

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA
ESPECIALIZAÇÃO EM ENGENHARIA DA CONFIABILIDADE**

MARCOS DE PAULA

**REPONDO A CONFIABILIDADE DO SISTEMA DE PILOTO
AUTOMÁTICO DE AERONAVES: CONFIABILIDADE DO
SERVOMOTOR APÓS AS MELHORIAS IMPLANTADAS PELO
FABRICANTE**

MONOGRAFIA DE ESPECIALIZAÇÃO

CURITIBA

2018

MARCOS DE PAULA

**REPONDO A CONFIABILIDADE DO SISTEMA DE PILOTO
AUTOMÁTICO DE AERONAVES: CONFIABILIDADE DO
SERVOMOTOR APÓS AS MELHORIAS IMPLANTADAS PELO
FABRICANTE**

Monografia apresentada como requisito parcial à obtenção do título de Especialista em Engenharia da Confiabilidade, do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Carlos Henrique Mariano Dr.

Co-orientador: Prof. Engº Denis Mazzei

CURITIBA

2018



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Curitiba
Diretoria de Pesquisa e Pós-Graduação
Departamento Acadêmico de Eletrotécnica
Especialização em Engenharia da Confiabilidade



TERMO DE APROVAÇÃO

REPONDO A CONFIABILIDADE DO SISTEMA DE PILOTO AUTOMÁTICO DE AERONAVES: CONFIABILIDADE DO SERVOMOTOR APÓS AS MELHORIAS IMPLANTADAS PELO FABRICANTE

por

MARCOS DE PAULA

Esta monografia foi apresentada em 18 de Outubro de 2018, como requisito parcial para obtenção do título de Especialista em Engenharia da Confiabilidade, outorgado pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Marcos de Paula foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof. Emerson Rigoni, Dr. Eng.
Professor Orientador - UTFPR

Prof. Carlos Henrique Mariano Dr.
Membro Titular da Banca - UTFPR

Prof. Marcelo Rodrigues Dr.
Membro Titular da Banca - UTFPR

O Termo de Aprovação assinado encontra-se na Coordenação do Curso.

Dedico este trabalho à esposa Raquel e ao filho Rafael, pelos momentos de ausência e suporte emocional que permitiram concluir este trabalho.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus que permitiu que tudo isso acontecesse, ao longo de minha vida, mas que em todos os momentos é o maior mestre que alguém pode conhecer.

À família que tem estado sempre do meu lado.

Por fim, à Instituição pelo ambiente criativo e amigável que proporciona.

RESUMO

DE PAULA, Marcos. **Repondo a confiabilidade do sistema de Piloto Automático de aeronaves: confiabilidade do servomotor após as melhorias implantadas pelo fabricante.** 2018. 52. Monografia (Especialização em Engenharia da Confiabilidade) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2018.

A competição entre as empresas de transporte aéreo tem sido cada vez mais acirrada na busca de pontualidade, disponibilidade e, obviamente, convertendo tudo isso em lucro para gerar valor aos acionistas. Este trabalho foi desenvolvido em uma empresa aérea, e serviu de base científica para discussão de melhorias no sistema de piloto automático de uma frota de aeronaves junto ao fornecedor e fabricante do equipamento. Ele estuda a confiabilidade do servomotor afim de comprovar com fatos e dados se a melhoria implementada teve resultado satisfatório. O problema aqui apresentado e a ser estudado é como usar das melhores práticas da Engenharia de Confiabilidade para se determinar qual a confiabilidade estimada do novo servomotor, tendo disponível somente dados censurados à direita (unidades não falhadas). O problema foi resolvido utilizando-se da distribuição Weibull e análise de causa raiz (RCA). A motivação maior para se dedicar a este problema específico foi contribuir com a empresa com a minimização de novos eventos de paradas não programadas, convergindo para melhoras nos indicadores operacionais.

Palavras-chave: Engenharia de Confiabilidade. Transporte aéreo. Sistema de piloto automático. LDA. RCA.

ABSTRACT

DE PAULA, Marcos. **Restoring the reliability of the Auto Pilot aircraft system: servomotor reliability after improvements implemented by the manufacturer.** 2018. 52. Monografia (Especialização em Engenharia da Confiabilidade) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2018.

The competition between airline companies has been increasingly intense in the search for punctuality, availability and, of course, converting all of this into profits to generate value to shareholders. This work was developed in an airline and served as a scientific basis for discussion of improvement in the autopilot system of an aircraft fleet with the supplier and manufacturer of the equipment. It studies the reliability of the servomotor in order to prove with facts and data if the implemented improvement had a satisfactory result. The problem presented here and to be studied is how to use the best practices of Reliability Engineering to determine the estimated reliability of the new servomotor, with only right-hand data (non-failed units) available. The problem was solved using the Weibull distribution and Root Cause Analysis (RCA). The major motivation to focus on this specific problem was to contribute to the company by minimizing new non-scheduled downtime events, converging to improvements in operational KPIs.

Key-words: Reliability Engineering. Air Transportation. Auto Pilot System. LDA. Life Data Analysis. RCA. Root Cause Analysis.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 - Representação dos eixos imaginários de uma aeronave asa fixa	20
Figura 2.2 - Eixos e a posição de cada APAU na aeronave.....	21
Figura 2.3 - Posição do APAU no eixo <i>Roll</i> (aileron).....	21
Figura 2.4 - Posição do APAU no eixo <i>Yaw</i> (rudder)	22
Figura 2.5 - Posição do APAU no eixo <i>Pitch</i> (elevator)	22
Figura 3.1 - Comparação Curva da Banheira vs. Distribuições Estatísticas.....	26
Gráfico 3.1 - Representação Matemática da Confiabilidade	27
Figura 3.2 - Representação da Curva da Banheira	28
Fotografia 3.1 - Wallodi Weibull.....	29
Figura 4.1 - Análise causa raiz das unidades pré-modificação	36
Figura 4.2 - Análise gráfica da discrepância de linearidade	37
Figura 4.3 - Jerk phenomenon	38
Figura 4.4 - Probabilidade de Falha Roll Axis	39
Figura 4.5 - Função Densidade de Probabilidade Roll Axis	40
Figura 4.6 - Probabilidade de Falha vs. Tempo Roll Axis.....	40
Figura 4.7 - Probabilidade de Falha Yaw Axis.....	41
Figura 4.8 - Função Densidade de Probabilidade Yaw Axis.....	41
Figura 4.9 - Probabilidade de Falha vs. Tempo Yaw Axis	42
Figura 4.10 - Probabilidade de Falha Pitch Axis.....	42
Figura 4.11 - Função Densidade de Probabilidade Pitch Axis.....	43
Figura 4.12 - Probabilidade de Falha vs. Tempo Pitch Axis.....	43
Figura 4.13 - Evidência da falha do potenciômetro	44
Figura 4.14 - Confiabilidade vs. Tempo Servomotor	46

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 - Dados de falhas e suspensões unidades pré-modificação	35
Tabela 4.2 - Identificação dos modos de falha das unidades pré-modificação	37
Tabela 4.3 - Comparando ganho de confiabilidade pelo parâmetro de escala η	46
Tabela 4.4 - Estimativa de redução de custo com o novo servomotor	47

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÔNIMOS

LISTA DE ABREVIATURAS

Ref. Referência

LISTA DE SIGLAS

APAU	Auto Pilot Actuator Unit
PDF	Probability Density Function
PN	Part Number
SN	Serial Number

LISTA DE ACRÔNIMOS

AC	Advisory Circular
AFF	Automatic Flight Control Function
EASA	European Aviation Safety Agency
FAA	Federal Aviation Administration
FOC	Free Of Charge
ICAO	International Civil Aviation Organization
LDA	Life Data Analysis
MTBUR	Mean Time Between Unschedule Removal
MTTF	Mean Time To Failure
RCA	Root Cause Analysis
RCM	Reliability Centered Maintenance
RBAC	Regulamento Brasileiro de Aviação Civil
SIC	Simpósio Internacional de Confiabilidade

LISTA DE SÍMBOLOS

β - Parâmetro de forma, oriundo da distribuição Weibull. Basicamente defini se um item/ativo sofre falha prematura, aleatória ou por desgaste.

η - Parâmetro de escala, também oriundo da distribuição Weibull. Pode ser chamado de vida característica.

t_0 ou γ - Vida Mínima ou Parâmetro de Locação

t - Período de Vida Transcorrido

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	PREMISSA E PROBLEMA DE PESQUISA	15
1.2	OBJETIVOS.....	16
1.2.1	Objetivo Geral.....	16
1.2.2	Objetivos Específicos	16
1.3	JUSTIFICATIVA.....	16
1.4	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	17
1.5	ESTRUTURA DO TRABALHO	17
2	UM CASE REAL APLICADO À UMA FROTA DE AERONAVES DE UMA COMPANHIA AÉREA	19
2.1	LOCALIZAÇÃO.....	20
2.1.1	Roll Axis.....	21
2.1.2	Yaw Axis	22
2.1.3	Pitch Axis	22
2.2	FUNÇÃO DO APAU	23
2.3	SÍNTESE E CONCLUSÃO DO CAPÍTULO	23
3	REFERENCIAL TEÓRICO	24
3.1	ANÁLISE DE DADOS DE VIDA.....	24
3.2	REPRESENTAÇÃO MATEMÁTICA DA CONFIABILIDADE.....	26
3.2.1	Função Taxa De Falha	27
3.2.2	Função Vida Média ou MTTF (<i>Mean Time To Failure</i>)	28
3.3	DISTRIBUIÇÃO WEIBULL.....	28
3.3.1	Aplicação da Weibull 1-Parâmetro para Poucos ou Nenhum Dado de Falha	31
3.3.1.1	Histórico.....	32
3.4	ROOT CAUSE ANALYSIS “RCA”	32
3.5	SÍNTESE E CONCLUSÃO DO CAPÍTULO	33
4	DESENVOLVIMENTO	34
4.1	CONSIDERAÇÕES E SIMPLIFICAÇÕES ADOTADAS NA ANÁLISE DOS SERVOMOTORS PRÉ-MODIFICAÇÃO.....	34
4.2	PREPARAÇÃO DOS DADOS PARA ANÁLISE DAS UNIDADES PRÉ- MODIFICAÇÃO	35
4.2.1	Correlação Com os <i>Shop Finding Reports</i> das Unidades	35
4.2.2	Modos de Falha das Unidades	36
4.3	ANÁLISE WEIBULL DAS UNIDADES PRÉ-MODIFICAÇÃO	38
4.4	CONSIDERAÇÕES E SIMPLIFICAÇÕES ADOTADAS NA ANÁLISE DOS SERVOMOTORS PÓS-MODIFICAÇÃO.....	44
4.5	ANÁLISE WEIBULL PÓS-MODIFICAÇÃO	45
4.6	ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	46
4.7	SÍNTESE E CONCLUSÃO DO CAPÍTULO	47
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	48
5.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	48
	REFERÊNCIAS	49
	APÊNDICE - LISTA DOS SERVOMOTORS ANALISADOS PÓS-MODIFICAÇÃO .	50

1 INTRODUÇÃO

A competição entre as empresas de transporte aéreo tem sido cada vez mais acirrada na busca de pontualidade, disponibilidade e, obviamente, convertendo tudo isso em lucro para gerar valor aos acionistas.

