

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
ESPECIALIZAÇÃO EM ENGENHARIA DE CONFIABILIDADE**

CRISTIANE TORATI

**ANÁLISE DE CONFIABILIDADE NA MANUTENÇÃO AERONÁUTICA DE
COMPONENTE**

MONOGRAFIA DE ESPECIALIZAÇÃO

CURITIBA

2016

CRISTIANE TORATI

**ANÁLISE DE CONFIABILIDADE NA MANUTENÇÃO AERONÁUTICA DE
COMPONENTE**

Monografia apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Confiabilidade da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, como requisito parcial para a obtenção do título de Especialista em Engenharia de Confiabilidade.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Henrique Mariano

CURITIBA

2016



TERMO DE APROVAÇÃO

ANÁLISE DE CONFIABILIDADE NA MANUTENÇÃO AERONÁUTICA DE COMPONENTE

por

CRISTIANE TORATI

Esta Monografia foi apresentada em 15 de dezembro de 2016 como requisito parcial para a obtenção do título de em Engenharia da Confiabilidade. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof. Carlos Henrique Mariano Dr.
Orientador

Emerson Rigoni, Dr. Eng.
UTFPR

Prof. Marcelo Rodrigues Dr.
UTFPR

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

RESUMO

Este trabalho apresenta uma discussão a respeito das principais técnicas utilizadas na modelagem e na análise de Confiabilidade aplicada no setor de manutenção aeronáutica. Primeiramente são apresentadas considerações do setor de manutenção aeronáutica, seguidos dos conceitos da área de Engenharia de Confiabilidade, bem como as suas características da análise de confiabilidade aplicada a componentes em serviço ou em campo. De modo a verificar a utilidade e aplicabilidade prática dos métodos de confiabilidade discutidos especificamente para o setor de manutenção aeronáutica, é apresentado um estudo baseado em dados de um determinado sistema que apresentou indisponibilidade gerando custos de operação elevados devido ao lucro cessante e insatisfação do cliente. Através dos dados de confiabilidade é possível estabelecer o melhor tempo a fim de se executar uma tarefa preventiva, ao invés de seguir com manutenções corretivas. No caso estudado, a implementação da preventiva possibilita reduzir em 75% o custo do modelo atual, impactando diretamente no lucro cessante e na satisfação do cliente.

Palavras-chave: Confiabilidade, Manutenção aeronáutica, Intervalo ótimo de manutenção

ABSTRACT

This work presents a discussion about the most useful techniques on the Reliability analysis and modeling applied in the aeronautical maintenance sector. Initially, considerations regarding the aeronautical maintenance sector are presented, followed by the concepts in the Reliability Engineering field, as well as the main characteristics the reliability analysis applies to components in service. In order to verify the utility and practical applicability of the reliability methods discussed specifically for the aeronautical maintenance, it is presented a study based on data from a certain system that has shown unavailability in service, creating high operating costs due ceasing profits and customer dissatisfaction. Using reliability data it is possible to determine the optimum time to perform a preventive maintenance task, instead of keep going with corrective actions. On the present study, the implementation of a preventive task represents a cost reduction of 75% in the current model, directly affecting the ceasing profits and customer satisfaction.

Keywords: Reliability, Aeronautical Maintenance, Optimum Maintenance Interval

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	8
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	10
1 CAPÍTULO	11
1.1. Introdução	11
1.2. Problema e Justificativa	14
1.3. Objetivos	17
1.1.1 Objetivo Geral.....	17
1.1.2 Objetivo específico	17
1.4. Metodologia	17
1.5. Estrutura do trabalho.....	17
2 CAPÍTULO II	19
2.1 A Manutenção Aeronáutica	19
2.2 Confiabilidade e Manutenção	20
2.3 Programa de Manutenção	21
2.3.1 Manutenibilidade.....	22
2.3.2 Custos de Manutenção	23
2.3.3 Disponibilidade x Despachabilidade	24
2.3.3.1 Lista Mínima de Equipamento (MEL).....	26
2.4 Dados Para Análise de Confiabilidade e Manutenção.....	27
2.4.1 Utilização dos dados de confiabilidade	29
3 CAPÍTULO III.....	31
3.1 Fundamentos da Análise de Confiabilidade	31
3.1.1 Confiabilidade e Qualidade	31
3.1.2 Funções de Confiabilidade.....	32
3.1.2.1 Função Confiabilidade R(t)	32

