ao bloqueio dos tubos de <i>Pitot</i> por cristais de gelo;

Quadro 4: Fatos listados no Relatório Final de investigação – CONTINUAÇÃO.

16	O piloto automático e, então, o <i>autothrust</i> (controle automático de potência) desconectaram enquanto o avião estava voando no limite superior de uma camada de nuvens levemente turbulenta;
17	Os sistemas do avião detectaram uma inconsistência nas medições de velocidade. A lei de controle de voo foi reconfigurada para “alternada 2B”;
18	Nenhuma mensagem de falha no ECAM (tela de avisos de falhas) claramente indicava a detecção, pelo sistema, de uma inconsistência nas medições da velocidade;
19	Os pilotos detectaram uma anomalia por causa da desconexão do piloto automático, alertando e surpreendendo-os;
20	Apesar de terem identificado e cotejado a perda das indicações de velocidade, nenhum dos dois copilotos realizou o procedimento de “ <i>Unreliable IAS</i> ” (velocidade indicada não-confiável);
21	Os diretores de voo não se desconectaram;
22	As “ <i>crossbars</i> ” (informação pictorial de trajetória programada) desapareceram e reapareceram em diversas ocasiões, mudando de modo várias vezes;
23	Os copilotos não tiveram nenhum treinamento em voo, em grande altitude, para o procedimento “ <i>vol avec IAS douteuse</i> ” (voo com indicação de velocidade duvidosa) ou para a pilotagem manual do avião;
24	A velocidade mostrada no painel esquerdo ficou incorreta por 29 segundos, a velocidade indicada no instrumento reserva por 54 segundos e a velocidade mostrada no painel direito por 61 segundos;
25	Em menos de um minuto após a desconexão do piloto automático, o avião saiu do envelope de voo, devido aos <i>inputs</i> inapropriados dos pilotos;
26	O comandante retornou para o <i>cockpit</i> cerca de 1min 30s após a desconexão do piloto automático;
27	Durante todo o voo, os movimentos das superfícies de controle de voo foram consistentes com os <i>inputs</i> dos pilotos
28	Até a saída do envelope de voo, os movimentos do avião eram consistentes com a posição das superfícies de controle de voo;
29	Não há prescrição regulamentar de treinamento de CRM para uma tripulação composta por dois copilotos na situação de capitão substituto;
30	A aproximação para o estol foi caracterizada pelo acionamento do alarme seguida do aparecimento do “ <i>buffeting</i> ” (oscilação irregular dos comandos de voo);
31	Na ausência do mostrador do limite de velocidade na barra de velocidade do painel (PFD – <i>Primary Flight Display</i>), o alarme sonoro de estol não foi confirmado por nenhuma informação visual específica;
32	O alarme sonoro de estol soou continuamente por 54 segundos;
33	Nenhum dos pilotos fez qualquer referência ao alarme de estol ou ao <i>buffeting</i> ;
34	Pouco tempo após o acionamento do alarme de estol, o PF (<i>pilot flying</i>) selecionou TO/GA <i>thrust</i> (potência de decolagem/arremetida) e comandou uma atitude de subida (<i>nose-up input</i>);
35	Nenhum dos dois pilotos identificou formalmente a situação de estol;

Quadro 4: Fatos listados no Relatório Final de investigação – CONTINUAÇÃO 2

36	O treinamento teórico recebido pelos co-pilotos, bem como alguns documentos, incluindo uma nota de dados de adequação operacional, associam o fenômeno de <i>buffeting</i> à aproximação do estol e à sobrevelocidade (<i>overspeed</i>). No Airbus A330, o fenômeno de <i>buffeting</i> só é encontrado na aproximação do estol;
37	O parâmetro de ângulo de ataque é o que provoca o acionamento do alarme de estol, se o valor do ângulo de ataque se torna inválido, o alarme para;
38	Por projeto, quando os valores medidos de velocidade são menores que 60 kt, os valores medidos de ângulo de ataque são invalidados;
39	Cada vez que o alarme de estol foi acionado, o ângulo de ataque excedeu o valor do seu limite teórico de acionamento;
40	O ângulo de ataque do avião não é mostrado diretamente para os pilotos;
41	Os motores funcionaram normalmente e sempre responderam aos comandos dos pilotos;
42	O PNF (<i>pilot not flying / pilot monitoring</i>) solicitou correções de trajetória de voo imprecisas. Essas eram, contudo, essenciais e suficientes para a gestão em curto prazo da situação;
43	Os últimos valores gravados foram atitude cabrada de 16.2°, rolagem de 5.3° para a esquerda e velocidade vertical negativa de - 10.912 ft/min;
44	Os tubos de Pitot instalados no F-GZCP cumpriam requisitos que eram mais rigorosos do que as normas de certificação;
45	A análise dos eventos relacionados com a perda de indicações de velocidade levou a Airbus e a Air France a substituir sondas Pitot C16195AA pelo modelo C16195BA. O primeiro avião foi modificado em 30 de maio de 2009;
46	A EASA analisou os eventos de formação de gelo nos tubos de Pitot; que confirmaram a gravidade da falha e decidiu não tornar a mudança das sondas obrigatória
47	O voo não foi transferido entre os centros de controle de brasileiros e senegaleses;
48	Entre 8h 22 min e 9h 09 min, as primeiras mensagens de alerta de emergência foram enviadas pelos centros de controle de Madrid e Brest;
49	A tripulação não era capacitada para usar as funções de ADS-C e CPDLC com DAKAR <i>Oceanic</i> (Centro de controle de Dakar, no Senegal). Se a conexão fosse estabelecida, a perda de altitude teria gerado um alerta na tela do controlador;
50	As primeiras peças do avião foram encontradas flutuando 5 dias após o acidente;
51	Os gravadores de voo foram recuperados 23 meses após o acidente.

5.2.3 Classificação dos fatos por subsistema componente

Os fatos estabelecidos no Relatório Final da investigação são classificados de acordo com a sua relação com as variáveis de estado dos subsistemas Aeronave (A), Entorno ambiental (E), Piloto 1 e 2 (P₁ e P₂). A numeração dos fatos listados no Quadro 4 foi mantida nos demais Quadros para facilitar a localização de cada item.

O Quadro 5 lista todos os fatos relativos à Variável de Estado da Aeronave (A) e o Quadro 6 apresenta os fatos relativos à Variável de Estado do Entorno ambiental (E). O Quadro 7 apresenta os fatos relativos à Variável de Estado dos pilotos em geral ou do *Pilot Flying* (P₁) ou do *Pilot Monitoring* (P₂) de forma específica.

Quadro 5: Fatos relativos à Variável de Estado de A

Fato levantado durante a investigação		Classificação do fato no Sistema de Voo
2	O avião possuía um Certificado de Aeronavegabilidade válido e era mantido de acordo com a regulamentação;	Variável de Estado de A
3	O peso e balanceamento do avião estavam dentro dos limites operacionais;	Variável de Estado de A
4	O avião decolou do Rio de Janeiro sem qualquer problema técnico conhecido, exceto em um dos três painéis de gerenciamento de rádio;	Variável de Estado de A
21	Os diretores de voo não se desconectaram;	Variável de Estado de A.
44	Os tubos de <i>Pitot</i> instalados no F-GZCP cumpriam requisitos que eram mais rigorosos do que as normas de certificação;	Variável de Estado de A

Quadro 6: Fatos relativos à Variável de Estado de E

Fato levantado durante a investigação		Classificação do fato no Sistema de Voo
6	A situação meteorológica não era excepcional para o mês de junho na Zona de Convergência Intertropical (ITCZ);	Variável de Estado de E
7	Havia poderosas formações de cumulonimbus na rota do AF-447. Algumas das quais poderiam ter significantes centros de turbulência;	Variável de Estado de E
8	Análise meteorológica adicional mostrou a presença de forte condensação no nível de voo do AF 447, provavelmente associada ao fenômeno da convecção;	Variável de Estado de E
9	A composição precisa das massas de nuvens acima de 30.000 pés é pouco conhecida, em particular a respeito da proporção entre água super-resfriada e cristais de gelo, especialmente a respeito do tamanho desses últimos;	Variável de Estado de E
10	Vários aviões que estavam voando antes e após o AF 447, na mesma altitude, realizaram desvios para evitar formações de nuvens;	Variável de Estado de E

