

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

Luiz Flávio Campos Dias

Título: Análise de confiabilidade do comando de voo da aeronave caça Tadarida
FTB – 17/2

São Carlos
2019

Luiz Flávio Campos Dias

Título: Análise de confiabilidade do comando de voo da aeronave caça Tadarida
FTB – 17/2

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Aeronáutica, da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Aeronáutico.

Orientador: Prof. Dr. Jorge Henrique Bidinotto

São Carlos
2019

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes da
EESC/USP com os dados inseridos pelo(a) autor(a).

C198a Campos Dias, Luiz Flávio
Análise de confiabilidade do comando de voo da
aeronave caça Tadarida FTB - 17/2 / Luiz Flávio Campos
Dias; orientador Jorge Henrique Bidinotto. São Carlos,
2019.

- Programa de e Área de Concentração em --
Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de
São Paulo, 2019.

I. Título.
1. Comando de voo. 2. Confiabilidade. 3. Sistemas.

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
Biblioteca Digital de Trabalhos Acadêmicos - BDTCC**

Eu, Luiz Flávio Campos Dias, nacionalidade Brasileiro nato, documento de identidade nº 18393149, CPF 11957934646, nº USP 9312407, na qualidade de titular dos direitos morais e patrimoniais de autor que recaem sobre o meu Trabalho de Conclusão de Curso, intitulado **Análise de confiabilidade do comando de voo da aeronave caça Tadarida FTB – 17/2**, com fundamento nas disposições da Lei nº 9.610, de 19 de fevereiro de 1998, **AUTORIZO** a Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo a publicar, em ambiente digital institucional, sem resarcimento dos direitos autorais, o texto integral da obra acima citada, em formato PDF, a título de divulgação da produção acadêmica de graduação e especialização, gerada pela Escola.

São Carlos, 25/11/2019

Assinatura: 
e-mail: luizflaviodias@live.com
Telefone: 35991829505

Tramitação na EESC/USP

A Biblioteca é responsável pela inclusão na BDTCC.

Orientador da Disciplina


Jorge Henrique Bidinotto

Liberado para submissão online em: ___ / ___ / ___

Biblioteca

Recebido em: ___ / ___ / ___ por

Disponível na BDTCC em: ___ / ___ / ___ por

FOLHA DE APROVAÇÃO

Candidato: Luiz Flávio Campos Dias

Título do TCC: Análise de confiabilidade do comando de voo da aeronave caça Tadarida FTB – 17/2

Data de defesa: 25/11/2019

Professores Responsáveis	Resultado
Professor Doutor Alvaro Martins Abdalla	 Aprovado
Instituição: EESC - SAA - USP	 Aprovado
Professor Doutor Jorge Henrique Bidinotto	 Aprovado
Instituição: - EESC - SAA - USP	

Coordenador do Curso de Engenharia Aeronáutica

Ricardo Afonso Angélico

Prof. Ricardo Afonso Angélico
Dept. de Eng. Aeronáutica EESC-USP
Nr. Funcional 3691286

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Luiz Gonzaga e Marta, pelo apoio e pela confiança que depositaram em mim.

Aos meus amigos de São Carlos, os quais fizeram esses cinco anos únicos com histórias, risadas e companheirismo.

Ao Prof. Dr. Jorge Henrique Bidinotto, que muito me ensinou contribuindo para o meu crescimento científico nas áreas de controle, aviônica e sistemas aeronáuticos.

Ao Prof. Dr. Álvaro Martins Abdalla, que muito me ensinou contribuindo para o meu crescimento científico na área de projetos de aeronaves.

Aos professores da Universidade de São Paulo que conheci, os quais contribuíram muito no meu desenvolvimento.

EPÍGRAFE

“Use a sua luz, mas diminua o seu brilho”

Lao Tsé

RESUMO

Dias, Luiz Flávio **Análise de confiabilidade do Comando de Voo da aeronave caça Tadarida FTB – 17/2.** 2019. XX f. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2019.

O propósito deste trabalho é analisar a confiabilidade do sistema de comando de vôo da aeronave caça Tadarida FTB – 17/2, a qual foi desenvolvida nas disciplinas SAA0200 e SAA0201, Projetos de Aeronaves I e II, em 2019 na Escola de Engenharia de São Carlos. Serão analisadas as confiabilidades dos sistemas de controle da superfície *Canard*, *Aileron* e Empenagem nos casos em que tais sistemas estão sob as condições mais críticas de operação. Será feito um desenvolvimento sobre a forma que se abordam questões de confiabilidade de sistemas aeronáuticos e serão apresentados os sistemas de controle utilizados na aeronave a ser estudada. Em seguida, serão analisadas as confiabilidades de cada um dos sistemas das superfícies mencionadas. O método utilizado na análise de confiabilidade é o Fault Tree Analysis (FTA). A partir dessa análise, visa-se propor modificações que aprimorem a integridade e disponibilidade dos sistemas estudados de forma a se obter uma confiabilidade dentro dos padrões aceitos para operação da aeronave.

Palavras-chave: Confiabilidade. Sistemas aeronáuticos. Sistemas de Controle. Falha Catastrófica.

ABSTRACT

Dias, Luiz Flávio **Reliability analysis of the flight command of the fighter Tadarida FTB – 17/2.** 2019. X f. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2019.

The purpose of this paper is to analyze the reliability of the flight control system of the Tadarida FTB - 17/2 fighter aircraft, was developed in SAA0200 and SAA0201, Aircraft Projects I and II, in 2019 at the São Paulo School of Engineering of São Carlos. The reliability of *Canard*, *Aileron* and Tail surface control systems will be analyzed where such systems are under the most critical operating conditions. A development will be made on the approach to reliability issues of aeronautical systems and will be presented the control systems used in the aircraft to be studied. Then the reliability of each of the surface systems mentioned will be analyzed. The method that will be used be used for reliability analysis is Fault Tree Analysis (FTA). From this analysis, we aim to propose modifications that improve the integrity and availability of the studied systems in order to obtain reliability within the accepted standards for aircraft operation.