3.1.2.2	Distribuição Acumulada de Falha $F(t)$	33
3.1.2.3	Densidade de Probabilidade de Falha $f(t)$	34
3.1.2.4	Função Taxa de Risco ou Taxa de Falha $h(t)$	34
3.1.3	Função confiabilidade e o tempo médio até falha (MTTF).....	35
3.1.4	Função de risco e as fases de vida de um produto.....	35
3.1.5	Modelos de Confiabilidade	37
3.1.5.1	Distribuição Exponencial	37
3.1.5.2	Distribuição Gama.....	39
3.1.5.3	Distribuição Log-normal	41
3.1.5.4	Distribuição de Weibull.....	44
4	CAPÍTULO IV	47
4.1	Metodologia	47
4.2	Análise de Confiabilidade de Componente	47
5	Capítulo V.....	56
5.1	Resultados e Conclusão	56
	REFERÊNCIAS	58

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Tempo de parada em minutos por ano	14
Figura 2 – Custo de Operação	15
Figura 3 – Custo Direto de Manutenção por Segmento - 2014	16
Figura 4 – Custo Direto de Manutenção por Segmento – Previsão em 10 anos	16
Figura 5 – Padronização da terminologia da manutenção	19
Figura 6 – Confiabilidade de Despacho	24
Figura 7 – Distribuição de tempo para a missão típica de uma aeronave comercial regional..	25
Figura 8 – Exemplo MEL.....	27
Figura 9 – Variável de estado e tempo até falha.....	33
Figura 10 – Curva da Banheira.....	36
Figura 11 – Representações da Função de Confiabilidade da distribuição Exponencial	37
Figura 12 – Representação da Função <i>cdf</i> da distribuição Exponencial	38
Figura 13 – Representação da função <i>pdf</i> da distribuição Exponencial	38
Figura 14 – Representação da Taxa de Falha da distribuição Exponencial	39
Figura 15 – Representação da função <i>pdf</i> da distribuição Gama	40
Figura 16 – Representação da função <i>cdf</i> da distribuição Gama.....	40
Figura 17 – Representação da Taxa de Falha e Função Confiabilidade da distribuição Gama	41
Figura 18 – Representação da função <i>pdf</i> da distribuição Log-normal.....	42
Figura 19 – Representação da Função Confiabilidade da distribuição Log-normal	43
Figura 20 – Representação da Função <i>cdf</i> da distribuição Log-normal	43
Figura 21 – Representação da Taxa de Falha da distribuição Log-normal	44
Figura 22 – Representação da Função <i>cdf</i> da distribuição Weibull	44
Figura 23 – Representação da Confiabilidade da distribuição Weibull	45
Figura 24 – Representação da função <i>pdf</i> da distribuição Weibull	45
Figura 25 – Representação da Taxa de Falha da distribuição Weibull	46
Figura 26 – Pareto Sistemas x Indisponibilidade	47
Figura 27 – Estrutura simplificada do Sistema Analisado	48
Figura 28 – Detalhamento das Remoções do período de 18 meses.....	49
Figura 29 – Tela do <i>software</i> : assistente de distribuição.....	50
Figura 30 – Tela do <i>software</i> : Tempos até falha	51
Figura 31 – Tela do <i>software</i> : Gráfico <i>pdf</i>	52
Figura 32 – Tela do <i>software</i> : Planejamento da manutenção.....	54

Figura 33 – Custos de manutenção.....	54
Figura 34 – Detalhamento da curva do custo total de manutenção	55