Quadro 7: Fatos relativos à Variável de Estado de P1 e P2

Fato levantado durante a investigação		Classificação do fato no Sistema de Voo
1	A tripulação possuía as licenças e marcas requeridas para realizar o voo;	Variável de Estado de P1 e P2
5	A composição da tripulação estava de acordo com os procedimentos do operador;	Variável de Estado de P1 e P2
12	No momento da desconexão do piloto automático, o comandante estava descansando;	Variável de Estado de P1 e P2
13	A saída do comandante foi realizada sem descumprir nenhuma instrução específica para cruzamento da ITCZ;	Variável de Estado de P1 e P2
14	Havia uma designação implícita de um piloto como comandante substituto;	Variável de Estado de P1 e P2
23	Os co-pilotos não tiveram nenhum treinamento em voo, em grande altitude, para o procedimento “ <i>vol avec IAS douteuse</i> ” (voo com indicação de velocidade duvidosa) ou para a pilotagem manual do avião;	Variável de Estado de P1 e P2
26	O comandante retornou para o cockpit cerca de 1min 30s após a desconexão do piloto automático;	Variável de Estado de P1 e P2
29	Não há prescrição regulamentar de treinamento de CRM para uma tripulação composta por dois co-pilotos na situação de capitão substituto;	Variável de Estado de P1 e P2
35	Nenhum dos dois pilotos identificou formalmente a situação de estol;	Variável de Estado de P1 e P2
49	A tripulação não era capacitada para usar as funções de ADS-C e CPDLC com DAKAR <i>Oceanic</i> (Centro de controle de Dakar, no Senegal). Se a conexão fosse estabelecida, a perda de altitude teria gerado um alerta na tela do controlador;	Variável de Estado de P1 e P2

5.2.4 Interações e desigualdades nas equações de restrição

Dos fatos apresentados no Relatório Final, são extraídas as interações previstas entre os subsistemas que são mostradas no Quadro 8 e as desigualdades nas equações de restrição, que representam as falhas nas interações entre os subsistemas, são mostradas no Quadro 9.

Quadro 8: Eventos que representam interações entre os subsistemas componentes previstas nas equações de restrição

Fato levantado durante a investigação		Classificação do fato no Sistema de Voo
11	A tripulação identificou alguns retornos do radar meteorológico e efetuou uma mudança de curso de 12° para a esquerda da sua rota;	Entrada de E para P1 e P2 através de A. (dados sobre F vindos do radar – subsistema de A, para os pilotos)
19	Os pilotos detectaram uma anomalia por causa da desconexão do piloto automático, alertando e surpreendendo-os;	Saída de A para P1 e P2.
27	Durante todo o voo, os movimentos das superfícies de controle de voo foram consistentes com os <i>inputs</i> dos pilotos;	Igualdade na Equação de Restrição de P1 e P2 para A
28	Até a saída do envelope de voo, os movimentos do avião eram consistentes com a posição das superfícies de controle de voo;	Igualdade na Equação de Restrição de A para E
30	A aproximação para o estol foi caracterizada pelo acionamento do alarme seguida do aparecimento do “ <i>buffet</i> ” (oscilação irregular dos comandos de voo);	Igualdade na Equação de Restrição de A para P1 e P2
32	O alarme sonoro de estol soou continuamente por 54 segundos;	Igualdade na Equação de restrição de E para A
34	Pouco tempo após o acionamento do alarme de estol, o PF (<i>pilot flying</i>) selecionou TO/GA <i>thrust</i> (potência de decolagem/arremetida) e comandou uma atitude de subida (<i>nose-up input</i>);	Igualdade na Equação de Restrição de P1 para A. Variável de Estado de A.
37	O parâmetro de ângulo de ataque é o que provoca o acionamento do alarme de estol, se o valor do ângulo de ataque se torna inválido, o alarme para;	Equação de Restrição de E para A
38	Por projeto, quando os valores medidos de velocidade são menores que 60 Kt, os valores medidos de ângulo de ataque são invalidados;	Limite da Equação de Restrição de E para A
39	Cada vez que o alarme de estol foi acionado, o ângulo de ataque excedeu o valor do seu limite teórico de acionamento;	Igualdade na Equação de Restrição de E para A.
41	Os motores funcionaram normalmente e sempre responderam aos comandos dos pilotos;	Igualdade na Equação de Restrição de P1 e P2 para A.

As desigualdades nas equações de restrição, que são mostradas no Quadro 9, representam todas as interações indevidas, ocorridas entre os subsistemas. Estas interações indevidas são produto da interação da variável de estado do subsistema que recebe a entrada e a sua variável de estado.

Quadro 9: Eventos desigualdades nas equações de restrição

	Fato levantado durante a investigação	Classificação do fato no Sistema de Voo
15	Houve uma inconsistência entre as medições de velocidade, aparentemente em seguida ao bloqueio dos tubos de Pitot por cristais de gelo;	Desigualdade na equação de restrição de F para A.
16	O piloto automático e, então, o <i>autothrust</i> (controle automático de potência) desconectaram enquanto o avião estava voando no limite superior de uma camada de nuvens levemente turbulenta;	Mudança da Variável de Estado de A devido a uma entrada “índesejada”, mas dentro dos limites possíveis de F.
17	Os sistemas do avião detectaram uma inconsistência nas medições de velocidade. A lei de controle de voo foi reconfigurada para “alternada 2B”;	Mudança da Variável de Estado de A devido à desigualdade na equação de restrição de F para A.
18	Nenhuma mensagem de falha no ECAM (tela de avisos de falhas) claramente indicava a detecção, pelo sistema, de uma inconsistência nas medições da velocidade;	Desigualdade na equação de restrição de A para P1 e P1, mostrando a Variável de Estado de F.
20	Apesar de terem identificado e cotejado a perda das indicações de velocidade, nenhum dos dois co-pilotos realizou o procedimento de “ <i>Unreliable IAS</i> ” (velocidade indicada não-confiável);	Desigualdade na equação de restrição de P1 e P2 para A, devido deficiente controle da Variável de Estado de F.
22	As “ <i>crossbars</i> ” desapareceram e reapareceram em diversas ocasiões, mudando de modo várias vezes;	Desigualdade na Equação de Restrição de A para P1 e P2.
24	A velocidade mostrada no painel esquerdo ficou incorreta por 29 segundos, a velocidade indicada no instrumento reserva por 54 segundos e a velocidade mostrada no painel direito por 61 segundos;	Desigualdade na Equação de Restrição de A para P1 e P2.
25	Em menos de um minuto após a desconexão do piloto automático, o avião saiu do envelope de voo, devido aos <i>inputs</i> inapropriados dos pilotos;	Desigualdade na Equação de Restrição de P1 e P2 para A.
31	Na ausência do mostrador do limite de velocidade na barra de velocidade do painel (PFD – <i>Primary Flight Display</i>), o alarme sonoro de estol não foi confirmado por nenhuma informação visual específica;	Desigualdade na Equação de Restrição de A para P1 e P2
33	Nenhum dos pilotos fez qualquer referência ao alarme de estol ou ao <i>buffet</i> ;	Desigualdade nas Equações de Restrição entre P1 e P2
36	O treinamento teórico recebido pelos co-pilotos, bem como alguns documentos, incluindo uma nota de dados de adequação operacional, associam o fenômeno de <i>buffet</i> à aproximação do estol e à sobrevelocidade (<i>overspeed</i>). No Airbus A330, o fenômeno de <i>buffet</i> só é encontrado na aproximação do estol;	Variável de Estado de P1 e P2 incongruente com a Equação de Restrição de F para A

Quadro 9: Eventos desigualdades nas equações de restrição – CONTINUAÇÃO

40	O ângulo de ataque do avião não é mostrado diretamente para os pilotos;	Desigualdade na Equação de Restrição de A para P1 e P2 a respeito da Variável de Estado de F.
42	O PNF (<i>pilot not flying / pilot monitoring</i>) solicitou correções de trajetória de voo imprecisas. Estas eram, contudo, essenciais e suficientes para a gestão em curto prazo da situação;	Variável de Estado de P2 Desigualdade nas Equações de Restrição entre P1 e P2
43	Os últimos valores gravados foram atitude cabrada de 16.2°, rolagem de 5.3° para a esquerda e velocidade vertical negativa de - 10.912 ft/min;	Saída “indesejada” do Sistema de Voo

Obs: o item 42 vai ser analisado em detalhes posteriormente.