A aviação tem sido um campo de grandes inovações, estudos inéditos de engenharia e aplicação de avançadas técnicas e métodos. (ICAO, FAA, EASA, 2018)

No que concerne à confiabilidade, mais especificamente a ¹RCM (*Reliability Centered Maintenance*) nasceu nessa indústria e posteriormente foi aplicada em outras áreas (automobilística, energia, nuclear, etc). (RIGONI, 2009)

Apesar de existirem departamentos específicos que tratam da engenharia de confiabilidade nas empresas aéreas do Brasil, as companhias basicamente cumprem com os requisitos previstos nos Regulamentos Brasileiros de Aviação Civil (RBAC) – que muitas vezes são genéricos.

Uma das causas prováveis é que o tema Engenharia de Confiabilidade é pouco conhecido e vem sendo desenvolvido há poucos anos no Brasil.

Enxergando esta oportunidade, é mais que urgente para o profissional de confiabilidade das empresas aéreas se atualizar e buscar ser o agente transformador.

Indo de encontro a este propósito, foi apresentado no Simpósio Internacional de Confiabilidade (SIC 2017) um trabalho de título ‘Repondo a confiabilidade do sistema de Piloto Automático em aeronave’, autoria de Marcos de Paula, onde foi aplicado análise de dados de vida (*LDA - Life Data Analysis*) e investigações de engenharia para estudo do principal *driver* que levava a queda de disponibilidade e pontualidade na frota de aeronaves, o servomotor.

Na conclusão foi proposto como ‘próximos passos’ analisar a confiabilidade do servomotor após as melhorias implantadas pelo fabricante do componente.

¹ Para aprofundamento no tema recomenda-se consultar a tese de doutorado de Emerson Rigoni intitulado ‘METODOLOGIA PARA IMPLANTAÇÃO DA MANUTENÇÃO CENTRADA NA CONFIABILIDADE: uma abordagem fundamentada em Sistemas Baseados em Conhecimento e Lógica *Fuzzy*’. O autor faz ampla revisão bibliográfica a respeito da RCM desde seu surgimento no campo da aviação civil e as reformulações que a RCM sofreu para permitir aplicações em diferentes indústrias. Disponível em <https://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/92361>

Na época da conclusão do trabalho os dados do servomotor melhorado não se encontravam disponíveis, uma vez que os novos servomotores ainda estavam em fase de implantação na frota.

Este momento é oportuno para complementar o estudo proposto à época.

O trabalho é de cunho prático e foi desenvolvido na companhia, serviu de base científica para discussão de melhorias no sistema de piloto automático de uma frota de aeronaves junto ao fornecedor e fabricante do equipamento.

Já dizia Lord Kelvin 1883, quando você pode medir o que está falando e expressá-lo em números, você sabe algo sobre isso. Do contrário, seu conhecimento é escasso e insatisfatório.

“When you can measure what you are speaking about, and express it in numbers, you know something about it; but when you cannot measure it, when you cannot express it in numbers, your knowledge is of a meager and unsatisfactory kind; it may be the beginning of knowledge, but you have scarcely, in your thoughts, advanced to the stage of science, whatever the matter may be”. (B. ABERNETHY 2010 apud LORD KELVIN 1883).

1.1 PREMISSA E PROBLEMA DE PESQUISA

Estudar a confiabilidade do servomotor após a incorporação das melhorias pelo fabricante, comprovar com base científica se as melhorias implementadas foram satisfatórias.

Previamente é sabido que os novos/modificados servomotores instalados e voando não registraram nenhuma falha que tenham relação aos modos de falhas estudados no trabalho apresentado no SIC 2017. (DE PAULA, 2017).

Para que se possa comparar o estudo anterior com este, os modos de falha considerados serão os mesmos do primeiro estudo.

O problema aqui apresentado e a ser estudado é como usar das melhores práticas da Engenharia de Confiabilidade para se determinar qual a confiabilidade estimada do novo servomotor, tendo disponível somente dados censurados à direita (unidades não falhadas).

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Realizar um estudo de engenharia de confiabilidade em servomotores aplicados em aeronaves.

O objeto de estudo trata-se do servomotor, que é instalado no APAU (*Auto Pilot Actuator Unit*) o qual é parte do sub-sistema AFF (*Automatic Flight Control Function*) da aeronave.

1.2.2 Objetivos Específicos

Caracterizar os modos de falha a serem analisados.

Catalogar as unidades de servomotor atualmente instaladas, identificando PN (*Part Number*), SN (*Serial Number*), Posição e Tempo Instalado.

Comparar as métricas de confiabilidade obtidas com o estudo anterior (servomotor pré-modificação).

Apresentar a análise dos resultados.

1.3 JUSTIFICATIVA

Resolver o problema apresentado permitirá estimar com base científica a confiabilidade do equipamento após a melhoria.

Dados quantitativos são relevantes para suportar departamentos específicos fins adequação de estoques de sobressalente do componente.

Outro importante ganho é poder agregar na atualização da base de conhecimento técnico da Engenharia de Manutenção em relação a este equipamento.

A motivação maior para se dedicar a este problema específico foi contribuir com a empresa com a minimização de novos eventos de paradas não programadas, convergindo para melhoras nos indicadores operacionais.

1.4 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

O levantamento de dados será feito utilizando-se do sistema informatizado da empresa, extraído em formato Excel.

Os dados serão analisados a fim de caracterizá-los em PN (*Part Number*), SN (*Serial Number*), Posição e Tempo Instalado.

Métodos de análise da Engenharia da Confiabilidade tais como LDA, RCA, entre outras serão aplicadas afim de estimar parâmetros da distribuição escolhida, estruturar os modos de falha e seus efeitos, etc.

Os resultados serão analisados e apresentados em formato de tabela no final do capítulo 5.

1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

O capítulo 1 apresenta uma breve contextualização do ambiente da aviação civil no Brasil, bem como busca dar uma pista do papel da Engenharia de Confiabilidade nas companhias aéreas e qual o papel que o profissional dessa área precisa assumir.

E, ainda, sintetiza o problema de pesquisa objeto desse trabalho partindo do princípio de que os dados de falhas para o componente 'servomotor melhorado' são escassos ou até inexistentes.

O objetivo, portanto, é estimar a vida do servomotor após as melhorias implantadas partindo da premissa que o componente apresenta boa *performance* na condição pós-modificação.

Métodos de análise da Engenharia de Confiabilidade são aplicados para dar o suporte científico necessário à análise. As métricas de confiabilidade serão obtidas a partir da distribuição estatística 'Weibull'.

O capítulo 2 demonstra a aplicação prática da teoria em um *case* real de uma frota de aeronaves de uma companhia aérea, ilustrando em detalhes o objeto do estudo.

O capítulo 3 tem por objetivo sintetizar o corpo de conhecimento, em especial, os conceitos e aplicação da Análise de Dados de Vida e da RCA. Ambos

servirão de sustentação científica para apresentação dos resultados e análise da confiabilidade do objeto de estudo.

O capítulo 4 apresenta o desenvolvimento do trabalho em si, em consonância com o que foi discorrido nos capítulos 1 e 2, detalhando a aplicação da teoria discorrida no capítulo 3 aplicada ao objeto de estudo, bem como traz o procedimento adotado para coleta e análise de dados e discorre sobre as considerações e simplificações adotadas assim como traz os resultados obtidos com os comentários feitos ao longo do capítulo.

O capítulo 5 conclui o estudo com as considerações finais sintetizando os resultados obtidos com o trabalho, as dificuldades e soluções encontradas, assim como as conclusões resultantes do processo de análise e os benefícios para a empresa, alinhado aos conceitos da Gestão de Ativos.

2 UM CASE REAL APLICADO À UMA FROTA DE AERONAVES DE UMA COMPANHIA AÉREA

No presente capítulo o autor detalha o campo de aplicação do estudo de performance do servomotor bem como detalha a função primária do objeto pesquisado na aeronave.

Como já explicitado no capítulo 1, o trabalho se desenvolve por meio do estudo da *performance* do servomotor. O resultado final esperado é repor a confiabilidade do sistema de piloto automático em um primeiro momento na tentativa de se estabelecer uma manutenção preventiva através de uma ação de manutenção programada, aqui podendo ser entendida como intervalo de troca '*softime*'.

Softime é uma palavra inglesa que trata do intervalo para uma manutenção programada que não tem caráter mandatório no programa de manutenção da aeronave: pode ou não ser recomendado pelo fabricante. O operador da aeronave pode estabelecer um intervalo *softime* a seu critério. (FAA Advisory Circulars: 120-17A e 120-MRPWG, 2015).

O servomotor é priorizado por tratar-se de um componente conhecidamente com baixa *performance* e com significativo impacto operacional.

O trabalho é motivado pela expectativa de aumento da disponibilidade da frota de aeronaves.

Como aprendizados destacam-se a preparação dos dados para receber a análise de confiabilidade e a utilização prática da Análise de Dados de Vida em um componente de um sistema da frota de aeronave.

O estudo de confiabilidade do servomotor baseia-se na aplicação da metodologia de análise de dados de vida (LDA), apoiando-se no levantamento de dados e estudo de causa raiz (RCA).

Alguns passos são necessários para avaliação dos dados de vida do componente estudado, abrangendo desde a correta preparação dos dados e validações das informações coletadas, bem como pelas análises de correlações dos modos de falha. Após passar por esses criteriosos passos, então segue-se o estudo confirmando pelos parâmetros da distribuição Weibull e julgamento de engenharia se uma manutenção preventiva é adequada.