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ADG	Airline Disclosure Guides
AEG	Aircraft Evaluation Group
ANAC	Agência Nacional De Aviação Civil
ATA	Air Transport Association
cdf	Função De Distribuição Acumulada
FAA	Federal Aviation Administration
FOEB	Flight Operations Evaluation Boards
FRACAS	Failure Reporting, Analysis, And Corrective Action System
IATA	International Air Transport Association
KPI	Performance Key Indicators
MEL	Minimum Equipment List
MMEL	Master Minimum Equipment List
MTBF	Mean Time Between Failure
MTCF	Maintenance Cost Task Force (Força Tarefa Em Custo De Manutenção)
MTTF	Mean Time To Failure
NEF	Nonessential Equipment And Furnishings
pdf	Probability Density Function
US DOT	United States Department of Transportation

3 CAPÍTULO

1.1. Introdução

Com o constante avanço tecnológico, equipamentos tornam-se obsoletos pouco tempo após dominarem sua parte no mercado. Entretanto, espera-se que a aquisição de itens de elevado valor contemple um período de operação segura e derivem um lucro operacional considerável, apesar da inevitável obsolescência (DUEK, 2005).

Conforme o ADG (*Airline Disclosure Guides*¹) Custo de Aquisição e Depreciação de Aeronaves, publicado em 2016 pela IATA (*International Air Transport Association*²), a indústria aérea é de capital intensivo e a representatividade dos ativos da aeronave tem um impacto significativo nos resultados financeiros das companhias aéreas. Aeronaves são produtos de alto custo e um ativo de longa vida contendo muitos componentes individuais. As ordens de compra muitas vezes são feitas anos antes da entrega, e seu preço inclui mecanismos complexos de desconto, incluindo "créditos". Os pagamentos aos fabricantes de aeronaves podem incluir pagamentos de opcionais (valores pagos com antecedência para garantir a compra da aeronave), compra de direitos, depósitos e pagamentos progressivos. Na indústria aeronáutica, as transações são tipicamente denominadas em dólar e, portanto, podem expor as companhias aéreas não americanas ao risco cambial, além dos custos envolvidos com o planejamento logístico, implantação e operação.

A vida útil prevista para a geração atual de aeronaves é de cerca de 30 anos, uma gama de tempo consideravelmente elevada, e precisa ser avaliada, em termos de segurança e eficiência da operação. Portanto, a variável tempo é contemplada em um estudo de confiabilidade que tem como objetivo especificar o prazo pelo qual um determinado componente ou sistema pode desempenhar corretamente sua função específica, sob condições apropriadas de uso.

Segundo MARCORIN (2001, p.2),

... o domínio da confiabilidade nos produtos confere à empresa uma vantagem competitiva em relação aos seus concorrentes, que se traduz, na prática, na melhor alocação de custos de garantia e de suporte, inventário de peças de reposição mais adequados, e menor custo estendido de seus produtos ao longo do ciclo de vida dos mesmos.

¹ Guia de Divulgação para Companhias Aéreas (tradução livre)

² Associação Internacional do Transporte Aéreo (tradução livre)

CONTI (2011) aborda como a forma de assegurar que um sistema execute continuamente a função pretendida nos níveis de confiabilidade e segurança projetados, seja através da inspeção, revisão geral, reparo, substituição de componentes e peças, testes funcionais e preservação. Estas variáveis surgem na década de 60 como fatores decisivos na manutenção com a dependência da indústria em máquinas mais complexas e a disponibilidade operativa dos equipamentos torna-se o foco principal, levando aos primeiros conceitos de manutenção preventiva. Nesta época, também se associou o surgimento de exigências com relação à expectativa da vida útil dos equipamentos e aos custos menores. Os tempos atuais se refere à terceira geração da manutenção, isto é, características como: disponibilidade, confiabilidade, segurança e vida útil, com ausência de danos ao meio ambiente ações de manutenções eficazes são o foco, todas as variáveis aliadas a redução dos custos envolvidos (BARBOSA, 2009).