Keywords: Reliability. Aircraft Systems. Control Systems. Catastrophic Failure.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Passageiros transportados na aviação nos últimos anos.....	31
Figura 2 – Número de acidentes fatais em voos comerciais por milhão de voos por ano.....	32
Figura 3 – Taxa de acidentes por região de operação ao redor do mundo.....	33
Figura 4 – Esboço do sistema de controle de uma superfície primária de acionamento da aeronave Tadarida FTB 17/2.....	35
Figura 5 – Esboço da primeira configuração considerada na análise de confiabilidade para cada superfície primária.....	38
Figura 6 - Esboço da primeira configuração considerada na análise de confiabilidade para cada superfície primária.....	39
Figura 7 - FTA da primeira configuração considerada na análise de confiabilidade para cada superfície primária.....	39
Figura 8 - Esboço da segunda configuração considerada na análise de confiabilidade para cada superfície primária.....	41
Figura 9 - FTA da segunda configuração considerada na análise de confiabilidade para cada superfície primária.....	42

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Representatividade de cada fase do voo no tempo de voo e na porcentagem de acidentes em aviação.....	33
Tabela 2 – Classificação de acidentes aeronáuticos segundo órgãos certificadores.....	35
Tabela 3 – Classificação de acidentes aeronáuticos segundo órgãos certificadores com valores admissíveis de probabilidades de falha.....	36

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

FAA	–	Federal Aviation Administration
FAR	–	Federal Acquisition Regulation
FTA	–	Fault Tree Analysis
MTBF	–	Medium Time Between Failure
V_1	–	Velocidade de início de cabragem na decolagem

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	31
1.1 O tema e sua importância.....	31
1.2 Objetivo.....	34
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	34
3 METODOLOGIA CIENTÍFICA E TECNOLÓGICA.....	37
4 DESENVOLVIMENTO DO PROJETO.....	38
5 ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	42
6 CONCLUSÕES.....	43
REFERÊNCIAS.....	45

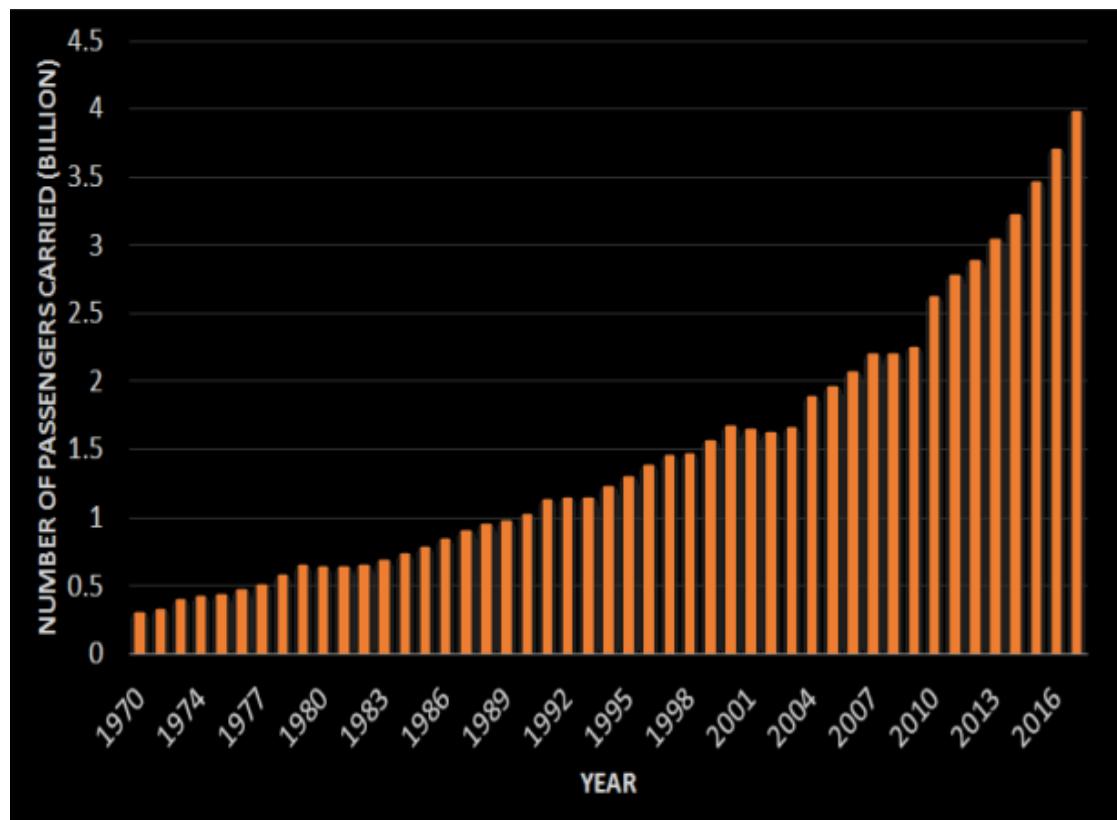
1 INTRODUÇÃO

O presente trabalho visa definir a arquitetura do sistema de comando de vôo da aeronave caça Tadarida FTB - 17/2 no nível de confiabilidade, baseado em análises de confiabilidade das diferentes configurações e possíveis redundâncias a serem implementadas no sistema de comando de voo da aeronave. O presente trabalho está vinculado à disciplina SAA0201 – Projetos de Aeronaves II da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo.

1.1 O tema e sua importância

A Análise de Sistemas Aeronáuticos é uma tarefa recorrente do Engenheiro Aeronáutico durante sua atuação profissional na indústria. A Autoridade Aeronáutica faz exigências quanto a confiabilidade de sistemas e os desafios vêm crescendo ao longo dos anos. A Figura 1 ilustra o porquê de os desafios estarem crescendo, que seria pelo fato de o número de passageiros transportados estar crescendo exponencialmente.