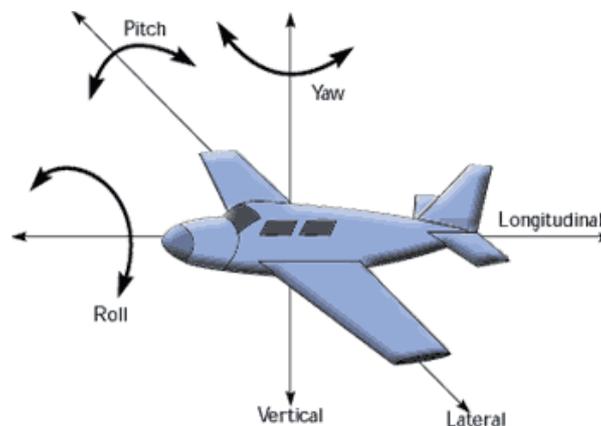
Como já citado no objetivo geral, o objeto de estudo trata-se do servomotor, principal sub-componente do APAU (*Auto Pilot Actuator Unit*) sendo este último parte do sub-sistema AFF (*Automatic Flight Control Function*) da aeronave.

2.1 LOCALIZAÇÃO

Partindo-se da ótica da aeronave são três APAUs conectados em paralelo em três diferentes posições correspondentes aos seus devidos eixos imaginários, os quais determinam os principais movimentos que uma aeronave executa em voo.

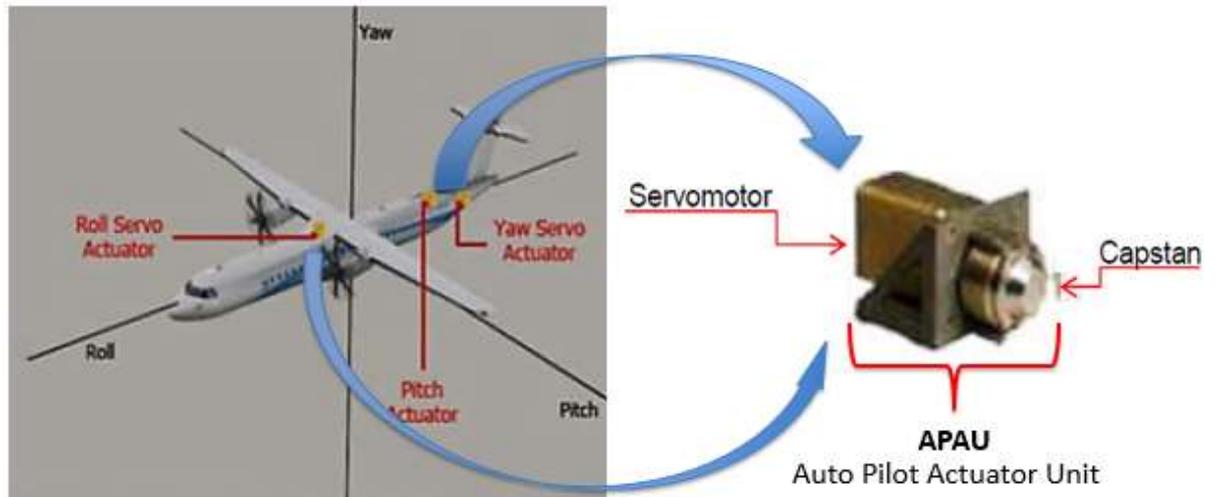
A falha de qualquer um dos três deixa a aeronave em condição de inoperância, pois é requisito obrigatório nos procedimentos da companhia que os três servomotores estejam em funcionamento antes da liberação para voo.

Figura 2.1 - Representação dos eixos imaginários de uma aeronave asa fixa



Fonte: Pedro Barros Neto (2017).

Figura 2.2 - Eixos e a posição de cada APAU na aeronave



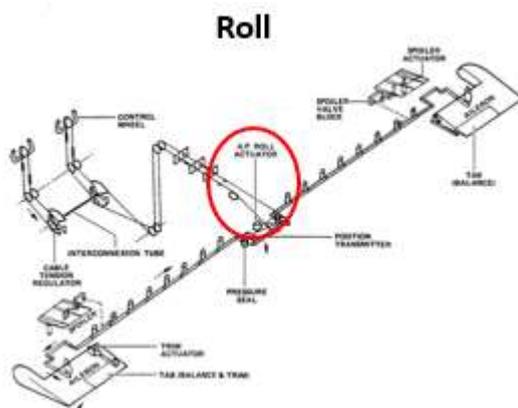
Fonte: adaptado do relatório de engenharia pelo autor (2017).

As figuras 2.1 e 2.2 ilustram os eixos imaginários bem como mostram a posição de cada APAU na aeronave.

2.1.1 Roll Axis

Eixo imaginário que determina o movimento de rolagem da aeronave.

Figura 2.3 - Posição do APAU no eixo *Roll* (aileron)



Fonte: adaptado do manual do equipamento pelo autor (2017).

Em destaque na figura 2.3 a localização de instalação do seu respectivo APAU.

Em destaque na figura 2.5 a localização de instalação do seu respectivo APAU.

2.2 FUNÇÃO DO APAU

O APAU transforma a energia elétrica, recebida por meio de sinal de entrada, dependente de qual posição foi comandada, em energia mecânica para mover os *driving pulley* (polias motrizes) do *capstan* (figura 2.2), que tem como resultado final a ação de movimentar as superfícies primárias de voo da aeronave por meio de cabos de comando (veja ilustração nas figuras 2.3, 2.4 e 2.5 das subseções 2.1.1 a 2.1.3):

- Ailerons (possibilita o movimento em torno do eixo *Roll*);
- Rudders (possibilita o movimento em torno do eixo *Yaw*);
- Elevator (possibilita o movimento em torno do eixo *Pitch*).

Sua função principal, portanto, é reduzir a carga de trabalho da tripulação tornando os comandos mais leves.

O principal componente do APAU é o servomotor, objeto desse estudo.

2.3 SÍNTESE E CONCLUSÃO DO CAPÍTULO

O resultado final esperado do estudo é repor a confiabilidade do sistema de piloto automático estabelecendo um intervalo de troca '*softime*'.

O servomotor é escolhido para estudo pois é um componente com baixa *performance* e tem impacto operacional.

O capítulo seguinte versará sobre o referencial teórico do corpo de conhecimento já existente na literatura, com ênfase para a Análise de Dados de Vida e da ferramenta de análise de falhas *Root Cause Analysis* (RCA).

3 REFERENCIAL TEÓRICO

Este capítulo traz a revisão bibliográfica sobre o conhecimento técnico da Análise de Dados de Vida e suas aplicações e uma síntese sobre o que é e quais as aplicações da análise de causas raízes “RCA”.

Em resumo, o autor utiliza da distribuição Weibull e do diagrama de Ishikawa para análise dos modos de falhas presentes no objeto de estudo.

3.1 ANÁLISE DE DADOS DE VIDA

Não é possível começar a discorrer sobre análise de dados vida antes de apontar um primeiro “norte”, com a definição de dois conceitos primordiais:

- Confiabilidade: probabilidade de um item desempenhar a função esperada por um período de tempo determinado sem “falhas”, sob condições especificadas de uso. (FLÁVIO, 2017).
- Controle de Qualidade: assegura que o produto vai funcionar após a montagem e da forma que foi projetada. Já a “Confiabilidade” tem a “função” de prever por quanto tempo o produto vai funcionar conforme os requisitos de projeto. (FLÁVIO, 2017).

Partindo da leitura da definição de “confiabilidade” é importante destacar quatro pontos cruciais antes de prosseguir.

Portanto, quando se pretende conduzir qualquer análise de confiabilidade são importantes a métrica estatística, a função pretendida, o tempo designado e condições especificadas de uso.

Em outras palavras, requer a definição precisa de falha, de tempo e ambiente.

Para que a confiabilidade seja calculada são necessários dados, modelos estatísticos, diagnóstico afim de verificar a aderência dos dados e linguagem efetiva com termos comuns, métricas comuns e ilustrações tais como gráficos e tabelas. (FLÁVIO, 2018).

Os modelos estatísticos são representações matemáticas dos dados, servem para estimar a taxa de falha, a probabilidade de falha ou sobrevivência para uma dada idade ou para um período.

As distribuições que analisam dados de vida, são também chamadas de 'distribuições contínuas' permitindo tanto extrapolação como interpolação.

Os modelos probabilísticos são baseados nas distribuições estatísticas, que podem variar. Para citar algumas: Weibull, Lognormal, Exponencial, Normal, etc.

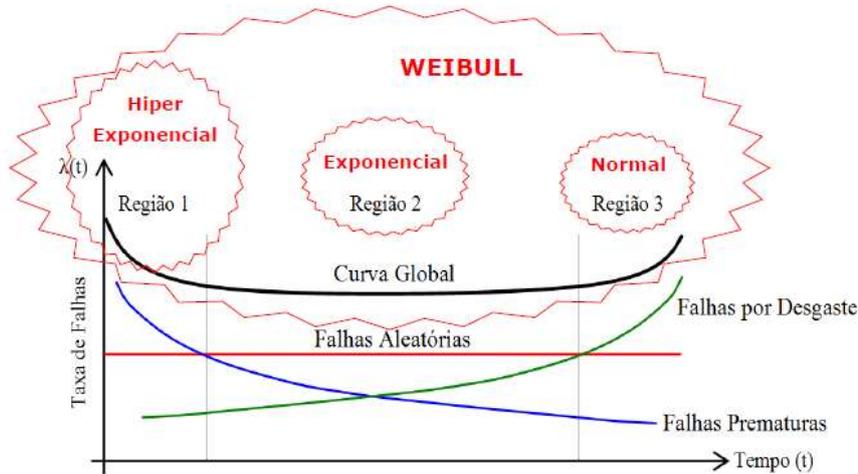
Atualmente a distribuição de vida Weibull é a mais utilizada.

The primary advantage of Weibull analysis is the ability to provide reasonably accurate failure analysis and failure forecasts with extremely small samples. [...] Another advantage of Weibull analysis is that it provides a simple and useful graphical plot of the failure data. (B. ABERNETHY, 2010, chapter 1 p. 1-3).

Conforme citação acima, a análise Weibull é preciosa tanto pelo ponto de vista ao fornecer análises válidas com pequenas amostras como pela facilidade de fornecer um gráfico simples e extremamente útil para se extrair conclusões importantes a respeito dos dados (por exemplo, para um dado $R(t)$ qual é o tempo correspondente a ele em horas, ciclos, etc). Isso pode ser fornecido por um gráfico de probabilidade acumulada de falha com escala log-log o que permite uma "curva *flat*" facilitando a leitura direta.

Uma vantagem adicional e também muito valiosa da distribuição Weibull é que ela é muito flexível, pois consegue "assumir" outras distribuições. Por exemplo, quando o seu parâmetro β for igual a 1 diz-se que ela se aproxima de uma distribuição Exponencial (região 2 da figura 3.1), um β próximo a 3,44 (região 3 da figura 3.1) se aproxima de uma distribuição Normal. A figura 3.1 também mostra que a região 1 é simplificada pela utilização da distribuição Weibull ao invés de se utilizar a Hiper Exponencial.