No início da aviação, a manutenção era executada de conforme se apresentavam as falhas de operação, implicando muitas vezes em várias horas de manutenção para cada hora de voo da aeronave. A tarefas de manutenção nesta fase se resumiam a revisão de quase todas as partes das aeronaves em um determinado período de tempo, tornando a manutenção, apesar de simples à primeira vista, dispendiosa. Com a crescente complexidade das aeronaves e de seus sistemas de navegação, nos anos seguintes, os custos de manutenção aumentaram proporcionalmente (KINNISON; SIDDIQUI, 2004).

No setor aeronáutico, a manutenção é um fator crítico devido a sua influência direta no custo operacional (aeronavegabilidade e manutenibilidade), na segurança do voo e também pelos rígidos controles existentes no setor. Os requisitos de aeronavegabilidade visam garantir a segurança da operação, definindo o projeto, os processos de fabricação e materiais, os parâmetros de voo e desempenho desejado da aeronave, seus sistemas e componentes. Durante as fases de desenvolvimento do projeto da aeronave são criados programas detalhados de manutenção. Esses programas de manutenção buscam garantir a aeronavegabilidade continuada em qualquer circunstância, sendo ajustados para cada operador a fim de adaptá-los com a operação de cada cliente.

Aliadas, as companhias aéreas, fabricantes e órgãos reguladores somam esforços para melhorar as técnicas de desenvolvimento e manutenção e para garantir a continuada satisfação do cliente e a otimização dos tempos operacionais da frota. A fim de cumprir as cláusulas contratuais, as empresas do setor aeronáutico monitoram diversos parâmetros de controles, ou *Performance Key Indicators* (KPI). Os parâmetros de Segurança e Operação de Voo se mesclam diretamente com os parâmetros de Finanças, uma vez que o principal método para

medir o desempenho financeiro de uma empresa aérea é através das margens de operação. A principal medida de desempenho operacional é a pontualidade da partida do voo pois, exige que outros processos operacionais estejam sendo executados sem problemas e é um fator decisivo para os clientes recomendarem determinada companhia.

Segundo o Departamento de Transporte dos Estados Unidos (US DOT), um voo é considerado atrasado após 15 minutos do horário originalmente estabelecido para a decolagem, e cancelado quando a aeronave não tem condições de assumir o voo. Dentre as principais causas de atrasos, estão: problemas de manutenção da aeronave; tripulação; abastecimento; bagagem; condições meteorológicas; congestionamento do tráfego aéreo e; preocupações com segurança. O órgão de apoio *Air Transport Association* (ATA), estima que os custos anuais com atrasos para as companhias aéreas americanas estão em torno de US\$31 bilhões.

Contratualmente, é responsabilidade dos fornecedores de cada sistema da aeronave assegurar que seus sistemas estarão disponíveis e operando em perfeita condição a fim de garantir a despachabilidade da aeronave. Quando identificado que determinado sistema provocou um atraso por falha, que exija manutenção corretiva imediata, o fornecedor do sistema em questão é responsabilizado com parte destes custos, além de multas caso os parâmetros de controle não sejam atingidos.

Para que a aeronave opere respeitando as condições mínimas de segurança e aero navegabilidade estabelecidas pelos órgãos regulamentadores, certos equipamentos e componentes considerados essenciais recebem atenção extra durante o procedimento de despacho da aeronave. Estes equipamentos são listados na MMEL, a *Master Minimum Equipment List*, um documento elaborado pelos fabricantes dos sistemas nele descritos, e aprovado pelos órgãos fiscalizadores, como a Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC) no Brasil.

Caso uma falha seja detectada, a liberação ou não da aeronave para voo é indicada pela *MMEL*, seja pela substituição do componente defeituoso, ou pela realização de ações de contenção, descritas na *MMEL*, e capazes de contornar a função exercida pelo componente.