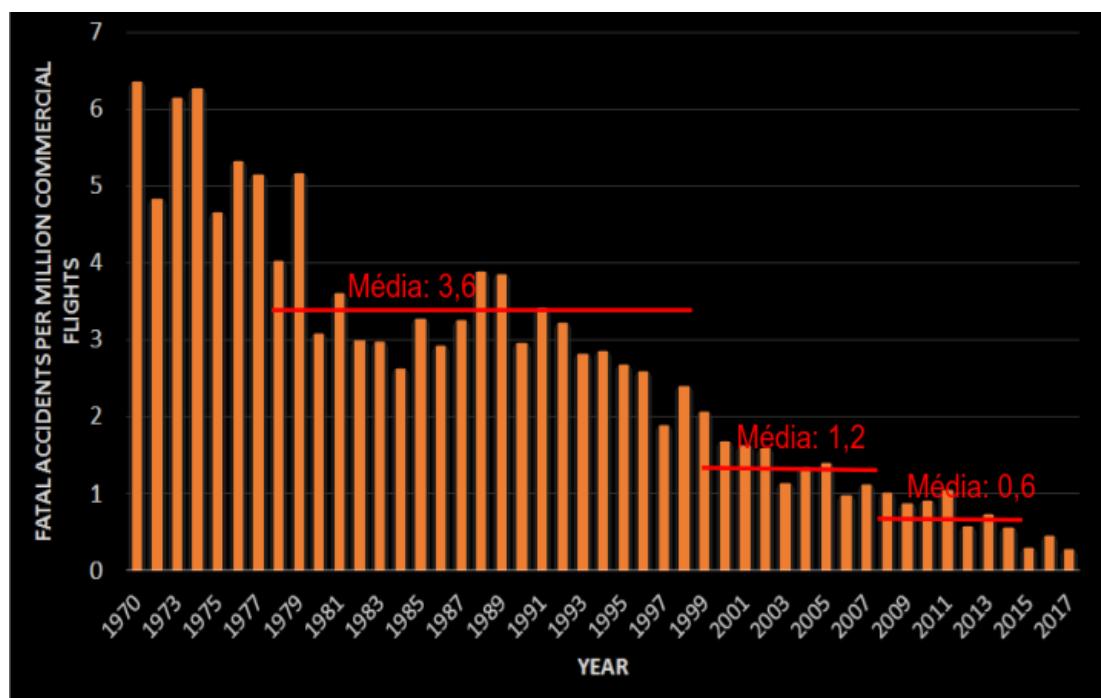
Figura 1 – Passageiros transportados na aviação nos últimos anos.



Fonte: Notas de aula do curso de Especialização em Sistemas Aeronáuticos do Departamento de Engenharia Aeronáutica da EESC-USP.

Em 1958 foi criado o FAA, ano que marcou a história da aviação devido ao surgimento da primeira autoridade aeronáutica até então. Logo em seguida, veio a criação dos FAR-23 e FAR-25 pelo FAA, os quais estão incorporados nas leis federais dos EUA. Com o passar dos anos outras autoridades surgiram ao redor do mundo. A severidade e o rigor com que tais órgãos vêm agindo desde então vem trazendo resultados na área de confiabilidade aeronáutica. A Figura 2 ilustra um reflexo desses resultados ao indicar o número de acidentes aeronáuticos fatais por milhão de voos comerciais por ano.

Figura 2 – Número de acidentes fatais em voos comerciais por milhão de voos por ano.



Fonte: Notas de aula do curso de Especialização em Sistemas Aeronáuticos do Departamento de Engenharia Aeronáutica da EESC-USP.

Entretanto vê-se que ainda ocorrem acidentes aeronáuticos e é neles que está o foco para aprimorar a abordagem de análise de sistemas aeronáuticos hoje em dia. Em relação às fases de voo, a que mais concentra acidentes é a etapa final da missão da aeronave, durante aproximação e pouso, embora represente uma pequena parte do tempo do voo. A Tabela 1

apresenta um detalhamento sobre a porcentagem que cada fase de voo representa no tempo de voo e a porcentagem de acidentes que ocorrem em cada uma delas.

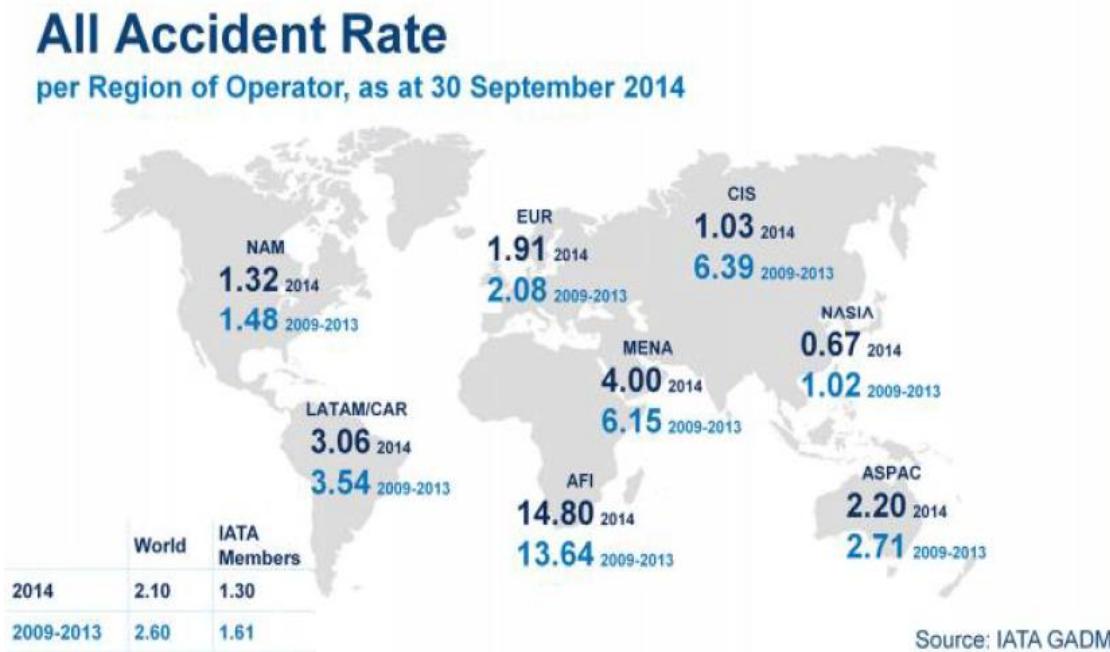
Tabela 1 – Representatividade de cada fase do voo no tempo de voo e na porcentagem de acidentes em aviação.

Fase do voo	Exposição [% do tempo do voo]	% de acidentes	Exposição [% do tempo do voo]	% de acidentes
Taxi	1	5,2	3	26,9
Decolagem	1	13,8		
Subida Inicial	1	7,9		
Subida	11	6,7	83	18,7
Cruzeiro	62	6,8		
Descida	10	5,2		
Aproximação Inicial	11	5,8	14	54,3
Aproximação Final	2	13,8		
Pouso	1	34,7		

Fonte: Notas de aula do curso de Especialização em Sistemas Aeronáuticos do Departamento de Engenharia Aeronáutica da EESC-USP.