Figura 3.1 - Comparação Curva da Banheira vs. Distribuições Estatísticas



Fonte: RIGONI (2017).

Os dados de vida do objeto estudado neste trabalho são analisados pela distribuição Weibull, principalmente pelo fato do estudo aqui proposto embasar as análises com poucos dados de falhas.

3.2 REPRESENTAÇÃO MATEMÁTICA DA CONFIABILIDADE

A representação matemática da confiabilidade (gráfico 3.1) é dada pela seguinte definição, onde:

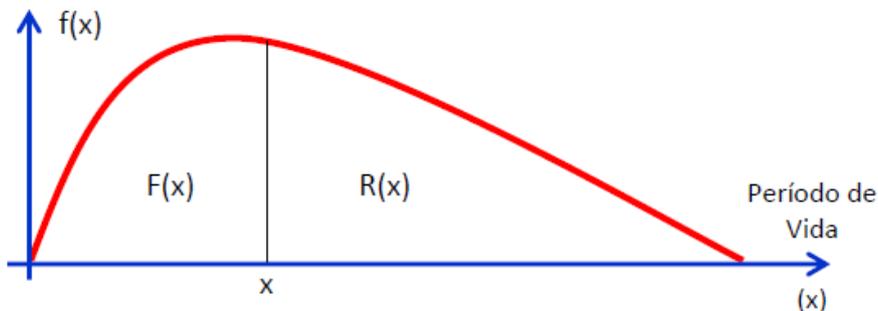
$F(x)$ é a probabilidade acumulada de falha no ponto (x) ;

$$F(x) = \int_0^x f(x) dx \quad (1)$$

$R(x)$ é a probabilidade de sobrevivência após o ponto (x) .

$$R(x) = \int_x^{\infty} f(x) dx \quad (2)$$

Gráfico 3.1 - Representação Matemática da Confiabilidade



Fonte: RIGONI (2017).

Portanto:

$$R(x) + F(x) = 1 \quad (3)$$

Onde a *Probability Density Function* (PDF), ou Função Densidade de Probabilidade, é dada por:

$$f(x) = \frac{dF(x)}{dx} = -\frac{dR(x)}{dx} \quad (4)$$

3.2.1 Função Taxa De Falha

A definição de taxa de falha dá-se pela chance de um item falhar na próxima e menor unidade de tempo, dado que o item funcionou até então.

Sua representação matemática se dá como segue:

$$h(x) = \frac{f(x)}{R(x)} \quad (5)$$

Sendo h do inglês “*Hazard*” no sentido de risco, tratada pela literatura como sinônimo de taxa de falha.

As taxas de falha podem ser crescentes, decrescentes, constantes ou em forma de “banheira”.

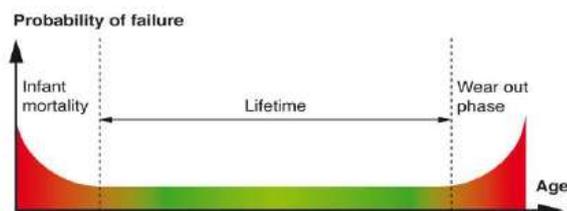
Taxa de falha crescente caracteriza o comportamento de vida do item como sendo desgaste ou velhice, cujo o modo de falha pode sinalizar que o item já chegou no seu tempo de vida.

Já a taxa de falha decrescente caracteriza que o item sofre mortalidade infantil, cujo as causas podem ser problemas na montagem do item, qualidade, etc.

Curva da banheira caracteriza os comportamentos de vida que se iniciam com mortalidade infantil, seguida da vida útil e, por fim, desgaste.

A figura 3.2 é uma representação da “curva da banheira” teórica, pois a curva não necessariamente precisa ser idêntica a da figura.

Figura 3.2 - Representação da Curva da Banheira



Fonte: RIGONI (2017).

3.2.2 Função Vida Média ou MTTF (*Mean Time To Failure*)

Da estatística $E(x)$ para se definir expectativa ou esperança matemática, é o tempo esperado, ou médio, até a falha, normalmente denominado na literatura da Engenharia Confiabilidade como MTTF, ou Tempo Médio entre Falhas.

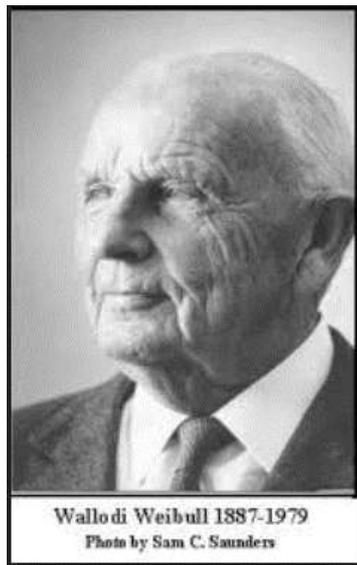
Sua formulação geral é dada por:

$$E(x) = T_{Médio} = \int_0^{\infty} x \cdot f(x) dx = \int_0^{\infty} R(x) dx \quad (6)$$

3.3 DISTRIBUIÇÃO WEIBULL

Waloddi Weibull (fotografia 3.1) nasceu em 18 de Junho de 1887 em Vittskoevle, uma pequena vila no sul da Suécia.

Fotografia 3.1 - Wallodi Weibull



Fonte: B. ABERNETHY (2010).

Inventou a distribuição Weibull em 1937 e entregou para a comunidade científica seu principal trabalho sobre o assunto em 1951.

Ele alegou que sua distribuição poderia ser aplicada a uma vasta gama de problemas. E, ainda, ilustrou este ponto com sete exemplos que vão desde a força do aço até a altura dos adultos do sexo masculino nas Ilhas Britânicas e que a sua descoberta poderia prestar um bom serviço.

A reação a este artigo na década de 1950 foi negativa, indo desde o ceticismo até a rejeição total. O próprio autor foi um dos céticos.

A afirmação de Weibull de que os dados poderiam selecionar a distribuição e ajustar os parâmetros parecia boa demais para ser verdade.

No entanto, os pioneiros no campo, como Dorian Shainin e Leonard Johnson, aplicaram e aprimoraram a técnica.

A Força Aérea dos EUA reconheceu o mérito do método de Weibull e financiou sua pesquisa até 1975.

Hoje, a análise Weibull é o método líder no mundo para ajustar e analisar os dados de vida.

E, segundo B. ABERNETHY (2010), a distribuição Weibull é de longe o modelo estatístico mais popular do mundo para análise de dados de vida.

A Densidade de Probabilidade de Falhas $f(t)$ da distribuição Weibull é dada por:

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta^\beta} \cdot (t - t_0)^{\beta-1} \cdot e^{-\left(\frac{t-t_0}{\eta}\right)^\beta}, \text{ para } t \geq t_0$$

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \cdot \left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta-1} \cdot e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta}, \text{ para } t \geq \gamma$$

$$f(t) = 0, \text{ para } t < t_0 \text{ ou } t < \gamma \quad (7)$$

Por definição:

η - Vida Característica ou Parâmetro de Escala

β - Parâmetro de Forma

t_0 ou γ - Vida Mínima ou Parâmetro de Locação

t - Período de Vida Transcorrido

Já a Probabilidade Acumulada de Falhas $F(t)$ Weibull é dada por:

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta}, \text{ para } t \geq \gamma$$

$$F(t) = 0,0, \text{ para } t < \gamma \quad (8)$$

A representação da Confiabilidade $R(t)$ é dada por:

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta}, \text{ para } t \geq \gamma$$

$$R(t) = 1,0, \text{ para } t < \gamma \quad (9)$$

E a função Taxa de Falha dá-se por:

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\eta} \cdot \left(\frac{t-\gamma}{\eta} \right)^{\beta-1}, \text{ para } t \geq \gamma$$

$$\lambda(t) = 0,0, \text{ para } t < \gamma \quad (10)$$

3.3.1 Aplicação da Weibull 1-Parâmetro para Poucos ou Nenhum Dado de Falha

A PDF (*Probability Density Function*) da Weibull 1-Parâmetro é obtida por meio do ajuste do parâmetro $\gamma = 0$ e assumindo $\beta = C = \text{Constante}$.

$$f(t) = \frac{C}{\eta} \left(\frac{t}{\eta} \right)^{C-1} e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^C} \quad (11)$$

Portanto, o parâmetro desconhecido é o η .

Essa formulação assume que o parâmetro β é conhecido *a priori*, de experiência do passado proveniente de produtos similares ou idênticos.

Segundo MARQUART (2012), assumir um valor fixo de β requer dados suficientes e julgamento de engenharia.

A grande vantagem da simplificação é que com conjuntos de dados com pouca ou nenhuma falha é possível de serem analisados.

Apesar da análise resolver o problema da insuficiência de dados, deve-se ter cuidados especiais com a estimativa do η .

Para os objetivos desse estudo, o autor utiliza do software ReliaSoft Weibull++ para estimar os parâmetros e gerar as métricas de confiabilidade.

² Para aprofundamento no assunto recomenda-se consultar o artigo de Todd A. Marquart, Ph.D intitulado '*Best Practices for Fitting the 1-Parameter Weibull Distribution*', publicado no *2012 Proceedings Annual Reliability and Maintainability Symposium*. O autor faz amplo estudo para apresentar as melhores práticas para uso dos estimadores ML, RBA ML E RR. Disponível em <https://ieeexplore.ieee.org/document/6175495/>

3.3.1.1 Histórico

Este método é denominado Weibayes e foi desenvolvido pelo Dr. Robert Abernethy na Pratt & Whitney. Pode ser usado em situações onde a análise Weibull padrão não resolve, ou tem incertezas tão grandes que limitam o valor da análise. (MARQUART apud B. ABERNETHY, 2012).

O nome Weibayes, cunhado por B. ABERNETHY (2010), sugere uma conexão com a estatística Bayesiana.

Embora ela não seja uma técnica Bayesiana formal, se encaixa no espírito da análise Bayesiana e permite uma série de aplicações.

3.4 ROOT CAUSE ANALYSIS “RCA”

É uma metodologia para analisar, de modo lógico e estruturado os mecanismos da falha, identificar as causas raízes da falha e definir ações corretivas ou mitigadoras. Pode ser aplicada em processos produtivos, manutenção, análise de risco, segurança de processos, etc. (RIGONI, 2017).

De acordo com J. ROONEY et al (2004), a análise de causa raiz (RCA) é um processo projetado para uso na investigação e categorização das causas raízes de eventos com impactos na segurança, saúde, meio ambiente, qualidade, confiabilidade e produção.

Em outras palavras, a RCA é uma ferramenta pensada para ajudar a identificar não apenas o que e como ocorreu um evento, mas também por que ele aconteceu. No processo de investigação é possível chegar ao evento raiz quando se é capaz de determinar por que um evento ou falha ocorreu, somente então serão aplicadas medidas corretivas viáveis que evitem as recorrências.