Devido aos termos de sigilo e confidencialidade da empresa na qual este trabalho foi desenvolvido, dados como nome da empresa, companhias aéreas, e aeronaves serão preservados e substituídos por nomes genéricos quando necessário.

1.2. Problema e Justificativa

Para satisfazer seus clientes e também manter a imagem da empresa, garantir a confiabilidade e principalmente a disponibilidade de seus sistemas é essencial no setor aeronáutico. A busca de eficiência sem limites, que se traduz em lucro, faz com que os voos das aeronaves comerciais, mesmo que antigas, sejam planejados de tal forma que se aproveite o máximo de sua capacidade nominal. Entretanto, devido a longa operação, os equipamentos apresentam desempenhos inferiores e por isso deveriam trabalhar com maior margem de segurança, ou seja, a capacidade real sofre alterações no decorrer da vida útil. Este cenário é facilmente observado no gráfico da Figura 1 que representa o acúmulo do tempo de parada por ano de determinada fabricante em relação aos sistemas da empresa em estudo. Em 2015, o tempo de parada total foi de aproximadamente 102.000 minutos. Este valor de atraso representa aproximadamente 70 dias sem operação, que resulta em uma perda de até US\$ 10.000,00 por dia.



Figura 1 – Tempo de parada em minutos por ano

Fonte: Autora (2016)

Conforme o relatório de manutenção MTCF³ fornecido anualmente pela IATA as tarefas de manutenção representam de 10 a 20% dos custos diretos de operação de um operador, dependendo do tamanho do frota, idade e uso. A IATA reporta que em 2014 a manutenção ocupou o terceiro lugar na contribuição com os custos de operação, em torno de 12%, entretanto, esta média inclui valores individuais que chegam até 25%. Nas últimas duas

³ *Maintenance Cost Task Force* (Força Tarefa em Custo de Manutenção). Fundado pela IATA, este grupo surgiu em 1959 como um grupo de análise de desempenho de produção e hoje é o único grupo que busca e analisa dados de custo de manutenção voluntariamente.

décadas, a contribuição da manutenção no custo médio direto de operação não apresentou redução significativa.



Figura 2 – Custo de Operação

Fonte: IATA MCTF (2014)

A manutenção aeronáutica é compartimentada em quatro segmentos essenciais:

- **Manutenção Agendada:** inclui o *heavy maintenance* (revisões programadas), modificações e renovações estruturais e de aviônicos, o cumprimento de boletins de serviço e de diretivas de navegabilidade emitidas pelas autoridades aeronáuticas e fabricantes;

- **Manutenção de Linha:** considerada toda a manutenção realizada durante a parada da aeronave (aerportos ou hangares) sem recurso a desmontagens;

- **Manutenção de Motores:** é a manutenção realizada em motores uma vez removidos das aeronaves e enviados para as oficinas de reparo certificadas;

- **Manutenção de Componentes:** esta é a manutenção de todos os componentes das aeronaves (exceto os motores) uma vez removidos destas e enviados para as oficinas de reparo certificadas. Nesta categoria incluem-se os componentes isoladamente como também os conjuntos conforme removidos.

A Figura 3 apresenta a distribuição do custo da manutenção por segmento em 2014:

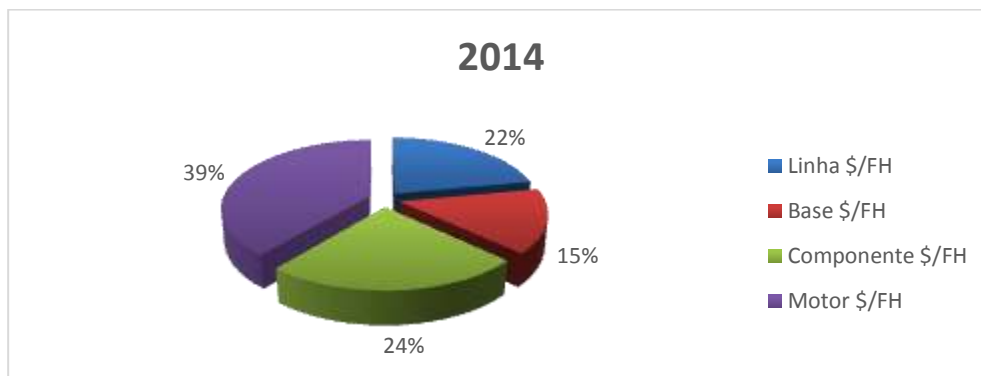


Figura 3 – Custo Direto de Manutenção por Segmento - 2014

Fonte: IATA Best Practices for Component Maintenance Cost Management (2016)

Entre 2010 e 2014 o custo médio por hora de voo na manutenção de componentes subiu 25% e estudos atuais estimam que na próxima década o custo com manutenção terá um aumento de 30%.

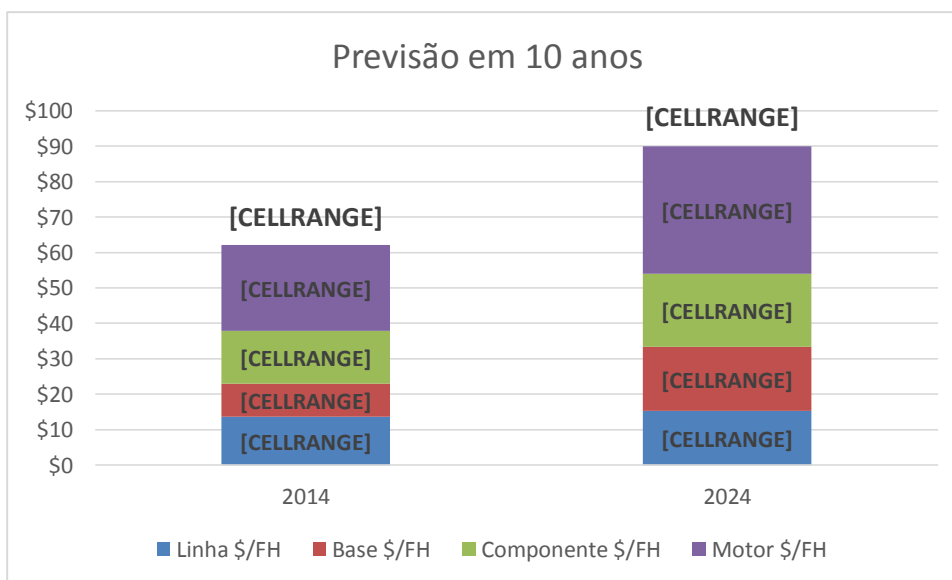


Figura 4 – Custo Direto de Manutenção por Segmento – Previsão em 10 anos

Fonte: IATA ADG (2016)

1.3. Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

O presente estudo se propõe a analisar a confiabilidade de um sistema aeronáutico por meio da análise de desempenho do componente e sistemática do processo de manutenção, durante o respectivo ciclo de vida, focando na redução dos custos com a manutenção de componente e tempo de parada e o aumento de disponibilidade.

1.1.2 Objetivo específico

- a) Avaliar quais subsistemas impactam na despachabilidade da aeronave e identificar o componente crítico da aeronave A1, seu ciclo de vida e tipos de dados disponíveis para servir como amostra na análise de confiabilidade;
- b) Conhecer e identificar os modos, efeitos e causas da falha do sistema;
- c) Modelar os dados do modo de falha gerando indisponibilidade do sistema para o conhecimento do comportamento do componente em serviço;
- d) Definir uma metodologia de intervenção baseado nos resultados da análise de confiabilidade e calcular o intervalo ótimo de manutenção, visando assim reduzir custos com tarefas corretivas e aumentar a disponibilidade do sistema;
- e) Calcular e avaliar a possível margem de economia para a Empresa fornecedora e fabricante da aeronave A1.