Outro fato que chama a atenção no cenário da aviação mundial é a diferença das taxas de acidentes aeronáuticos ao redor do mundo. Como ilustra a Figura 3, América Latina, Oriente Médio e África apresentam taxas de acidentes aeronáuticos maiores que a média mundial.

Figura 3 – Taxa de acidentes por região de operação ao redor do mundo.



Fonte: Notas de aula do curso de Especialização em Sistemas Aeronáuticos do Departamento de Engenharia Aeronáutica da EESC-USP.

Tendo em vista a perspectiva histórica e o contexto atual da indústria aeronáutica, a necessidade de se desenvolver uma análise estruturada e bem fundamentada de todas as partes da aeronave é fundamental para aprimoramentos nos índices de confiabilidade aeronáuticos nos próximos anos.

1.2 Objetivo

O presente estudo complementa o trabalho desenvolvido ao longo das disciplinas SAA0200 e SAA0201, Projetos de Aeronaves I e II, na Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. Neste estudo, será analisada a arquitetura do sistema de comando de voo da aeronave caça Tadarida FTB – 17/2, a qual será trabalhada para aprimorar sua confiabilidade, disponibilidade operacional e integridade nas condições de operação mais críticas para cada uma das superfícies de controle, *Canard*, *Aileron* e empenagem.

O desenho da arquitetura do sistema de comando de voo dessa aeronave visa minar falhas catastróficas durante a operação da aeronave em condições críticas de voo. Dado que se trata de uma aeronave caça com perfil multimissão, tal estudo é extremamente relevante, por se tratar de uma aeronave que está sujeita a diversas condições extremas de voo em sua operação.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Para se compreender o contexto da análise de confiabilidade de aeronaves, é importante trazer a classificação de acidentes aeronáuticos segundo órgãos certificadores. Tal classificação é indicada na Tabela 2.

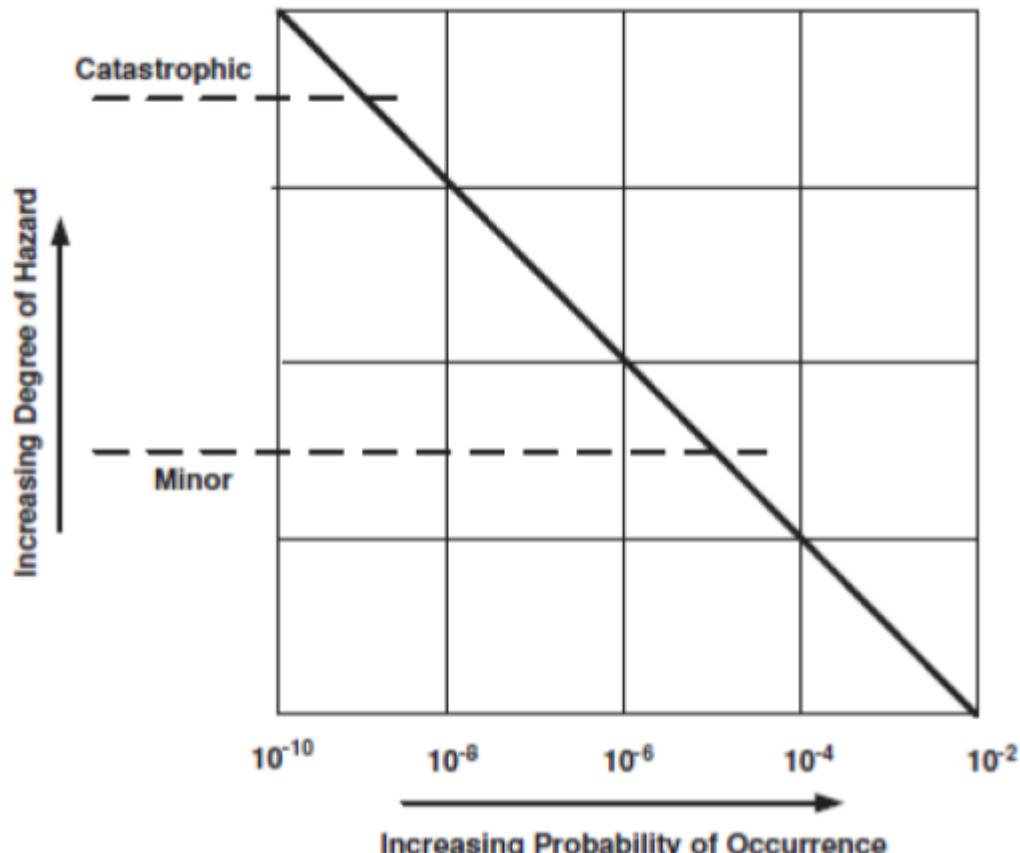
Tabela 2 – Classificação de acidentes aeronáuticos segundo órgãos certificadores.

Tipo	Efeito sobre a aeronave	Efeito sobre a tripulação	Efeito sobre os ocupantes
No safety effect	-	-	-
Minor (classe I)	Pequeno prejuízo na capacidade	Leve aumento da carga de trabalho	Efeitos físicos, mas sem ferimentos
Major (Classe II)	Pequena limitação	Redução da habilidade	Ferimentos leves
Hazardous (Classe III)	Grande limitação	Aumento da carga de trabalho a ponto de a tripulação não ser capaz de efetuar suas tarefas eficazmente	Ferimentos graves e/ou morte de pequena parcela dos ocupantes
Catastrophic (Classe IV)	Perda total	Perda total	Morte de parcela considerável dos ocupantes

Fonte: Notas de aula do curso de Especialização em Sistemas Aeronáuticos do Departamento de Engenharia Aeronáutica da EESC-USP.

Tendo em vista essa classificação, o FAA ainda impõe valores máximos para as chances de falha por hora de voo para cada uma das classificações. Conforme a classificação passa de *Minor* para *Catastrophic*, o requisito quantitativo de probabilidade de falha do sistema é reduzido. Tais valores podem ser verificados na Tabela 3 e na Figura 4.

Figura 4 – Probabilidades de falha por hora de voo aceitas para falhas do tipo *Catastrophic* e *Minor*.