Além dos fatos selecionados como componentes das Variáveis de Estado de A, F e P1 e P2, das interações adequadas mostradas nas equações de restrição e nas desigualdades das mesmas, foram identificados, dentre os “*findings*” contidos no Relatório Final de acidente, alguns eventos que são externos ao Sistema de Voo.

Estes fatos representam detalhes ocorridos pós-acidente e não são contribuintes para o desastre, mas consequências do mesmo.

Quadro 10: Eventos externos ao Sistema de Voo

	Fato levantado durante a investigação	Classificação do fato no Sistema de Voo
45	A análise dos eventos relacionados com a perda de indicações de velocidade levou a Airbus e a Air France a substituir sondas Pitot C16195AA pelo modelo C16195BA. O primeiro avião foi modificado em 30 de maio de 2009;	Evento externo ao Sistema de Voo - não contido na “nave”
46	A EASA analisou os eventos de formação de gelo nos tubos de Pitot; que confirmaram a gravidade da falha e decidiu não tornar a mudança das sondas obrigatória;	Evento externo ao Sistema de Voo - não contido na “nave”
47	O voo não foi transferido entre os centros de controle de brasileiros e senegaleses;	Evento externo ao Sistema de Voo - não contido na “nave”
48	Entre 8h 22 min e 9h 09 min, as primeiras mensagens de alerta de emergência foram enviadas pelos centros de controle de Madrid e Brest;	Evento externo ao Sistema de Voo - não contido na “nave”
50	As primeiras peças do avião foram encontradas flutuando 5 dias após o acidente;	Saída indesejada do Sistema de Voo
51	Os gravadores de voo foram recuperados 23 meses após o acidente.	Saída indesejada do Sistema de Voo

5.2.5 O acidente no diagrama funcional

Um exemplo de *loop* de controle por retroação que ocorreu de forma correta durante o voo do dia 31 de maio para 1º de junho de 2009 pode ser observado no Fato 11: “A tripulação identificou alguns retornos do radar meteorológico e efetuou uma mudança de curso de 12º para a esquerda da sua rota”. Este *loop* pode ser descrito por meio das equações de restrição: (XII) (XIV) (XV) (VIII) (I)+(II) (III) (X).

A Equação XII representa as formações meteorológicas. A Equação XIV representa a detecção desta formação pelo radar da aeronave. A Equação XV representa a apresentação dos dados de radar coletados para os pilotos. A Equação VIII representa a correta leitura dos pilotos dos dados de radar. As equações I e II representam as ações dos pilotos na aeronave. A Equação III é a reação da aeronave aos “*inputs*” dos pilotos e a Equação X é a mudança na trajetória de voo.

Este *loop* de controle pode ser visualizado de forma gráfica utilizando-se o diagrama funcional. Observa-se (Figura 24) que as formações meteorológicas (1) são detectadas pelo radar (2). O piloto recebe a informação (3), monitorado pelo outro piloto (4), e decide comandar a aeronave (5) para realizar um desvio de rota (seta verde) que ocorre sendo confirmado pelos pilotos pela observação da mudança de posição da aeronave (6).

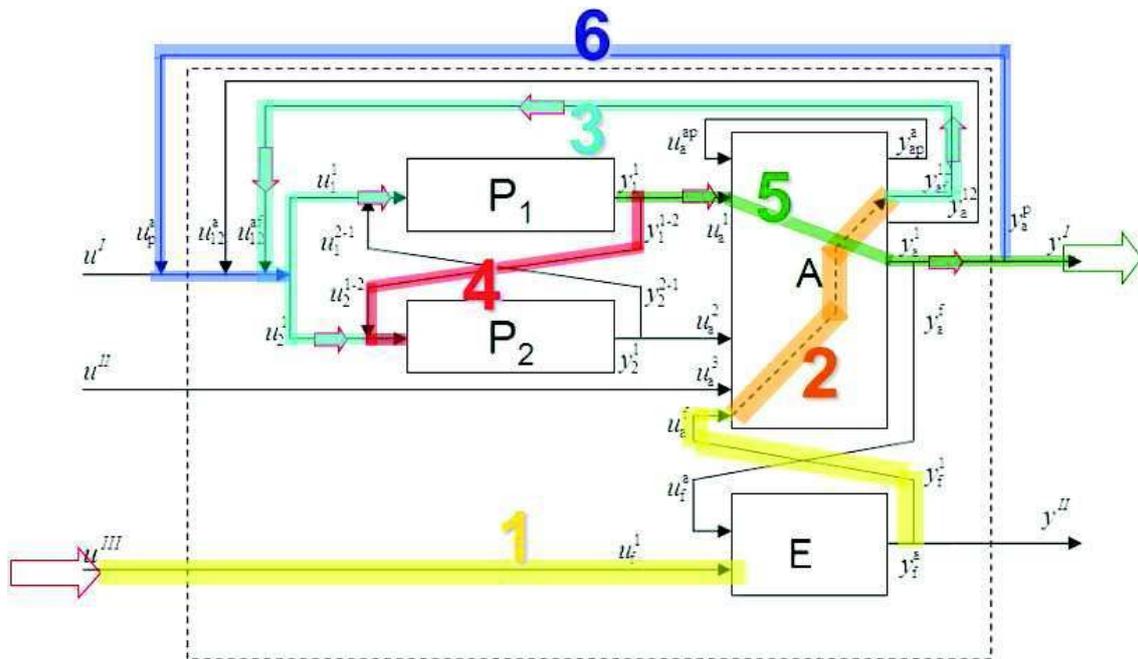


Figura 24: *Loop* de controle a partir da detecção de formações meteorológicas.

Quadro 11: Análise dos fatos (numerados) e equações de restrição no acidente -
CONTINUAÇÃO

41	20, 33, 42	$y_2^{2-1} = u_1^{2-1}$	(VI)
44		$u^{II} = u_h^3$	(VII)
11, 19	18, 22, 24, 31, 40	$y_{hf}^{12} = u_{12}^{hf}$	(VIII)
	16	$y_h^{12} = u_{12}^h$	(IX)
11, 28, 30, 34		$y_h^1 = y_h^p + y^j$	(X)
37, 38, 39	15, 17	$y_h^f = u_f^h$	(XI)
11	15	$u^{III} = u_f^1$	(XII)
32		$y_f^1 = y_f^h + y^{II}$	(XIII)
11		$y_f^h = u_h^f$	(XIV)
11, 32		$u_h^f \sim y_{hf}^{12}$	(XV)

Obs: As desigualdades das Equações VI, VIII e XI, ressaltada no Quadro, são analisadas mais detalhadamente a seguir.