Root cause analysis helps identify what, how and why something happened, thus preventing recurrence. [...] are underlying, are reasonably identifiable, can be controlled by management and allow for generation of recommendations. The process involves data collection, cause charting, root cause identification and recommendation generation and implementation. (JAMES J. ROONEY AND LEE N. VANDEN HEUVEL, 2004, p. 45)

De acordo com a citação acima, a análise de causa raiz ajuda a identificar o que, como e por que algo aconteceu, evitando a recorrência. Também enfatiza que as causas raízes são subjacentes, razoavelmente identificáveis, podem ser controlados pela gestão e permitem gerar recomendações para mitigação. E, ainda, acrescenta que o processo envolve coleta de dados, criação de gráficos, identificação de causa raiz, geração e implementação de recomendações.

Existem diversas ferramentas para análise de causa raiz, tais como ciclo PDCA, *brainstorming*, pareto, Ishikawa, 5 porquês, entre outras.

Este trabalho fará uso do Ishikawa ou diagrama de causa e efeito, como também é chamado.

O objetivo principal com o uso da ferramenta é ilustrar os modos de falha do objeto de estudo, sumarizando a extensa análise dos relatórios de reparo ou *shop finding reports* das unidades analisadas.

3.5 SÍNTESE E CONCLUSÃO DO CAPÍTULO

O autor faz uma breve revisão bibliográfica sobre Análise de Dados de Vida e suas aplicações e sintetiza as aplicações da análise causas raízes “RCA” discorrendo sobre o uso do diagrama de Ishikawa para análise dos modos de falhas presentes no objeto de estudo.

O presente capítulo reforça o uso do conhecimento científico para dar embasamento nas análises.

Contextualiza o conteúdo científico em uma aplicação prática.

O próximo capítulo trará o desenvolvimento do trabalho em si, os passos do estudo realizado, a aplicação do conteúdo do capítulo 3 com foco na aplicação da Weibull 1-Parâmetro afim de estimar a vida dos servomotores pós-modificação.

4 DESENVOLVIMENTO

Em linha com o capítulo 3, o presente capítulo lança mão das análises de confiabilidade qualitativa e quantitativa afim de estimar os parâmetros da distribuição escolhida, estruturar os modos de falha e seus efeitos no objeto de pesquisa relatado no capítulo 2.

Para o estudo algumas considerações e simplificações foram adotadas na pesquisa e tratamento das informações. A seção 4.1 trata delas.

4.1 CONSIDERAÇÕES E SIMPLIFICAÇÕES ADOTADAS NA ANÁLISE DOS SERVOMOTORS PRÉ-MODIFICAÇÃO

Como considerações e simplificações adotadas, destacam-se:

- A utilização do contador “*Installed Hours*” o qual é tempo instalado até falha ou tempo instalado quando o componente em operação, estes últimos foram considerados como censuras à direita na análise;
- Uma unidade analisada não confirmou a falha em bancada e para 4 unidades não foi possível determinar se falhou, assim denominou na tabela como ‘*unknown*’. As cinco unidades foram tratadas como suspensões na análise.
- O servomotor, uma vez falhado, é removido da sua posição e substituído por outra unidade de mesmo *Part Number* (antes da implementação da melhoria).
- O *workscope* das unidades enviadas para a oficina consiste em substituição do potenciômetro e realização de testes de acordo com o manual do componente, retornando-o para a condição tão bom quanto novo (fator de restauração igual a 1).
- Não foi evidenciado nenhum lote defeituoso no período analisado.
- O período de análise dos dados do PN pré-modificação compreende-se de 01 Janeiro 2016 a 31 Dezembro 2016.
- Também foi validado que os servomotores removidos confirmavam as informações de aeronave e data de remoção com os *shop finding reports* disponíveis.

4.2 PREPARAÇÃO DOS DADOS PARA ANÁLISE DAS UNIDADES PRÉ-MODIFICAÇÃO

Os dados para análise Weibull são organizados em uma tabela obedecendo a sequência: Falha/Suspensão, Tempo até a Falha e Subset ID. Tal análise é feita utilizando o software de análise de dados de vida ReliaSoft Weibull++.

A tabela 4.1 traz o sumário do total de dados de falhas e suspensões analisados do servomotor.

Tabela 4.1 - Dados de falhas e suspensões unidades pré-modificação

Position	Fail Confirmed	Fault/Suspension	Total
Pitch axis	installed	S	45
	N	S	1
	Y	F	17
Yaw axis	installed	S	38
	Y	F	11
Roll Axis	installed	S	51
	Unknown	S	4
	Y	F	55
Total Geral			222

Fonte: do autor (2017).

Legenda para entendimento da tabela 4.1:

Installed = unidade que permaneceu em operação (censuras à direita)

Y = *Yes*

N = *No*

Unknown = não foi possível evidenciar a falha devido a indisponibilidade do *shop finding report*

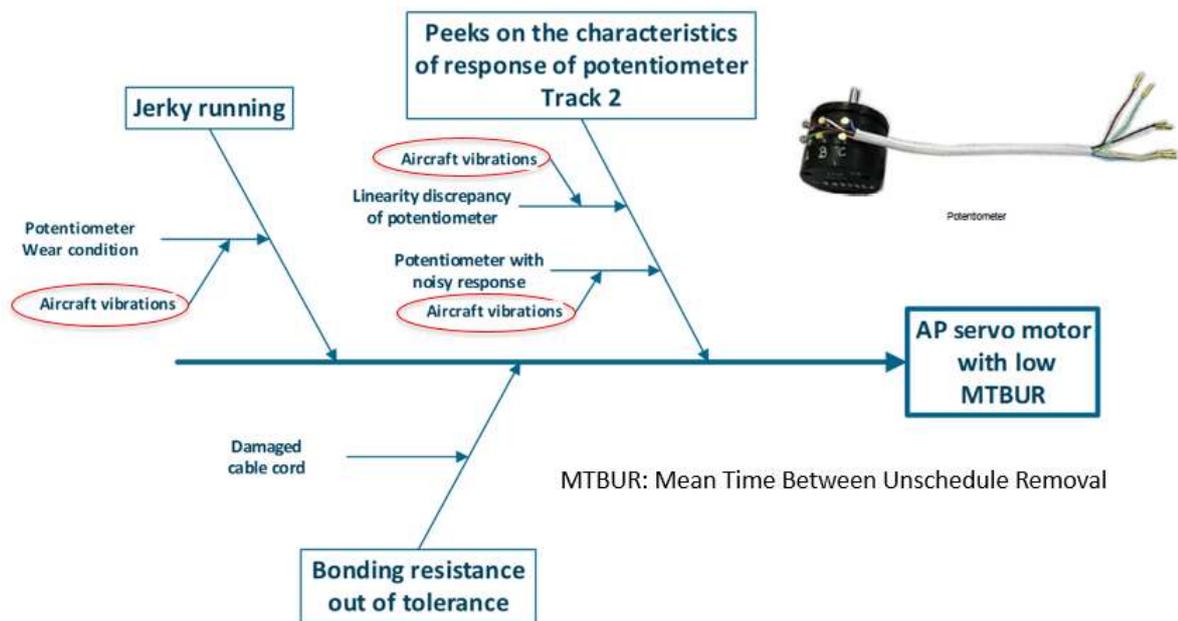
4.2.1 Correlação Com os *Shop Finding Reports* das Unidades

Da figura 4.1 e tabela 4.1 extraem-se algumas constatações importantes, que são:

- Posição *Roll axis* apresenta alta taxa de remoção (ref. tabela 4.1); está localizada em uma região muito suscetível a vibrações;

- b) Forte correlação com a posição de instalação do servomotor;
- c) Desgaste prematuro nas trilhas do potenciômetro causado devido ao estresse mecânico (vibrações) a que estão submetidos (ref. figura 4.1).

Figura 4.1 - Análise causa raiz das unidades pré-modificação



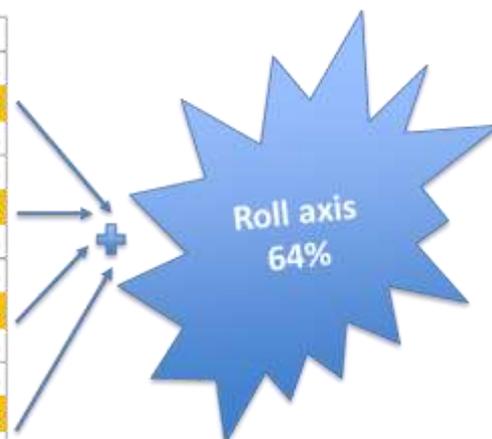
Fonte: adaptado do relatório de engenharia do equipamento pelo autor (2017).

4.2.2 Modos de Falha das Unidades

O estudo qualitativo (ref. tabela 4.2) realizado por meio da análise dos *shop finding reports* mostrou pelos menos 3 modos de falhas predominantes. O grupo “*others*” contém falhas aleatórias, as quais foram consideradas irrelevantes para este estudo.

Tabela 4.2 - Identificação dos modos de falha das unidades pré-modificação

Modo de falha	Position	Total
Peak on the characteristic...	Yaw axis	6,5%
	Roll axis	21,6%
	Pitch axis	5,9%
Bonding resistance	Yaw axis	5,2%
	Roll axis	19,6%
	Pitch axis	5,2%
Others (defective cables, ...)	Yaw axis	3,9%
	Roll axis	11,8%
	Pitch axis	3,9%
Jerky running on the bench test	Yaw axis	1,3%
	Roll axis	11,8%
	Pitch axis	3,3%
Total Geral		100,0%



Fonte: do autor (2017).

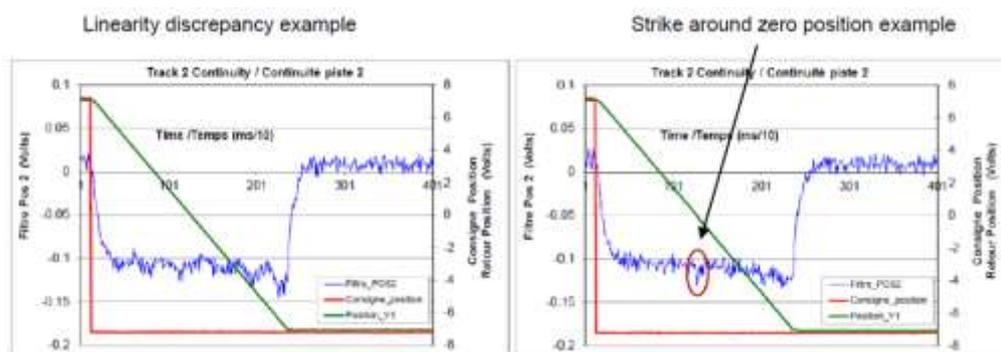
A causa raiz reside em dois modos de falhas principais, que requerem a remoção do componente da aeronave:

a) *“Peaks on the characteristics of response of potentiometer tracks 2”*

Conforme figura 4.2 a análise gráfica dos testes de continuidade mostra discrepâncias de linearidade causadas devido ao desgaste prematuro das trilhas dos potenciômetros.