Fonte: Notas de aula do curso de Especialização em Sistemas Aeronáuticos do Departamento de Engenharia Aeronáutica da EESC-USP

Tabela 3 – Classificação de acidentes aeronáuticos segundo órgãos certificadores com valores admissíveis de probabilidades de falha.

EFFECT ON AIRCRAFT AND OCCUPANTS	Normal	Nuisance	Operating limitations; emergency procedures	Significant reduction in safety margins: difficult for crew to cope with adverse conditions; passenger injuries	Large reduction in safety margins; crew extended because of workload or environmental conditions; serious injury or death of small number of occupants	Multiple deaths; usually with loss of aircraft	EFFECT ON AIRCRAFT AND OCCUPANTS
FAR 25 PROBABILITY							FAR 25 PROBABILITY
JAR 25/CS PROBABILITY							JAR 25/CS PROBABILITY
FAILURE RATE (per flight hour)	10^{-3}	10^{-5}	10^{-7}	10^{-9}			FAILURE RATE (per flight hour)
CATEGORY OF EFFECT							CATEGORY OF EFFECT

The diagram shows three horizontal scales for accident classification:

- FAR 25 Probability:** From PROBABLE (left) to EXTREMELY IMPROBABLE (right).
- JAR 25/CS Probability:** From FREQUENT (left) to EXTREMELY IMPROBABLE (right).
- Failure Rate (per flight hour):** From 10^{-3} (left) to 10^{-9} (right).
- Category of Effect:** From MINOR (left) to CATASTROPHIC (right).

Arrows indicate the correspondence between the columns of the table and these scales.

Fonte: Notas de aula do curso de Especialização em Sistemas Aeronáuticos do Departamento de Engenharia Aeronáutica da EESC-USP.

Como o FAA é referência na área de legislação aeronáutica e foi pioneiro ao propor essa classificação de acidentes aeronáuticos, o padrão feito pela autoridade aeronáutica americana se tornou padrão para a aviação em geral. Dessa forma, acidentes aeronáuticos que têm a classificação de catastróficos, devem ter probabilidade de falha de sistemas de até um em cada um bilhão por hora de voo.

Tal padrão será adotado no presente trabalho, no qual será analisada a confiabilidade do comando de voo da aeronave cada Tadarida FTB 17/2. Serão analisados os sistemas de acionamento das superfícies *Canard*, *Aileron* e empenagem em “V”. Como se trata de uma aeronave instável por definição, foi considerado que a perda do acionamento de uma superfície primária na respectiva condição crítica de voo é um evento catastrófico. Tal consideração se baseia na premissa de que a perda de uma superfície primária impede o controle ativo da aeronave que é instável. Tal contexto coloca em risco a vida do piloto da aeronave e tende a resultar em um acidente que levaria à perda total da aeronave.

A preocupação com a confiabilidade de sistemas aeronáuticos é um tema recente e cada vez mais relevante no contexto da indústria aeronáutica, dado o aumento no número de voos de aeronaves ao longo dos últimos anos, como exposto na Figura 1.

Como o presente trabalho é vinculado ao tema da disciplina SAA0201 – Projetos de Aeronaves II da EESC-USP, é necessário contextualizar a base na qual ele se desenvolve. No desenvolvimento da disciplina precedente, SAA0200 – Projetos de Aeronaves I, foi feito o projeto conceitual da aeronave caça denominada Tadarida FTB 17/2. Tal aeronave caça possui perfil multimissão de combate Ar-Ar e Ar-solo e opera em condições de voo supersônicas.

Na concepção e definição do Sistema de Controle do caça, alguns desafios foram encontrados. O primeiro deles consiste na necessidade de uso de controle ativo na aeronave, pelo fato de a mesma ser estaticamente instável, ter configuração *Canard*, empenagem em “V” e operar em regime supersônico.

Considerando esses desafios, a arquitetura do sistema de controle foi definida. Primeiramente, entre o comando do piloto e o controlador da aeronave, foi escolhida a arquitetura *fly-by-wire*. Essa arquitetura foi selecionada por transformar comandos mecânicos em elétricos, o que permite integração direta com o sistema ativo de controle da aeronave. O sistema de transmissão mecânico possui maior peso e dificulta a otimização da sensibilidade do piloto, o que o desfavorece na escolha dessa arquitetura de sistema entre o comando do piloto e o controlador da aeronave.

Em seguida, a arquitetura do sistema de controle entre o controlador e os atuadores das superfícies móveis escolhida foi *power-by-wire*. O menor peso em relação ao sistema hidráulico, a maior compatibilidade com o controlador ativo da aeronave, a transmissão elétrica do comando entre o comando entre o computador e o mecanismo que aciona a superfície de acionamento, além da possibilidade de fazer uso de atuadores eletro-hidráulicos, foram os fatores que influenciaram na escolha de tal arquitetura entre controlador e superfícies de acionamento.

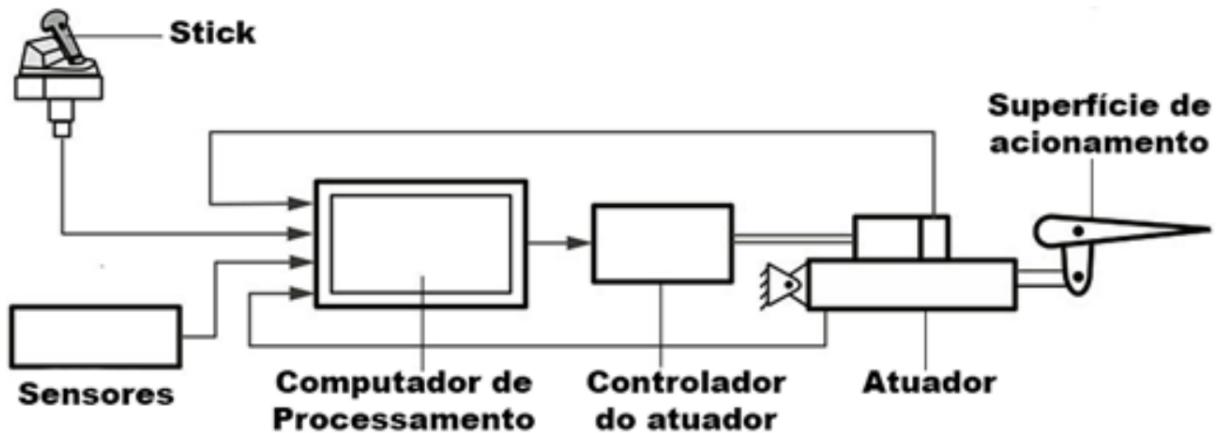
Os atuadores do tipo Electro-Mechanical Actuators foram escolhidos pela maior simplicidade e pelo menor custo em relação aos hidráulicos.