5.2.6 Análise dos resultados da aplicação do modelo

Os fatos relatados no relatório final de acidente referem-se às descobertas consideradas mais relevantes, pela equipe multidisciplinar de investigadores, para explicar o acidente e estabelecer medidas de prevenção. Este entendimento é construído sobre a base cognitiva do modelo mental que os investigadores da equipe têm de um acidente aeronáutico. Quanto mais preciso o quadro mental formado coletivamente na equipe, mais detalhados e específicos podem ser os fatos relacionados no relatório.

Durante o voo normal de cruzeiro, o *loop* de controle do Sistema de Voo é realizado através do piloto automático, como ressaltado pela elipse mostrada na Figura 18 (página 66). O primeiro evento de desigualdade em uma equação de restrição é o relatado no fato 17, o congelamento dos *pitots* (fato 15), seguido do desacoplamento do piloto automático e do controle automático de potência (fato 16), todos apresentados no Quadro 9, (página 85). A Equação XI, ressaltada no Quadro 11, representa esta desigualdade.

O congelamento dos *pitots* apenas alterou o estado do subsistema Aeronave (x_a) de uma maneira prevista nos manuais de voo: a perda das indicações de velocidade seguidas da mudança das leis de controle de voo para “alternada 2B”. Causou, também, a desconexão do piloto automático, o que mudou *loop* de controle em uso no Sistema de Voo.

Com a utilização do *loop* de controle manual, o subsistema de controle “ativo” do Sistema de Voo torna-se o piloto em comando (PAC, *pilot at controls*). O piloto automático, quando engajado, realiza este controle “ativo” baseado na programação realizada pelos pilotos.

Os pilotos identificaram prontamente que havia um problema e assumiram o controle manual do avião, passando a pilotá-lo através do *loop* de controle manual (Figura 18, p.66, ressaltado pelo retângulo amarelo), conforme mostrado nos fatos 19, 27 e 28 (Quadro 8) das interações previstas que ocorreram corretamente conforme descritas pelas equações de restrição. Até o choque com o mar, todos os *inputs* dos pilotos geraram os corretos *outputs* nas superfícies de comando e a aeronave assumiu a trajetória de voo correspondente.

Resumidamente, o AF447 estava “pilotável”. Com alguma degradação das proteções das leis de controle, é fato, mas ainda assim, o congelamento dos tubos de *pitot* não tornou o acidente inevitável, mas mudou a forma de controle do Sistema de Voo.

O fato de os pilotos não terem sido treinados para pilotagem manual com a lei de controle “Alternada 2B” no simulador de voo (fato 23, Quadro 7, p.83, variável de estado de P_1 e P_2) e do treinamento teórico associar o *buffeting* erroneamente com a situação de sobrevelocidade (fato 36, Quadro 9, desigualdades nas equações de restrição), contribuíram para que os *inputs* de comando realizados fossem inadequados (apesar de corretamente executados pela aeronave).

O *loop* de controle manual também sofreu interferência das informações disponíveis para os pilotos sobre o estado do subsistema Entorno ambiental (x_e), conforme mostra a análise da Equação VIII no Quadro 11. Os fatos 18, 22, 24, 31 e 40 são todos relativos a informações que não estavam disponíveis para os pilotos ou foram mostradas de forma não-confiável (errônea ou intermitente). O efeito causado nos pilotos alterou seu estado (x_{P1} e x_{P2}), fazendo com que os mesmos não reconhecessem a

situação em que se encontrava o subsistema A em relação ao subsistema E. O avião entrou em estol de forma inadvertida por causa da inadequação do estado dos subsistemas de controle P₁ e P₂.

A aplicação do modelo para análise do acidente ressalta a falta de especificidade do fato 42 (Quadro 9): “O PNF (*pilot not flying / pilot monitoring*) solicitou correções de trajetória de voo imprecisas. Estas eram, contudo, essenciais e suficientes para a gestão em curto prazo da situação”. Ou seja, solicitações precisas para a correções de trajetória eram essenciais e suficientes para evitar o acidente. Este fato 42 está ligado à desigualdade na Equação de conformidade VI, conforme mostrado no Quadro 11.

A pesquisa do relatório de investigação para detalhar este “fato 42” mostrou outros dois fatos que não foram ressaltados pelos investigadores em suas conclusões:

a) os *inputs* de subida realizados pelo P₁ no *sidestick*, não foram verbalizados por este para o P₂ (FRANCE, 2012, p, 173); e

b) Os *inputs* aplicados em um *sidestick* por um piloto não podem ser observados facilmente pelo outro piloto (FRANCE, 2012, p, 174).

A Figura 23 mostra (ressaltado pelo número 4 e pela ligação em cor vermelha) a função de monitoramento realizada pelo P₂ (*pilot monitoring*). Ambos os fatos citados acima mostram outra desigualdade que ocorreu na Equação de restrição V: o P₂ não podia saber a trajetória adotada pela aeronave estava perfeitamente congruente com os *inputs* realizados pelo P₁; sendo, assim, inibido de realizar a sua função de monitoramento de uma forma completa.

Este fato, que não foi relacionado nos “*findings*” do relatório de acidente, possui implicações ergonômicas ligadas a uma característica básica do projeto dos aviões da Airbus: o fato de os *sidesticks* terem movimentos independentes um do outro e de ambos ficarem nas laterais da cabine faz com que um piloto não saiba o que o outro está fazendo no comando básico de pilotagem da aeronave.

Aviões e helicópteros que possuem duplo comando têm, normalmente, o movimento destes comandos sincronizados de forma permanente. Os manches, pedais e manetes dos motores (nos aviões) e os comandos de cíclico, coletivo e pedais (nos helicópteros) são ligados mecanicamente por hastes que passam sob o piso da cabine. Desta forma, basta olhar para o comando de voo do seu posto de pilotagem, ou apoiar a

mão sobre ele, para saber o que está sendo feito pelo outro piloto. A reação básica mais instintiva de um piloto ao ver o nariz de sua aeronave em posição excessivamente alta é, observando que o manche está puxado para trás, empurrá-lo de volta para frente. Não vendo que o que está provocando o estol do avião é a atitude excessivamente cabrada que está sendo comandada pelo P₁, o P₂ não consegue entender o porquê daquela atitude da aeronave, ficando sem ação.

Soluções possíveis para este problema são: a adoção de uma representação pictorial da posição do comando de voo que está ativo na tela do outro piloto (por meio de uma mudança de *software* na aeronave) ou a adoção de um procedimento de gerenciamento de recursos de cabine no qual um piloto informe ao outro a atuação que está realizando no comando de voo (por meio da criação de procedimento operacional e adequação do treinamento dos pilotos).

5.3 DIFERENCIAL CIENTÍFICO DO MODELO

Esta aplicação do modelo de Sistema de Voo em um acidente real mostra que é possível localizar cada fato observado na investigação com grande precisão no modelo. Os fatos internos a cada Subsistema componente estão localizados nas variáveis de estado correspondentes ao respectivo subsistema. E os fatos relativos à interação entre os subsistemas estão localizados nas equações de restrição que regem a interação entre os mesmos.

Esta aplicação pioneira alcançou o objetivo de mostrar a adequação da Teoria Geral dos Sistemas para a construção de um modelo conceitual simbólico útil para a investigação de acidentes. A aplicação mostrou, também, que todos os fatos puderam ser mostrados no modelo, independentemente dos mesmos serem referentes à psicologia dos pilotos, ao treinamento, ao projeto, construção e manutenção da aeronave ou mesmo à meteorologia surgida em rota. Os fatos abordados por cada uma das ciências envolvidas na investigação foram unificados no Diagrama funcional do Sistema de Voo de forma objetiva e clara, facilitando a visão integral da ocorrência,

A visualização do modelo conceitual simbólico do Sistema de Voo e das suas equações de restrição permitiu que, através da análise do *loop* de controle e das variáveis de estado de todos os subsistemas componentes, fosse encontrado um fato relevante para o acidente dentro do próprio relatório final do acidente, emitido pela

autoridade francesa. Tal achado é relevante pois um fato que não esteja relacionado nos “findings” não terá uma recomendação de segurança de voo para a mitigação do risco ligado ao mesmo.