Em todos os casos que o servomotor passou pela oficina repadora os potenciômetros foram substituídos por novos.

Figura 4.2 - Análise gráfica da discrepância de linearidade



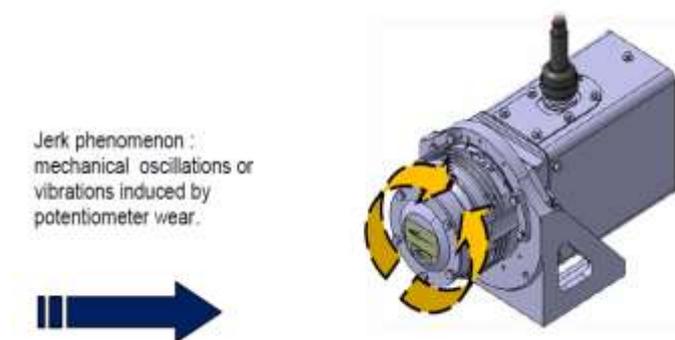
Fonte: adaptado do relatório de engenharia do equipamento pelo autor (2017).

b) *“Jerky running on the bench tests”*

A figura 4.3 tem o objetivo de mostrar como e por que ocorrem as oscilações mecânicas ou vibrações no eixo do servomotor, causados também pelo desgaste prematuro das trilhas dos potenciômetros.

Conforme tabela 4.2 e ilustração da figura 2.2 a região de instalação de maior incidência de falhas é na posição *Roll Axis* devido a proximidade com os motores da aeronave.

Figura 4.3 - Jerk phenomenon



Fonte: adaptado do relatório de engenharia do equipamento pelo autor (2017).

c) *“Bonding resistance and ground continuity tests out of tolerance”*

De modo geral, os modos de falha a) e b) têm a mesma causa raiz que convergem para falha dos potenciômetros levando a falha funcional do servomotor.

Já o modo de falha c) é considerado *“minor”* e, isoladamente, não causa a remoção do componente da aeronave.

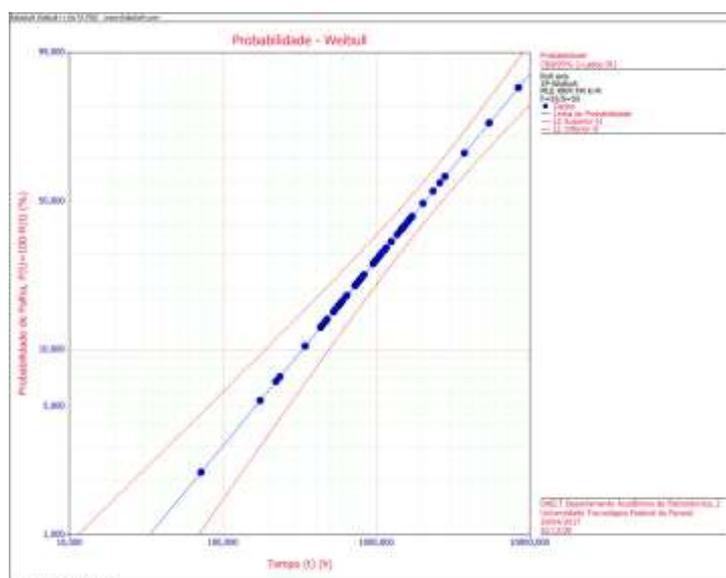
4.3 ANÁLISE WEIBULL DAS UNIDADES PRÉ-MODIFICAÇÃO

Portanto é coerente afirmar que uma análise de dados de vida (LDA) aplica-se bem nesse caso, uma vez que os potenciômetros são sempre descartados no momento do reparo da unidade e ao mesmo tempo a unidade (servomotor) passa por rigorosos testes para avaliar a condição geral de funcionamento, o que leva assumir uma condição de retorno a serviço da unidade como sendo ‘tão boa como nova’, isso é razoável e está bem alinhado com a prática.

Sendo assim, foram calculadas as curvas Weibull de Probabilidade de Falha, Função Densidade de Probabilidade e Probabilidade vs Tempo aplicadas nas respectivas posições de instalação dos servomotores, dado a forte correlação com a posição de instalação das unidades (ref. tabela 4.2).

Para que esse estudo completasse seu objetivo prático, foram considerados como “*drivers*” a posição de instalação do componente na aeronave.

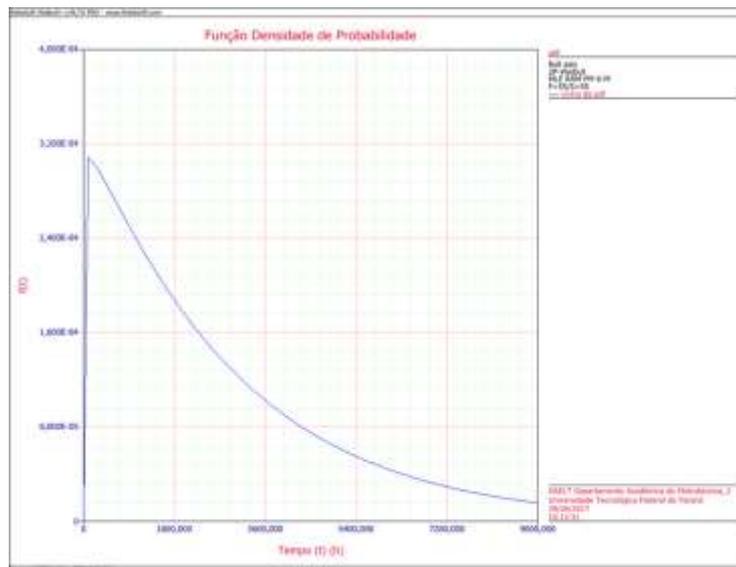
Figura 4.4 - Probabilidade de Falha Roll Axis



Fonte: do autor utilizando Weibull++ (2017).

A figura 4.4 traz a plotagem gráfica da probabilidade de falha $F(t)$ dedicada à posição Roll Axis.

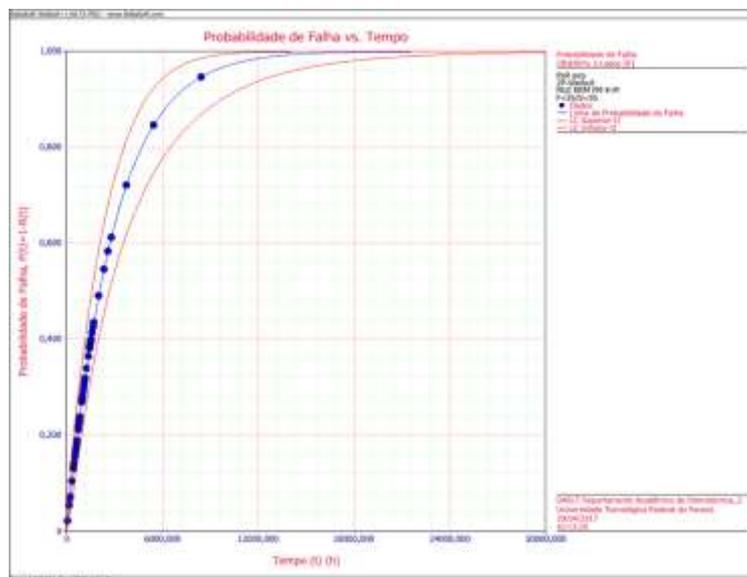
Figura 4.5 - Função Densidade de Probabilidade Roll Axis



Fonte: do autor utilizando Weibull++ (2017).

A figura 4.5 traz a plotagem gráfica da Função Densidade de Probabilidade dedicada à posição Roll Axis.

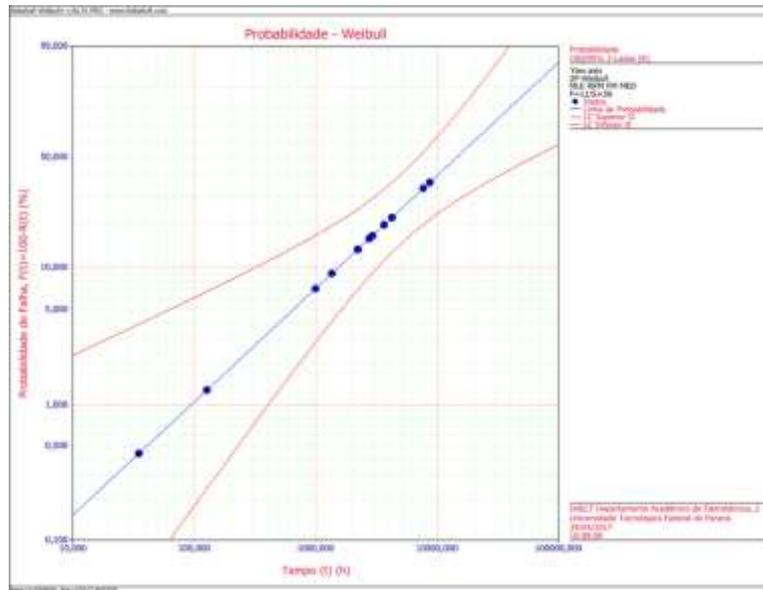
Figura 4.6 - Probabilidade de Falha vs. Tempo Roll Axis



Fonte: do autor utilizando Weibull++ (2017).

A figura 4.6 traz a plotagem gráfica da probabilidade de falha vs tempo dedicada à posição Roll Axis.