Dessa forma, a natureza da arquitetura do sistema de controle das superfícies de comando de vôo foram definidas como *fly-by-wire* entre o comando do piloto e o controlador da aeronave, *power-by-wire* entre o controlador e os atuadores das superfícies móveis e os atuadores escolhidos foram do tipo Electro-Mechanical Actuators.

3 METODOLOGIA CIENTÍFICA E TECNOLÓGICA

Um esboço de como o sistema de controle de cada uma das superfícies primárias foi definido e é mostrado na Figura 5.

Figura 5 – Esboço do sistema de controle de uma superfície primária de acionamento da aeronave Tadarida FTB 17/2



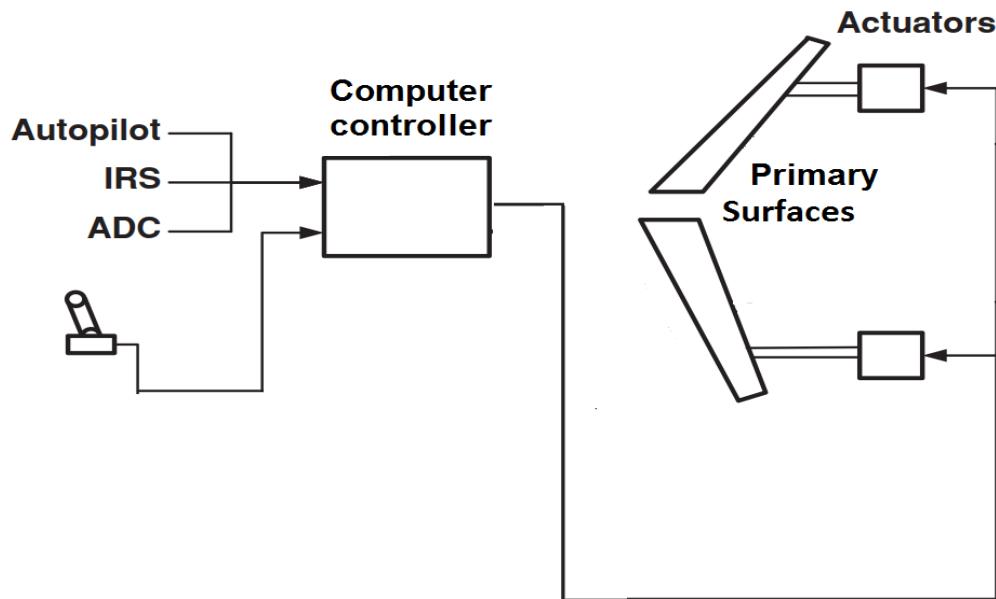
Quanto a condição de voo a ser analisada, foi escolhida a mais crítica para cada uma das superfícies de acionamento. *Canard* e aileron compartilham da mesma condição crítica de voo para essa aeronave: curva sustentada. Quanto à empennagem em “V”, a condição mais crítica de voo a ser analisada é a de decolagem, assim que se inicia o movimento de cabrar a aeronave.

Dessa forma, cada sistema de acionamento de superfície primária será analisado, partindo-se de um sistema similar para os três, o qual pode ser adaptado de acordo com o contexto do sistema e com as considerações feitas para delimitar a análise de confiabilidade.

4 DESENVOLVIMENTO DO PROJETO

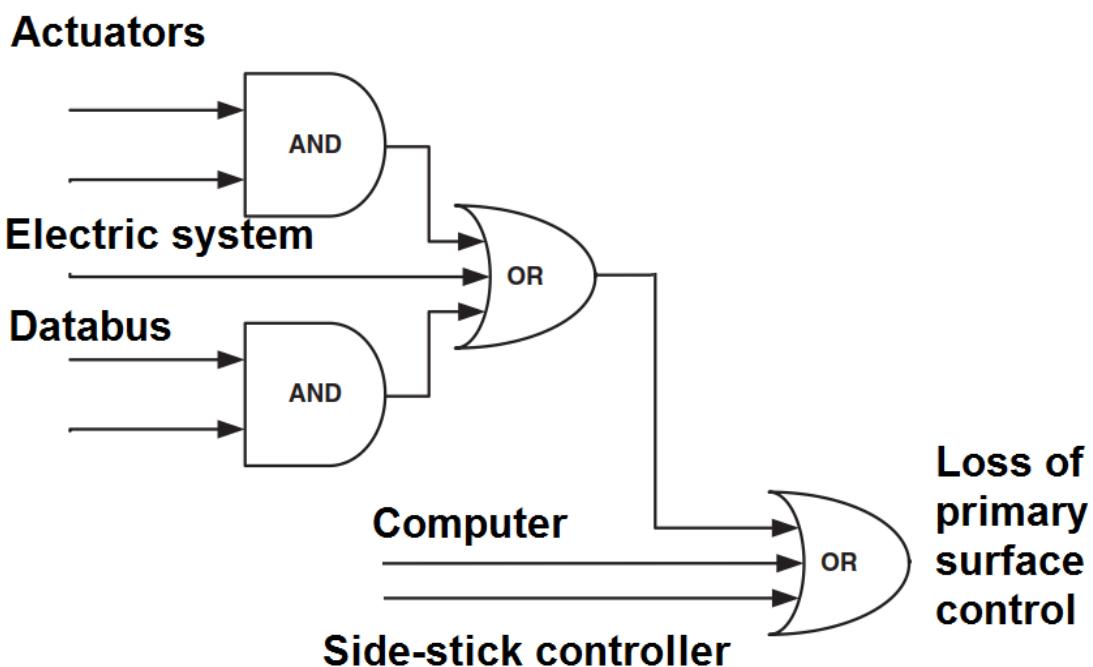
Para se dar início ao projeto, foi considerada a configuração mais simples para a arquitetura das superfícies primárias. Nela há um *sticker*, um piloto automático, um computador de processamento e um atuador para cada superfície a ser acionada. Os atuadores eletromecânicos são alimentados pela mesma fonte de energia. Essa configuração é indicada na Figura 6.