O modelo mostrou-se flexível o bastante para acomodar todos os fatos listados no relatório de investigação em um único diagrama, mostrando em um gráfico único as contribuições das diversas áreas que compõem uma investigação de acidente aéreo. Tal característica, única deste modelo, é ressaltada na figura 26.

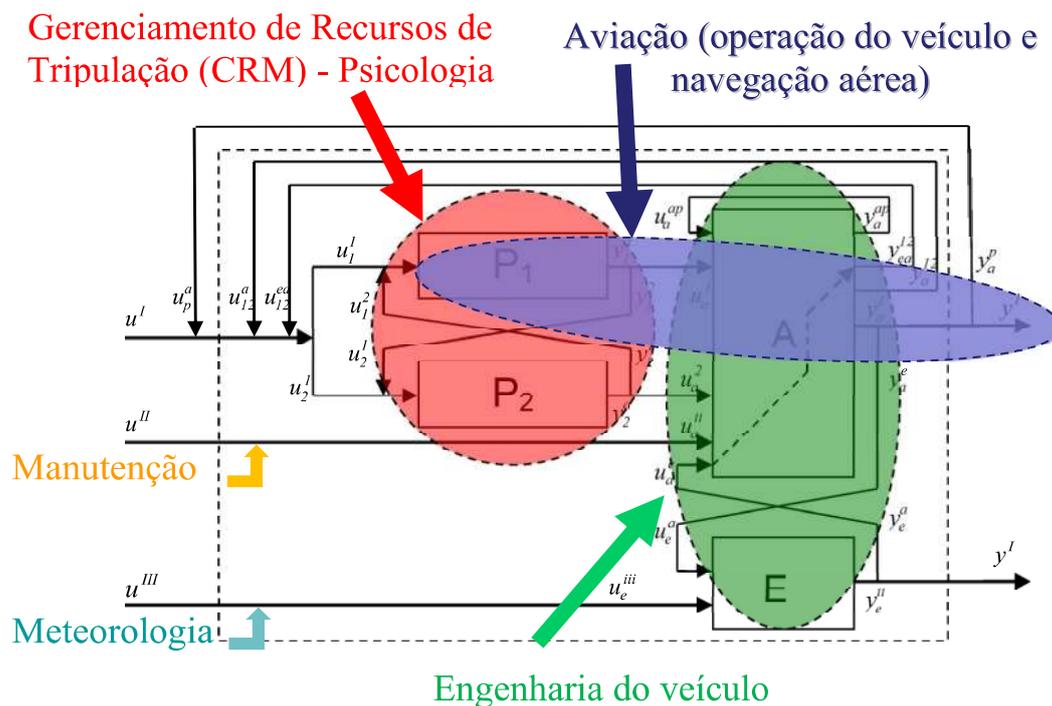


Figura 26: Contribuições das diversas áreas que compõem uma investigação de acidente aéreo mostradas simultaneamente no Diagrama funcional do Sistema de Voo.

A prática em utilizar o modelo em mais acidentes poderá tornar sua aplicação mais rápida, fácil, atendendo ao objetivo proposto de dotar os investigadores com um modelo rigoroso e preciso, que os auxilie de forma útil.

6 CONCLUSÃO

6 CONCLUSÃO

O objetivo desta tese é oferecer uma contribuição original à investigação de acidentes aeronáuticos na forma de uma ferramenta de auxílio aos investigadores para a análise dos casos de perda de controle de voo.

Uma vez que a classe dos modelos sequenciais de acidentes não alcança a complexidade das ocorrências vistas no mundo atual e a classe dos modelos epistemológicos é generalizante e estes não são eficientes para o estudo de casos considerados eventuais, como os acidentes aéreos. Por sua vez, a classe dos modelos sistêmicos, considerada pela literatura mais recente, como a mais adequada para aplicação no cenário de complexidade do mundo contemporâneo, carece de um modelo com precisão e especificidade, capaz de atender à demanda dos acadêmicos e técnicos de investigação de acidentes.

A tese busca sustentação científica na Teoria Geral dos Sistemas, a qual é adequada para servir de base para o modelo, haja vista que uma investigação de acidente aeronáutico estuda o evento por meio da visão de diversas ciências particulares: engenharia, psicologia, medicina, meteorologia e outras, além de incorporar o conhecimento específico da aviação e da teoria de voo. Cada uma dessas áreas do conhecimento possui seus próprios modelos específicos, baseados em suas teorias e são, em sua maioria, impróprios para a utilização nas outras áreas envolvidas.

O Sistema de Voo foi criado em uma concepção de “nave”, na qual todos os elementos necessários ao voo estão incluídos no modelo. Composto pelos subsistemas P_1 e P_2 , pilotos elementos humanos de controle do sistema, pelo subsistema A, a aeronave propriamente dita, e pelo subsistema E, que é o Entorno ambiental em interação direta com a aeronave. O Sistema de Voo efetua trocas com o ambiente através de três entradas, uma para cada subsistema, e duas saídas, representando o movimento da aeronave no espaço aéreo e a turbulência gerada pela sua passagem.

O modelo é descrito por meio de um diagrama funcional, que simboliza os subsistemas como caixas interligadas pelas interfaces de restrição, e das equações de restrição, que estabelecem as igualdades entre as diversas entradas e saídas do sistema.

A comparação do modelo com a teoria de Reason mostra que as desigualdades nas equações de restrição são equivalentes às falhas ativas e que as variáveis de estado dos subsistemas componentes incorporam as falhas latentes, embarcando-as na “nave”.

Em relação ao modelo SHELL, o modelo do Sistema de Voo criado com base na Teoria Geral do Sistema, mostra as mesmas interfaces entre os subsistemas, porém de forma estruturada, o que o torna mais preciso e específico. Em relação ao STAMP, são mostradas as semelhanças e diferenças, nas quais se ressaltam a especificidade do modelo proposto para a aplicação em acidentes aeronáuticos e a adesão do mesmo às ferramentas teóricas da TGS.

A aplicação do modelo efetuada no estudo de caso teve por objetivo mostrar a utilização prática do mesmo em um acidente aeronáutico de grande porte e de estrutura complexa. Esta aplicação serve de estudo de caso e possibilita uma exemplificação prática da utilização do modelo em caso real.

O estudo de caso mostra a utilidade do diagrama em mapear, em um único modelo, todas as interações entre os subsistemas. Os fatores contribuintes para o acidente foram mostrados como desigualdades nas equações de restrição e, a despeito de serem estudados em particular por ciências distintas, todos puderam ser unificados no mesmo diagrama. O efeito cascata da teoria do dominó também pode ser observado, nas interações sucessivas das equações de restrição e as variáveis de estado dos subsistemas componentes.

Como resultados práticos da aplicação do modelo foram identificados dois fatores contribuintes para o acidente que não estão relacionados nos “*findings*” do relatório de investigação, não tendo sido, então, alvos de recomendação de segurança de voo que pudesse mitigar as suas influências em uma futura ocorrência indesejada.

O trabalho desta tese, como uma contribuição original ao campo da Engenharia dos Transportes, mostra a aplicabilidade da Teoria Geral dos Sistemas para a modelagem de um Sistema de Voo útil para a investigação de acidentes. Mostra, também, a possibilidade de um modelo singular unificar as observações de engenheiros aeronáuticos e de *software*, psicólogos, médicos, meteorologistas e aviadores.