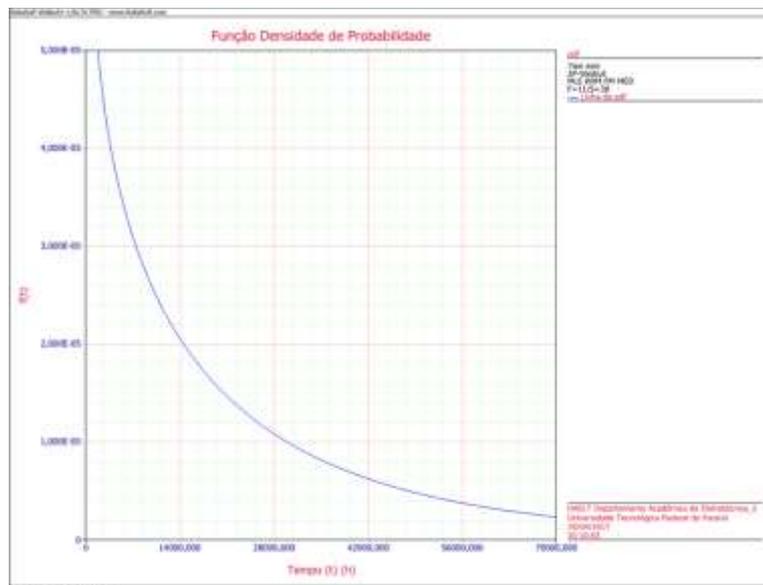
Figura 4.7 - Probabilidade de Falha Yaw Axis



Fonte: do autor utilizando Weibull++ (2017).

A figura 4.7 traz a plotagem gráfica da probabilidade de falha $F(t)$ dedicada à posição Yaw Axis.

Figura 4.8 - Função Densidade de Probabilidade Yaw Axis



Fonte: do autor utilizando Weibull++ (2017).

A figura 4.8 traz a plotagem gráfica da Função Densidade de Probabilidade dedicada à posição Yaw Axis.

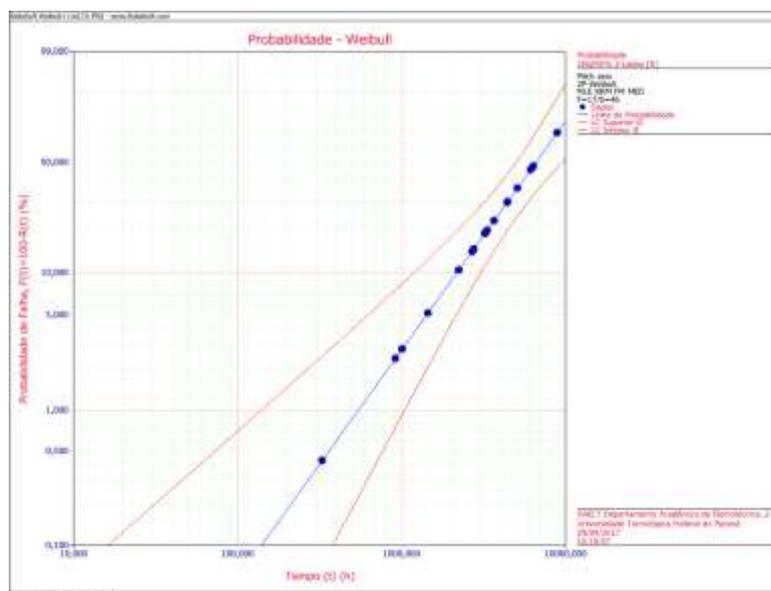
Figura 4.9 - Probabilidade de Falha vs. Tempo Yaw Axis



Fonte: do autor utilizando Weibull++ (2017).

A figura 4.9 traz a plotagem gráfica da probabilidade de falha vs tempo dedicada à posição Yaw Axis.

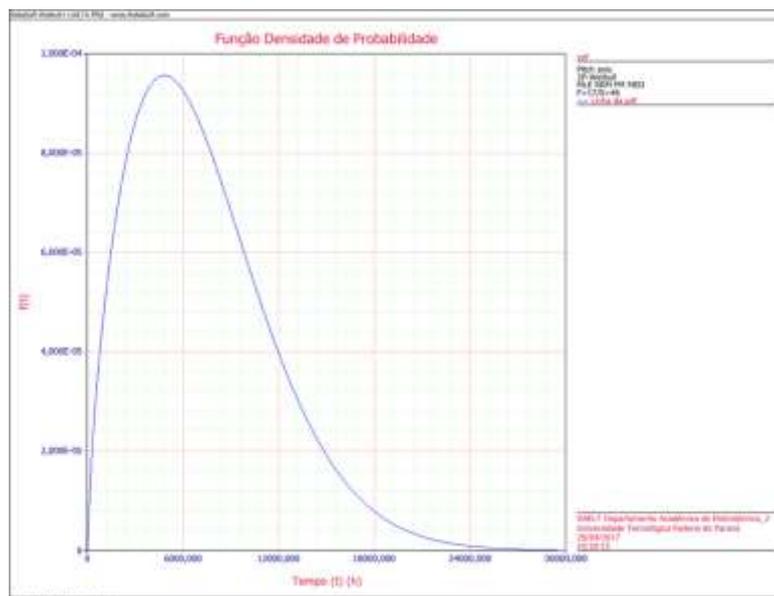
Figura 4.10 - Probabilidade de Falha Pitch Axis



Fonte: do autor utilizando Weibull++ (2017).

A figura 4.4 traz a plotagem gráfica da probabilidade de falha $F(t)$ dedicada à posição Pitch Axis.

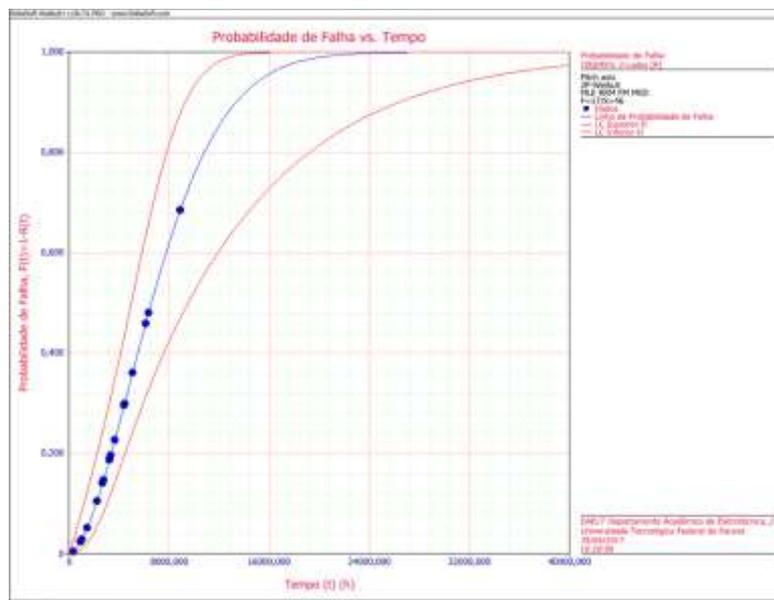
Figura 4.11 - Função Densidade de Probabilidade Pitch Axis



Fonte: do autor utilizando Weibull++ (2017).

A figura 4.11 traz a plotagem gráfica da Função Densidade de Probabilidade dedicada à posição Pitch Axis.

Figura 4.12 - Probabilidade de Falha vs. Tempo Pitch Axis



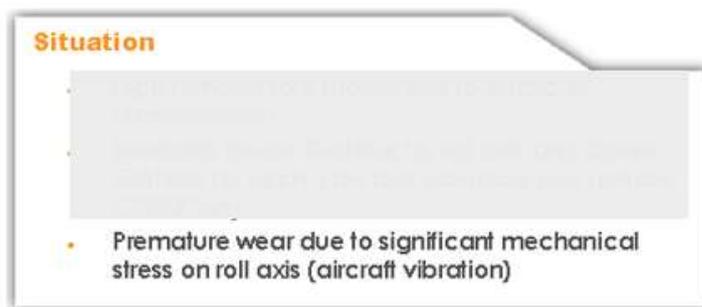
Fonte: do autor utilizando Weibull++ (2017).

A figura 4.12 traz a plotagem gráfica da probabilidade de falha vs tempo dedicada à posição Pitch Axis.

A partir das figuras 4.4 a 4.12 extraem-se algumas constatações importantes, quais sejam:

- a) *Roll axis* e *Pitch axis* apresentam taxa de falha crescente ($\beta > 1$), porém β é um pouco superior a '1';
- b) Confiabilidade varia dependendo da região onde é instalado (η significativamente menor para *Roll axis*), o que corrobora com a constatação analítica da tabela 4.2.

Figura 4.13 - Evidência da falha do potenciômetro



Fonte: adaptado do relatório de engenharia do equipamento pelo autor (2018).

Para substanciar as constatações com mais ênfase, as análises e ensaios realizados pelo fabricante trazem evidências explícitas do desgaste prematuro das trilhas do potenciômetro do servomotor (ref. figura 4.13).

4.4 CONSIDERAÇÕES E SIMPLIFICAÇÕES ADOTADAS NA ANÁLISE DOS SERVOMOTORS PÓS-MODIFICAÇÃO

Afim de preparar e tratar os dados das unidades pós-modificação, também foram utilizadas algumas considerações e simplificações, as quais destacam-se:

- Devido à ausência de dados de falha foram utilizados somente dados censurados à direita na análise;
- Utilizado a Weibull 1-Parâmetro no conjunto de dados analisados (ref. a sub-seção 3.3.1);
- Não foi evidenciado nenhum lote defeituoso no período analisado;

- Cinco unidades do PN pós-modificação foram removidos sem justificativa, ou seja, não falharam. Estas foram censuradas;
- O período de análise dos dados do PN pós-modificação compreende-se de 01 Abril 2017 a 31 Julho 2018;
- Devido a poucos dados disponíveis para as posições *Yaw* e *Pitch axis*, simplificou-se o estudo agrupando todas as posições em uma única curva. A posição *Roll axis* tem mais dados disponíveis pois estão sendo priorizadas no *retrofit*;
- Assumiu-se com base na prática que $\gamma = 0$ e $\beta = 1$ dado que não se evidenciou nenhuma remoção justificada até o momento pelos modos de falhas estudados, então espera-se que o componente apresente falhas aleatórias (componente com grau considerável de componentes eletrônicos em seu interior);
- A simplificação acima faz sentido, pois na prática o servomotor traz uma robustez maior atendendo a condição de uso em qualquer das posições (*roll*, *yaw* ou *pitch axis*). Entendeu-se assim e com base no julgamento de engenharia que a suscetibilidade do componente ao *stress* mecânico foi consideravelmente reduzida no PN pós-modificação.

4.5 ANÁLISE WEIBULL PÓS-MODIFICAÇÃO

Dessa forma prosseguiu-se com a caracterização dos dados, levando em conta que há somente dados suspensos a serem analisados.

Assim, foram catalogadas as unidades de servomotor atualmente instaladas, identificando PN (*Part Number*), SN (*Serial Number*), Posição e Tempo Instalado. Os detalhes são mostrados no Apêndice A deste trabalho.

Em seguida, comparou-se as curvas de confiabilidade pré-modificação vs pós-modificação.