Figura 6 – Esboço da primeira configuração considerada na análise de confiabilidade para cada superfície primária



Nesse sistema, foi feita a análise FTA. A falha de uma superfície primária foi desdobrada em falhas de cada um dos componentes, conforme indicado no Figura 6.

Figura 7 – FTA da primeira configuração considerada na análise de confiabilidade para cada superfície primária



Das bibliografias [2] e [3], foi possível obter as probabilidades de falha de cada um dos componentes. Para os atuadores eletromecânicos, não foi possível obter tais valores por se tratar de uma tecnologia em fase final de desenvolvimento. Nesse caso, considerou-se que eles não teriam probabilidades de falha por hora de voo maiores que os atuadores hidráulicos, seguindo-se com os valores desses últimos para as análises do trabalho.

Dessa forma, os valores de probabilidade de falha para os componentes por hora de voo considerados foram:

- Atuadores: 2.5×10^{-4}
- Sistema elétrico que alimenta os atuadores: 4.9×10^{-9}
- Databus: 10^{-8}
- Computador controlador: 10^{-4}
- Side-stick: 2×10^{-6}

Portanto, para o primeiro esboço da arquitetura do sistema, a probabilidade de perda da superfície primária da aeronave foi de 1.02×10^{-4} . Como é maior que o requisito de 10^{-9} imposto pela autoridade aeronáutica para falhas catastróficas, a arquitetura deve ser trabalhada para aprimorar a confiabilidade.

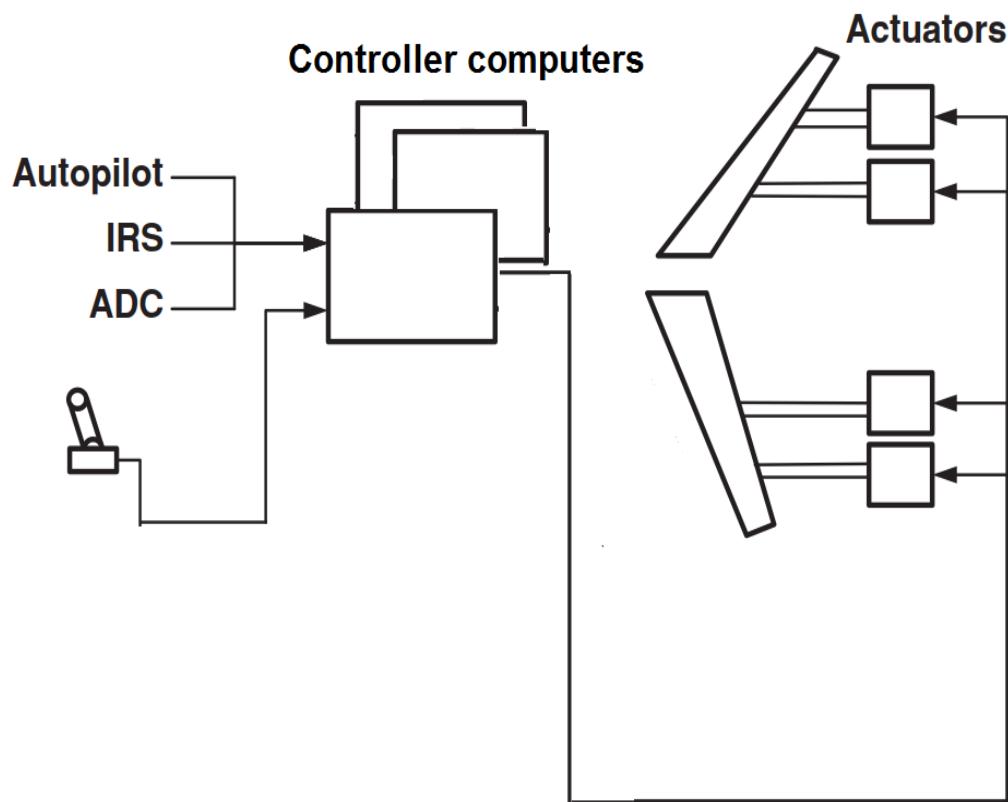
A partir da falha do controle da superfície primária, vê-se que os três componentes que estão logo abaixo dela possuem probabilidades de falha maiores que 10^{-9} . Dessa forma, a arquitetura do computador, *side-stick controller* e atuadores precisa ser trabalhada. Do cálculo anterior, viu-se que as respectivas probabilidades de falha são 10^{-4} , 2×10^{-6} e 6.25×10^{-6} . Como se trata de uma combinação de união entre as falhas dos componentes, deve-se garantir que a soma das probabilidades de falha seja menor que 10^{-9} .

Para o computador, deve-se adotar arquitetura triplex para se ter um valor menor que 10^{-9} nesse componente. Para os atuadores, foi adotada a arquitetura duplex, com apenas uma redundância para cada atuador, na qual as redundâncias compartilham o mesmo sistema elétrico de alimentação, independente da alimentação dos atuadores já presentes no sistema.

No caso do side-stick controller, foram consideradas três alternativas para aumentar a confiabilidade. A primeira seria de inserir um segundo *sticker*, mas se mostra inviável para a presente aeronave por se tratar de um caça, tendo apenas um piloto. A segunda seria trabalhar a árvore de falha do *sticker* para aumentar sua confiabilidade, com o retrabalho de sua arquitetura. Infelizmente não foi possível conseguir a FTA do *sticker*. Dessa forma, a terceira opção foi considerada. Nela, a opção seria trocar o *sticker* por outro com menor probabilidade