Uma limitação desse trabalho de pesquisa é a aplicação do modelo criado apenas em um acidente, no estudo de caso, havendo a necessidade de mais aplicações em outros acidentes para o aperfeiçoamento do modelo. Além disso, o modelo foi construído com a limitação de ser aplicável apenas a acidentes ocorridos com uma aeronave isolada com perda de controle em voo, não cabendo, inicialmente, sua utilização para acidentes com grandes influências dos serviços de tráfego aéreo ou

infraestrutura aeroportuária ou que envolvam mais de uma aeronave. Também não estão representados de forma explícita os passageiros ou a carga transportada, tampouco os demais tripulantes possíveis de compor uma tripulação comercial: mecânicos de voo, comissários de bordo, tripulantes especiais e outros. Não são abordados os atos ilícitos, como os sequestros de aeronaves.

Também é limitação do modelo a dependência de utilização do mesmo utilizando-se uma visão sistêmica da ocorrência. Sua utilidade e eficiência são relacionadas à capacidade do investigador em classificar os fatos descobertos pela investigação dentro dos conceitos de subsistema, estado do subsistema e interface de restrição. A classificação de cada um dos fatos dentro destes conceitos próprios da Teoria Geral dos Sistemas está relacionada com o entendimento dessa base teórica pelos aplicadores do modelo.

De forma diversa do modelo STAMP, que busca analisar todos os níveis do controle sócio-técnico até os controles regulatórios mais distantes representados pela legislação nacional, o modelo de Sistema de Voo foca na atuação dos subsistemas presentes no voo, seguindo o conceito da hipótese de nave. Assim, também é uma limitação desse modelo sua aplicação para a análise dos fatos e inter-relações que ocorrem durante o voo. Todos os elementos dos níveis superiores de controle sócio-técnico que forem contribuintes para a ocorrência estarão presentes na análise como condições latentes representadas nas variáveis de Estado dos subsistemas.

O futuro desenvolvimento da teoria e das técnicas aqui descritas, com aplicação em outros tipos de acidentes aeronáuticos além dos acidentes com perda de controle em voo, possibilitará uma maior compreensão multidisciplinar dos acidentes aeronáuticos enquanto fenômeno. Quanto maior a interação contínua dos diversos campos da ciência interessados na investigação e prevenção dos acidentes, maior será a compreensão mútua e a eficácia dos trabalhos conjuntos.

Os possíveis desdobramentos dessa pesquisa são a aplicação do modelo em um maior número de acidentes, e o treinamento de investigadores de acidentes aeronáuticos para a utilização do mesmo em campo. Aplicações sucessivas do método utilizado servirão para a consolidação da sua estrutura, podendo ensejar modificações e adaptações. Da mesma forma, um estudo da eficácia do método para aumentar a eficiência dos investigadores necessita de um maior número de aplicações do mesmo.

Esta pesquisa poderá também servir de exemplo para a aplicação de técnicas semelhantes para a criação de modelos em outros campos do saber interessados na investigação e prevenção de acidentes, tanto dentro quanto fora da engenharia de transportes. Registra-se, então, a proposição de trabalhos futuros que possam criar modelos para a investigação de acidentes marítimos, ferroviários, rodoviários etc.

Da mesma forma, especialistas em outros ramos da engenharia podem pesquisar a aplicabilidade da TGS para a criação de modelos em estações geradoras de energia, plantas petrolíferas e instalações similares, com grande interação homem-tecnologia.

Da mesma forma, o rigor metodológico da TGS possibilita a criação de ferramentas informatizadas que utilizem análise sintática para a adequação de situações descritas verbalmente possam ser automaticamente encaixadas nos modelos conceituais simbólicos propostos para as diversas situações.

Em resposta à pergunta de Reason (2006) se o pêndulo da responsabilização afastou-se longe demais, esta pesquisa leva à conclusão que: pilotos são responsáveis pela condução segura de uma aeronave através da atmosfera. Mas organizações são responsáveis por conseguir que estes pilotos estejam com um estado de preparação adequado para lidar com as situações, que as informações necessárias sejam captadas pelos sensores e transmitidas de forma oportuna aos pilotos e que o estado da manutenção das suas aeronaves sempre as deixe “pilotáveis”.

Nas palavras de Reason (2008, p.136): “Os modelos causais de acidente só podem ser julgados pela capacidade de suas aplicações em reforçar a segurança dos transportes”.

REFERÊNCIAS

REFERÊNCIAS

- ASHBY, W Ross. **An Introduction to Cybernetics**. London: Chapman & Hall, 1956. Internet (1999): <http://pcp.vub.ac.be/books/IntroCyb.pdf>
- AZAMBUJA, Ricardo Alencar. **Teoria geral de sistemas**. Blumenau: Universidade Regional de Blumenau. Centro de Ciências Exatas e Naturais. Departamento de Sistemas e Computação, 2004. Apostila. Revisão de 31/01/2004.
- BALLESTERO ALVAREZ, Maria Esmeralda. **Manual de Organização Sistemas e Métodos**. Rio de Janeiro: McGraw Hill, 1990.
- BALLESTEROS, J.S.A. **Improving air safety through organizational learning**. Madrid: Quasar Aviation, 2007.
- BENNER. Accident theory and accident investigation. **Proceedings of the Society of Air Safety Investigators annual seminar**. Ottawa, Canada, oct. 7-9, 1975.
- BERTALANFFY, L. Von. **General System Theory**. New York: George Braziller, 1968.
- BRASIL. Comando da Aeronáutica. Centro de Investigação e Prevenção de Acidentes Aeronáuticos. **Panorama estatístico da aviação civil brasileira**. FCA 58-1. Brasília: CENIPA, 2015.
- BRASIL. Comando da Aeronáutica. Estado-Maior da Aeronáutica. **Investigação de acidente aeronáutico, incidente aeronáutico e ocorrência de solo**. NSCA 3-6. Brasília: CENIPA, 2013.
- BRASIL. Comando da Aeronáutica. Estado-Maior da Aeronáutica. **Manual de Investigação de Acidentes Aeronáuticos**. MCA 3-6. Brasília: CENIPA, 2011.
- BRASIL. Comando da Aeronáutica. Estado-Maior da Aeronáutica. **Panorama estatístico da aviação civil brasileira**. FCA 58-1. Brasília: CENIPA, 2014a.
- BRASIL. Comando da Aeronáutica. Estado-Maior da Aeronáutica. **Protocolos de investigação de ocorrências aeronáuticas da aviação civil conduzidas pelo estado brasileiro**. NSCA 3-13. Brasília: CENIPA, 2014b.
- BUNGE, Mario. A general black-box theory. In: **Philosophy of Science**. Vol. 30, n. 4, 1963, pp. 346-358.
- CENIPA. Relatório Final de Acidente com a aeronave FAB 1320 ocorrido em 16 novembro de 1996, Santos-SP. Brasília, DF: CENIPA, 1997.
- CHANUTE, Octave. **Progress in flying machines**. New York: The American Engineer and Railroad Journal, 1894. Reimpressão, 1997.
- CHAVES, Mario M. **Complexidade e transdisciplinaridade: uma abordagem multidimensional do setor saúde**. Rio de Janeiro: [s.n.], 1998.
- CHIAVENATO, Idalberto. **Introdução à Teoria Geral da Administração**. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1983. 3. ed.
- CHILES, James R. **The God machine**. From boomerangs to Black Hawks: the story of the helicopter. New York: Bantam, 2007.
- COWLAGI, Raghvendra; SALEH, Joseph. Coordinability and consistency in accident causation and prevention: formal system theoretic concepts for safety in multilevel systems. In: **Risk Analysis**. Vol. 33, n. 3. Society for Risk Analysis, 2013.

DE CARVALHO, P.V.R., The use of functional resonance analysis method (FRAM) in a mid-air collision to understand some characteristics of the air traffic management system resilience. In: **Reliability Engineering & System Safety**. 2011. n. 96. p. 1482–1498.

DEKKER, S. **Drift into failure: from hunting broken components to understanding complex systems**. Farnham: Ashgate, 2011.

DIAS, Donaldo de Souza; GAZZANEO, Giosafatte. **Projeto de Sistemas de Processamento de Dados**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1975.