4.6 ANÁLISE DOS RESULTADOS

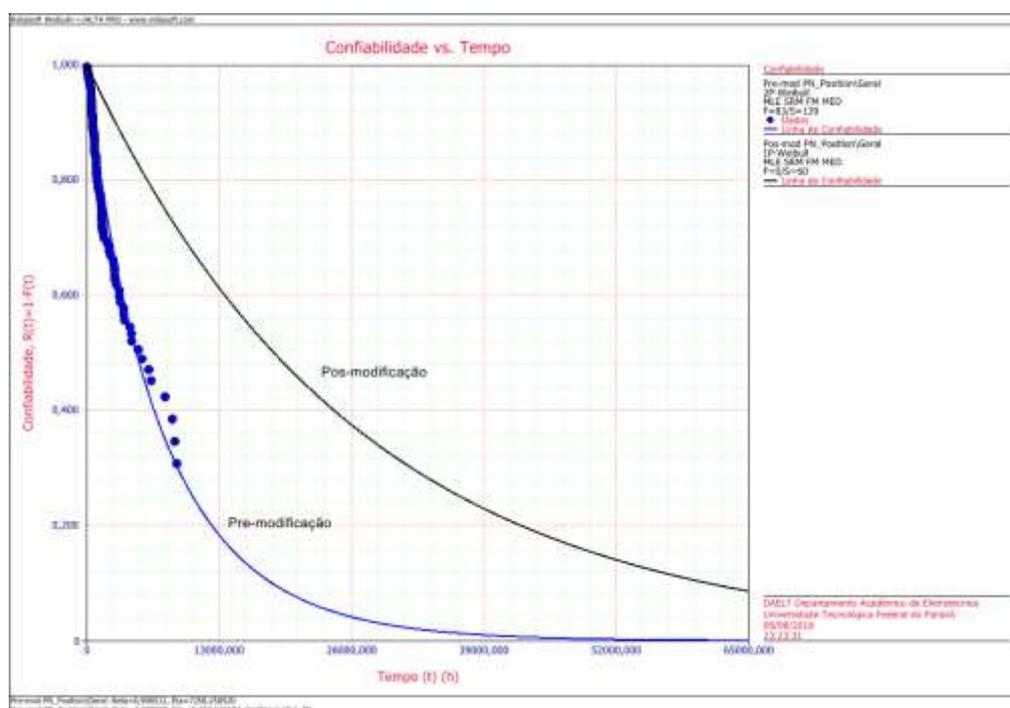
A tabela 4.3 resume o ganho de confiabilidade obtido com a modificação implementada pelo fabricante.

Tabela 4.3 - Comparando ganho de confiabilidade pelo parâmetro de escala η

Pré-modificação	Pós-modificação	Ganho de Confiabilidade
$\eta = 7258$ horas	$\eta = 26495$ horas	Pós-mod
		η superior em aproximadamente 4x comparado ao η pré-mod (nível de confiança = 95%)

Fonte: do autor (2018).

Figura 4.14 - Confiabilidade vs. Tempo Servomotor



Fonte: do autor utilizando Weibull (2018).

A figura 4.14 mostra a comparação da curva pré com a pós-modificação, onde é possível constatar pela inclinação da curva pós-modificação significativo ganho de confiabilidade dos servomotores.

Na tabela 4.4 calcula-se que o ganho de confiabilidade poderá gerar em média a recuperação de 9000 voos por ano, o que representa nos valores de preço médio de assento do ano de 2017 uma economia ao redor de R\$ 3,0 Milhões ano.

Tabela 4.4 - Estimativa de redução de custo com o novo servomotor

Utilização média diária da frota	Estimativa recuperação voos	Tarifa média	Estimativa de redução de custo em R\$
5 voos	9000	336	3,0 Milhões ano

Fonte: do autor (2018).

4.7 SÍNTESE E CONCLUSÃO DO CAPÍTULO

O capítulo 4 faz uso das análises de confiabilidade qualitativa e quantitativa como ferramentas valiosas para estimar a confiabilidade de um ativo.

O autor, ainda, faz algumas considerações e simplificações afim de permitir o estudo.

Por fim, com a aplicação da análise quantitativa aplicando Weibull 1-Parâmetro compara as curvas de confiabilidade dos servomotores nas condições pré e pós-modificação e apresenta a análise dos resultados.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ficou demonstrado com o estudo que o ganho de confiabilidade é expressivo com a instalação do servomotor pós-modificação, apresentando um valor de η 4 vezes maior quando comparado com o valor do servomotor pré-modificação.

A falta de dados de falha dos servomotores pós-modificação apresentou-se como dificuldade no início, apesar de ser ponto positivo do ponto de vista de operação da frota de aeronaves.

Os objetivos geral e específico foram atingidos com a utilização da Weibull 1-Parâmetro, sendo necessárias algumas aproximações e simplificações. Mesmo assim os resultados das estimativas *a priori* ficaram condizentes com a prática.

Atualmente a empresa já colhe os frutos do estudo realizado juntamente ao fabricante. Inclusive com o fornecimento dos novos servomotores na condição FOC (*Free Of Charge*).

Em outras palavras, a empresa não precisou desembolsar nada para obter o componente atualizado. Isso representa ganhar duas vezes, uma com o novo componente e a outra diretamente relacionado ao ganho da disponibilidade da frota de aeronaves, permitindo, assim, que os indicadores apresentem melhora significativa e convergindo aos objetivos estratégicos da empresa.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Gerar nova análise Weibull após 12 meses, coletando novos dados afim de revalidar o comportamento de vida esperado para os servomotores pós-modificação.

REFERÊNCIAS

B. ABERNETHY, Dr Robert. **The New Weibull Handbook**. Fifth Edition. ed. North Palm Beach, Florida: Published And Distributed By Robert B. Abernethy, 2010.

DE PAULA, Marcos. Repondo a confiabilidade do sistema de Piloto Automático em aeronave. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE CONFIABILIDADE, 2017, Belo Horizonte. Anais... Belo Horizonte: ReliaSoft, 2017. P6S1.

Federal Aviation Administration: **Advisory Circular 120-17A: Maintenance Control by Reliability Methods**. 1978.

Federal Aviation Administration: **Advisory Circular AC 120-MRPWG: Reliability Program Methods and Standards for Determining Maintenance Schedule Revisions**. 2015.

J. ROONEY, James; N. VANDEN HEUVEL, Lee. **Root Cause Analysis For Beginners: QUALITY BASICS**. [July 2014]. Disponível em: <https://www.env.nm.gov/aqb/Proposed_Regs/Part_7_Excess_Emissions/NMED_Exhibit_18-Root_Cause_Analysis_for_Beginners.pdf>. Acesso em: 15 jul. 2018.

MARQUART, Todd A. **Best Practices for Fitting the 1-Parameter Weibull Distribution**. 2012. 6 p. Artigo - Proceedings Annual Reliability and Maintainability Symposium, Reno, NV, USA, 2012. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6175495/>. Acesso em: 20 ago. 2018.

FLÁVIO, José. RELIASOFT. LDA. 11-12 ago. 2017. Notas de Aula. Análise de dados de vida.

RIGONI, Emerson. RCA. 28-29 abr. 2017. Notas de Aula. Métodos para Análise de Falhas.

RIGONI, Emerson. **METODOLOGIA PARA IMPLANTAÇÃO DA MANUTENÇÃO CENTRADA NA CONFIABILIDADE: uma abordagem fundamentada em Sistemas Baseados em Conhecimento e Lógica Fuzzy**. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina, p. 33-52. Santa Catarina. 2009.

Lista de sites acessados:

Página EASA: <https://www.easa.europa.eu/>. Acesso em 18 out. 2018.

Página FAA: <https://www.faa.gov/>. Acesso em 18 out. 2018.

Página ICAO: <https://www.icao.int/Pages/default.aspx> . Acesso em 18 out. 2018.

Página ReliaSoft: http://reliawiki.org/index.php/The_Weibull_Distribution. Acesso em 17 ago. 2018.

APÊNDICE - LISTA DOS SERVOMOTORS ANALISADOS PÓS-MODIFICAÇÃO

Apresenta aspectos suplementares relacionados ao Capítulo 4

Part Number	Serial Number	Posição	Tempo Instalado	Part Number	Serial Number	Posição	Tempo Instalado
XYZ	123	Roll Axis	2367	XYZ	123	Yaw Axis	1230
XYZ	123	Roll Axis	1951	XYZ	123	Roll Axis	851
XYZ	123	Roll Axis	1355	XYZ	123	Roll Axis	2196
XYZ	123	Roll Axis	1997	XYZ	123	Yaw Axis	1046
XYZ	123	Pitch Axis	451	XYZ	123	Roll Axis	848
XYZ	123	Roll Axis	1955	XYZ	123	Pitch Axis	1335
XYZ	123	Roll Axis	974	XYZ	123	Roll Axis	720
XYZ	123	Roll Axis	938	XYZ	123	Roll Axis	1041
XYZ	123	Yaw Axis	820	XYZ	123	Yaw Axis	2053
XYZ	123	Roll Axis	881				
XYZ	123	Pitch Axis	752				
XYZ	123	Roll Axis	760				
XYZ	123	Roll Axis	2563				
XYZ	123	Yaw Axis	1347				
XYZ	123	Roll Axis	1963				
XYZ	123	Roll Axis	2623				
XYZ	123	Yaw Axis	304				
XYZ	123	Roll Axis	1242				
XYZ	123	Roll Axis	1983				
XYZ	123	Roll Axis	1411				
XYZ	123	Pitch Axis	1552				
XYZ	123	Roll Axis	1880				
XYZ	123	Roll Axis	2037				
XYZ	123	Pitch Axis	1480				
XYZ	123	Roll Axis	1775				
XYZ	123	Roll Axis	1347				
XYZ	123	Roll Axis	789				
XYZ	123	Pitch Axis	182				
XYZ	123	Pitch Axis	2038				
XYZ	123	Roll Axis	541				
XYZ	123	Yaw Axis	541				
XYZ	123	Pitch Axis	1565				
XYZ	123	Roll Axis	2086				
XYZ	123	Yaw Axis	1766				
XYZ	123	Roll Axis	1594				
XYZ	123	Roll Axis	2351				
XYZ	123	Yaw Axis	2016				
XYZ	123	Roll Axis	1504				
XYZ	123	Yaw Axis	1155				
XYZ	123	Roll Axis	2084				
XYZ	123	Roll Axis	64				
XYZ	123	Roll Axis	410				
XYZ	123	Pitch Axis	691				
XYZ	123	Roll Axis	1433				
XYZ	123	Roll Axis	1934				
XYZ	123	Roll Axis	1036				
XYZ	123	Roll Axis	872				
XYZ	123	Pitch Axis	199				
XYZ	123	Roll Axis	772				
XYZ	123	Yaw Axis	201				
XYZ	123	Pitch Axis	1519				