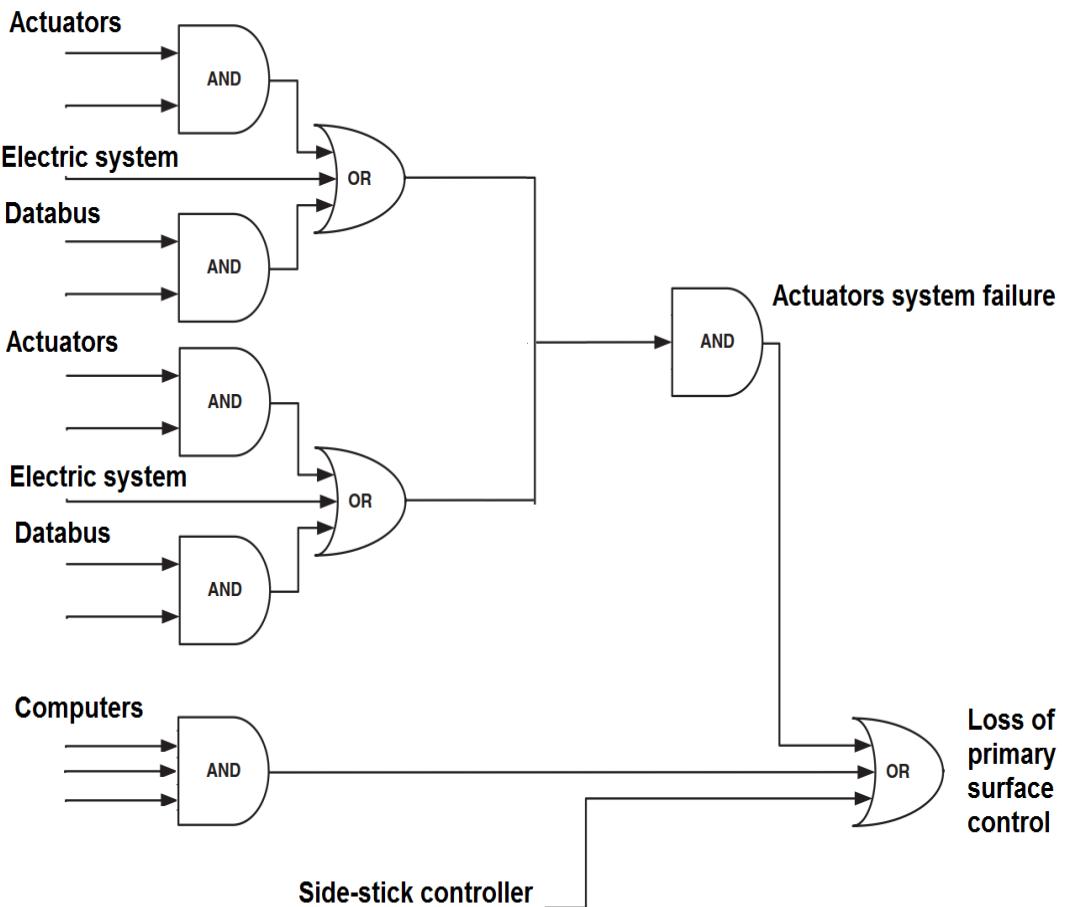
de falha para dar continuidade ao projeto. A confiabilidade desse *sticker* teria de ser pelos menos menor que 10^{-9} . A nova arquitetura proposta é apresentada na Figura 7.

Figura 8 – Esboço da segunda configuração considerada na análise de confiabilidade para cada superfície primária



Nessa configuração, considerando a redundância de sistema de alimentação elétrico dos novos atuadores, a FTA é representada na Figura 8.

Figura 9 – FTA da segunda configuração considerada na análise de confiabilidade para cada superfície primária



Nessa nova arquitetura, a probabilidade de perda de controle uma superfície de controle primária seria de, pelo menos, 10^{-12} por hora de voo, considerando apenas os atuadores e os computadores controladores. Escolhendo um *side-stick controller* de confiabilidade de 10^{-12} por hora de voo, a confiabilidade do sistema como um todo se torna 10^{-10} por hora de voo.

6 ANÁLISE DOS RESULTADOS

O primeiro modelo de arquitetura para os sistemas de acionamento das superfícies primárias se mostrou demaisidamente simples e com baixa confiabilidade. As simplificações feitas na análise dos sistemas permitiram chegar a um denominador comum para os três sistemas no nível de arquitetura. Nesse contexto, as modificações sugeridas se aplicam para os três.

A partir de uma confiabilidade a nível de sistemas de 1.02×10^{-4} , com implementação de redundâncias nos computadores controladores, nos atuadores e com a troca do *side-stick controller*, foi possível aprimorar a confiabilidade para 10^{-10} , situando a confiabilidade do sistema de comando de voo da aeronave dentro dos padrões impostos pela Autoridade Aeronáutica.

7 CONCLUSÃO

A análise de sistemas aeronáuticos é de extrema importância no dia a dia do engenheiro aeronáutico na indústria. O presente estudo apresenta um exemplo simplificado de aplicação dessa área do conhecimento para uma aeronave caça com perfil de multimissão.

Através de uma proposta inicial de arquitetura de sistemas, é possível trabalhá-la até que os padrões impostos pela Autoridade Aeronáutica sejam respeitados. Para ampliar a confiabilidade do sistema de comando de voo da aeronave foi necessário conhecer seu tipo para se imaginar as principais falhar que poderiam ocorrer. Através de simplificações, foi possível fazer uso do método FTA para estimar a confiabilidade do sistema inicial.

Posteriormente, com a FTA estruturada, foi possível trabalhar com as melhores opções de forma a aprimorar a confiabilidade do sistema. A inserção de redundâncias nos atuadores e nos computadores foi a forma encontrada de se contornar o problema de confiabilidade identificado na arquitetura.

Foi possível então encontrar uma arquitetura comum para os sistemas de acionamento das superfícies primárias que permite que a aeronave opere nas condições mais críticas de seu envelope de voo, nos casos em que exige ao máximo de cada uma das superfícies de acionamento. Os ajustes de arquitetura sugeridos inseriram o sistema de comando de voo da aeronave dentro dos padrões da Autoridade Aeronáutica no contexto de confiabilidade para as falhas catastróficas consideradas.

Portanto, com o presente trabalho foi possível compreender a importância de se considerar o tema da confiabilidade de sistemas durante o projeto de aeronaves, pois tal tema influencia diretamente o sucesso da operação da aeronave.

REFERÊNCIAS

- [1] BIDINOTTO, J. H.; **Notas de Aula, Especialização em Sistemas Aeronáuticos.** Departamento de Engenharia Aeronáutica, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2019.
- [2] JUKES, M.; SEABRIDGE, A.; MOIR, I. **Civil Avionics Systems.** John Wiley & Sons. 2013.
- [3] MOIR I.; SEABRIDGE A.; **Aircraft Systems, Mechanical, Electrical, and Avionics Subsystems Integration.** Professional Engineering Publishing UK. 2001.