DISMUKES, R.; BERNAN, B.; LOUKOPOULOS, L. **The limits of expertise: rethinking pilot error and the causes of airline accidents**. Surrey, UK: Ashgate Publishing, 2007.

DRACK, Manfred; SCHWARZ, Gregor. Recent developments in General System Theory. In: **Systems Research and Behavioral Science Journal**. [S.l.]: Wiley Online Library. May 2010. n. 27. p. 601-610.

FAJER, M.; ALMEIDA, I.M.; FISCHER, F.M. Fatores contribuintes aos acidentes aeronáuticos. In: **Revista Saúde Pública**. São Paulo: USP. v. 45, n.2, p.432-435, 2011.

FAVRE, R. **L'Homme et les Catastrophes**. Paris: Ed. SPEI, 1966.

FERRY, T.S. **Modern accident investigation and analysis**. Second edition, New York: Wiley, 1998.

FRANCE. BUREAU D'ENQUÊTES ET D'ANALYSES POUR LA SÉCURITÉ DE L'AVIATION CIVILE. **Final report on F-GZCP 1st June 2009**. Paris: BEA, 27 July 2012.

FREITAS, K. P. O treinamento como barreira para o acidente. In: **8º Simpósio de Segurança de Voo**. São José dos Campos: Instituto de Pesquisas e Ensaios em Voo, anais, 2015. p. 767-868.

FROGATT, P; SMILEY, James A. **The concept of accident proneness: a review**. In: *British Journal of Industrial Medicine*. 21, 1. 1964.

HALLION, Richard P. **Taking flight: inventing the aerial age from antiquity through the first world war**. Oxford: University Press, 2003.

HAWKINS, F. H. **Human factors in flight**. Brookfield: Gower Publishing Company, 1987.

HEINRICH, H.W. **Industrial accident prevention**. New york: McGraw Hill, 1936.

HEINRICH, H.W.; PETERSON, D.; ROOS, N. **Industrial accident prevention**. New york: McGraw Hill, 1980. 5TH ED.

HELMREICH, R. L. **Building safety on the three cultures of aviation**. Proceedings of the IATA human factors seminar. p. 39 – 43. 1999.

HOLLNAGEL, E. **Barriers and accident prevention**. Hampshire: Ashgate, 2004.

HOLLNAGEL, E. **Human reliability analysis: context and control**. Oxford: Academic Press, 1993. 326 p.

HOLLNAGEL, E. **Understanding accidents: from root causes to performance variability**. IEEE 7TH Human Factors Meeting. Scottsdale (AZ), 2002.

- HOUSTON, S.J.; WALTON, R.O.; CONWAY, B.A. Analysis of general aviation instructional loss of control accidents. In: **Journal of Aviation/Airspace Education & Research**. Daytona Beach: Embry-Riddle Aeronautical University. V.22. n.1. 2012.
- INTERNATIONAL ERGONOMICS ASSOCIATION. Definição Internacional de Ergonomia. In: **Ação Ergonômica**. Revista Brasileira de Ergonomia. v.3, n.2. 2008.
- INTERNATIONAL CIVIL AVIATION ORGANIZATION. **Aircraft accident and incident investigation**: international standards and recommended practices. Annex 13 to the Convention on International Civil Aviation. 10th ed. July 2010.
- KALMAN, R.E.; FALB, P.L.; ARDIB, M.A. **Topics in mathematical system theory**. Pure & applied mathematics series. New York: McGraw-Hill, 1969.
- KJELLEN, U. **Prevention through experience feedback**. London: Taylor & Francis, 2000.
- KJELLEN, U. **The deviation concept in occupational accident control**. Definition and classification. In: Accident Analysis and Prevention. 1984; 16(4): 289-306.
- LADKIN, Peter ; LOER, Karsten. **Analyzing aviations accidents using WB-Analysis**: an application of multimodal reasoning. AAI Technical Report SS-98-04. Palo Alto: AAI, 1998.
- LEVESON, Nancy G. **A new approach to system safety engineering**. Massachusetts: Institute of Technology, 2002.
- LEVESON, Nancy G. A new accident model for engineering safer systems. In: **Safety Science**. 2004. n. 42, p. 237–270.
- LEVESON, Nancy G. **Engineering a Safer World**: systems thinking applied to Safety. Cambridge: MIT Press, 2011.
- LEVESON, Nancy G. **Safeware**: system safety and computers. Boston: Addison&Wesley, 1995.
- LEVY, Y.; ELLIS, T.J. A system approach to conduct an effective literature review in support of information systems research. **Informing Science Journal**, 2006, v.9, p.181-212.
- LIMA, Jackson Lauffer. **Aplicabilidade de critérios de qualidade de pilotagem para operações de resgate e aeromédicas na aviação de segurança pública brasileira**. Dissertação de Mestrado. Instituto Tecnológico de Aeronáutica. 2012.
- LIN, Fuyong; CHENG, T.C. Edwin. The structural model of general systems and its proof. In: **Kybernetes**, 1998. v. 27. n.9. p. 1062 – 1074.
- MARAIS, Karen; DULAC, Nicolas; LEVESON, Nancy G. **Beyond normal accidents and high reliability organizations**: the need for an alternative approach to safety in complex systems. Cambridge: MIT, 2004. Disponível em: <http://sunnyday.mit.edu/papers/hro.pdf>
- MICHALES, A.S. Contributing factors among fatal loss of control acidentes in multiengine turbine aircraft. In: **Aviation Technology Graduate Student Publications**. West Lafayette: Purdue University. Department of Aviation Technology. 2012.
- NICOLESCU, Basarab. **La transdisciplinarité-manifeste**. Paris: Éditions du Rocher, 1996.

- NOBRE, Chico. **Alguns conceitos da Teoria Geral dos Sistemas (TGS)**. 2011. Disponível em: <<http://chico-nobre.blogspot.com.br/2011/11/alguns-conceitos-da-teoria-geral-de.html>>. Acesso em: 18/09/2014.
- OSTER, Clinton V. Jr.; STRONG John S.; ZORN, C. Kurt. Analyzing aviation safety: problems, challenges, opportunities. **Research in Transportation Economics**. [S.l.]: Elsevier, 2013.
- PEREIRA, A. L. **Notas de aula**. PET/COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, 2008. Apresentação em PowerPoint.
- PEREIRA, A. Lopes ; ALMONACIO, H. A. ; PEREIRA, A. L. L. ; CLEIMAN, D. F. . Un Modelo Jerarquico de Control Basado En La Homeostasis Organizacional. In: **REVISTA INTERNACIONAL DE SISTEMAS**, v. 28, n.111, p. 49-61, 1991.
- PEREIRA, R.F.; MORGADO, C.R.V.; CARVALHO, P.V.R.; SANTOS, I.J.A.L. Pensamento sistêmico e engenharia de resiliência aplicados à segurança de processos de exploração e produção de petróleo: estudo de caso deepwater horizon. In: **Ação Ergonômica**. v. 10, n.1. Rio de Janeiro: ABERGO, 2015.
- PERROW, Charles. **Normal accidents with an afterword and postscript on y2k**. Princeton: University Press, 1999.
- PERROW, Charles. **Normal accidents: living with high-risk Technologies**. New York: Basic Books, 1984.
- PRINCE, Samuel Henry. **Catastrophe and social change: based upon a sociological study of the Halifax Disaster**. D.Sc. Thesis. New York, 1920. (eBook)
- PRUCHNICKI, Shawn A; WU, Lora J; BELENKY, Gregory. An exploration of the utility of mathematical modeling predicting fatigue from sleep/wake history and circadian phase applied in accident analysis and prevention: the crash of Comair Flight 5191. **Accident Analysis and Prevention**. [S.l.]: Elsevier, 2010.
- QURESCHI, Zahid H. **A review of accident modeling approaches for complex socio-technical systems**. University of South Australia, 2007. Disponível em: <http://crpit.com/confpapers/CRPITV86Qureshi.pdf>
- REASON, James. **Human error**. New York: Cambridge University Press, 1990.
- REASON, James. **Human factors: a personal perspective**. Human Factors Seminar. Helsinki, 13 Feb. 2006. (PowerPoint presentation).
- REASON, James. **Managing the risk of organizational accidents**. Aldershot: Ashgate, 1997.
- REASON, James. **The human contribution: unsafe acts, accidents and heroic recoveries**. Aldershot: Ashgate, 2008.
- RIBEIRO, S.L.O; PEREIRA, M.C. **Os voos da psicologia no Brasil: estudos e práticas na aviação**. Rio de Janeiro: DAC: NuiCAF, 2001.
- ROBERTSON, M. M. **Macroergonomic tools and strategies: an international overview**. *Proceedings of the H.F. Society 35th annual meeting*, p. 925-929, 1991.
- SALEH, J.H.; MARAIS, K.B.; BAKOLAS, E.; COWLAGI, R.V. Highlights from the literature on accident causation and system safety: review of major ideas, recent contributions, and challenges. In: **Reliability Engineering and System Safety**. [S.l.]: Elsevier, 2010. n. 95. p. 1105-1116.

SALMON, P.M., CORNELISSEN, M., TROTTER, M.J. Systems-based accident analysis methods: a comparison of Accimap, HFACS, and STAMP. In: **Safety Science**. 2012. n. 50, p. 1158–1170.

SCANLON, Joseph T. **Disaster's little known pioneer**: Canada's Samuel Henry Prince. *International Journal of Mass Emergencies and Disasters*. November 1988, vol. 6, No. 3, pp. 213-232.

SHAPPELL, Scott A.; WIEGMANN, Douglas A. **The human factors analysis and classification system – HFACS**. Washington, DC: Federal Aviation Administration. Office of Aviation Medicine, 2000.

Shaw, Jonathan. A schema approach to the formal literature review in engineering theses. **System**, 1995v.23, n.3, p.325-335.

SHERIDAN, T.B. **Telerobotics, automation, and human supervisory control**. Cambridge: MIT Press, 1992.

SHORROCK, S.; YOUNG, M.; FAULKNER, J. **Who moved my (swiss) cheese?**. *Aircraft and Aerospace*. January/February, 2003. p. 31-33.

SIMPSON, Elizabeth Jane. **The classification of educational objectives**: psychomotor domain. Urbana: University of Illinois, 1966.

SKLET, Snorre. **Comparison of some selected methods for accident investigation**. *Journal of Hazardous Materials*. No 111. p. 29-37. 2004.

SRIVASTAVA, P. **Bhopal**: anatomy of a crisis. London: Paul Chapman, 1992. 2^a ed.

STANTON, N.A., RAFFERTY, L.A., BLANE, A. Human factors analysis of accidents in systems of systems. In: **Journal of Battlefield Technology**. 2012. n.15, p.23–30.

STOOP, John. DEKKER, Sidney **Limitations of “swiss cheese” models and the need for a systems approach**. *Proceedings. ISASI*, 2010. p.52–59.

SUHIR, Ephraim. Human-in-the-Loop (HITL): Probabilistic Predictive Modeling (PPM) of an Aerospace Mission/Situation Outcome. In: **Aerospace**. ISSN 2226-4310. [S.l.]: 2014.

SVENSON, Ola. **Accident analysis and barrier function (AEB) method**: manual for incident analysis. SKI Report 00:6. Swedish Nuclear Power Inspectorate. Stockholm: University press, 2000.

UNDERWOOD, P., WATERSON, P. **Accident analysis Models and Methods**: guidance for safety professionals. Loughborough University, 2013a.

UNDERWOOD, P., WATERSON, P. Systemic accident analysis: examining the gap between research and practice. In: **Accident Analysis and Prevention**, 2013b. n 55, p.154-164.

VASCONCELLOS, Maria José Esteves de. **Pensamento sistêmico**: o novo paradigma da ciência. Campinas: Papirus, 2002.

VAUGHN, Diane. **The Challenger launch decision**: risky technology, culture, and deviance at NASA. Chicago: University of Chicago Press, 1996.

VILELA, João Alexandre B.; SAMPAIO, Rodolfo dos Santos. Utilização do modelo de fatores humanos (HFACS) na estruturação de mapas causais de segurança operacional. In: **Revista Conexão SIPAER**. Brasília: CENIPA, v.3, n.1, nov. 2011.

VUORIO, Alpo; RANTONEN, Jarmo; JOHNSON, Christopher; OLLILA, Tapani; SALMINEN, Simo; BRAITHWAITE, Graham. What fatal occupational accident investigators can learn from fatal aircraft accident investigations. In: **Safety Science**. [S.l.]: Elsevier, 2014. n. 62. p. 366-369.

WOODS, D. D.; JOHANNESSEN, L.J.; COOK, R.L.; SARTER, N.B. **Behind human error**: cognitive systems, computers and hindsight. Columbus, CSERIAC, 1994.

ZEIGLER, Bernard P.; PRAEHOFER, Herbert; KIM, Tag Gon. **Theory of modeling and simulation**: integrating discrete event and continuous complex dynamic systems. New York: Academic Press, 2000.

ZHANG, Jiuxing; XU, Haojun; ZHANG, Dengcheng; LIU, Dongliang. Safety modeling and simulation of multi-factor coupling heavy-equipment airdrop. In: **Chinese Journal of Aeronautics**. Elsevier. Vol. 27. Issue 5. Oct. 2014. p 1062-1069.

GLOSSÁRIO

AERONÁUTICA: é a atividade e o estudo da locomoção aérea no interior da atmosfera terrestre, bem como dos meios utilizados para esse fim (aeronaves). Estão incluídos no seu escopo de atuação o projeto e fabricação de aeronaves, o sistema aeroportuário, de tráfego aéreo e navegação aérea, a investigação de acidentes bem como todas as atividades da aviação.

AVIAÇÃO: designa o conhecimento específico da operação de aeronaves mais pesadas que o ar, aí incluído a pilotagem de aviões e helicópteros bem como todas as atividades técnicas gerenciais voltadas para possibilitar a atividade dos aviadores (VIEIRA, 2010).

BUFFETING: é uma instabilidade em alta frequência, ocasionada por descolamento do fluxo aerodinâmico ou por oscilações de ondas de choque. Como exemplo da ocorrência do fenômeno, em aeronáutica é a oscilação irregular de uma parte da aeronave, causada pela turbulência.

EQUAÇÃO DE RESTRIÇÃO: é a representação matemática, no modelo do sistema, da forma de interação entre dois subsistemas. Todo modelo de sistema é desenhado de forma que a saída de um subsistema deve, por restrição definida na concepção do sistema, ser igual à entrada no subsistema ao qual está conectado. Se aquilo que deveria ser igual na concepção do sistema, não o for durante a prática do funcionamento do sistema, afirma-se que houve uma “desigualdade” na equação de restrição que representa a interface entre os subsistemas.

FATORES HUMANOS: Ergonomia (ou Fatores Humanos) é a disciplina científica relacionada com a compreensão das interações entre seres humanos e outros elementos de um sistema, e a profissão que aplica teoria, princípios, dados e métodos nos projetos a fim de otimizar o bem-estar humano e o desempenho sistêmico global. Ergonomistas contribuem para a concepção e avaliação de tarefas, trabalhos, produtos, ambientes e sistemas, a fim de torná-los compatíveis com as necessidades, habilidades e limitações das pessoas (INTERNATIONAL ERGONOMICS SOCIETY, 2008).

FLUTTER: é uma oscilação auto excitada que ocorre quando uma superfície sustentadora sofre deflexões (por conta de forças aerodinâmicas) tais que a carga total aplicada se reduz. A deflexão também se reduz, restaurando o carregamento aerodinâmico original, recomeçando o ciclo.