1.4. Metodologia

Através dos relatórios de dados de campo, onde são relacionados quais componentes e sistemas falharam impossibilitando a aeronave de assumir voo e, portanto, impactando diretamente na despachabilidade da aeronave, será feita uma análise identificando qual modo de falha e qual componente foi responsável pela indisponibilidade do sistema. Com os tempos até estas falhas será feita uma análise de dados de vida a fim de compreender o comportamento do modo de falha e permitir o cálculo estatístico do tempo ótimo de uma tarefa preventiva, uma vez que os custos da manutenção corretiva e preventiva são conhecidos.

1.5. Estrutura do trabalho

O desenvolvimento do trabalho está estruturado em cinco capítulos:

I. Capítulo 1: contextualização do trabalho, apresenta uma base introdutória para o tema do trabalho abordando a motivação para a investigação do tema, bem como os objetivos pretendidos e os meios pelos quais o objetivo proposto pela pesquisa será alcançado;

II. Capítulo 2: apresentação do sistema a ser estudado, funcionamento e características;

III. Capítulo 3: fundamentação teórica do estudo, apresentação das ferramentas utilizadas no estudo, estruturação e conceituação;

IV. Capítulo 4: detalhamento da aplicação dos conceitos teóricos abordados no capítulo 3 ao objeto de pesquisa apresentado no capítulo 2;

V. Capítulo 5: apresentação dos resultados obtidos da aplicação da base teórica ao objeto de estudo, considerações finais e trabalhos futuros, bem como a conclusão dos objetivos propostos no capítulo 1.

4.1 A Manutenção Aeronáutica

Para Higgins e Mobley (2008) a manutenção é uma ciência que depende, em determinado momento, da maioria ou da totalidade de todas as ciências. É uma arte, visto a extensa diversidade de abordagens e níveis de aptidão - demonstrados por gerentes, supervisores e técnicos de manutenção - durante o tratamento de problemas similares, e muitas vezes frequentes. Trata-se também de uma filosofia que pode ser intensivamente aplicada ou não, dependendo da ampla gama de variáveis que muitas vezes transcendem as soluções mais imediatas e óbvias.

O objetivo da manutenção é assegurar a disponibilidade do sistema. Na indústria aeronáutica, a manutenção é uma parte essencial para garantir a aeronavegabilidade, além disto, são permitidas acontecerem falhas críticas não durante o voo. Conforme as normas NBR 5462 e SS-EN 13306, a manutenção é dividida em corretiva e preditiva, e esta última em manutenção preventiva e manutenção controlada/condicionada.

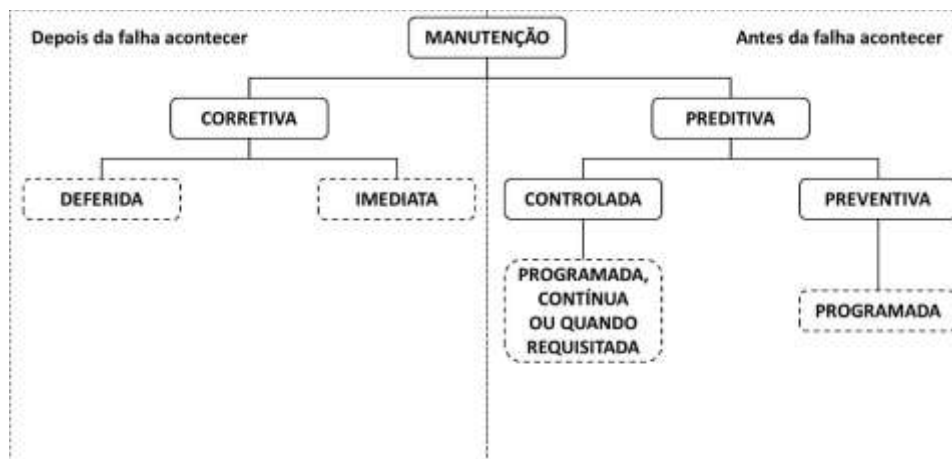


Figura 5 – Padronização da terminologia da manutenção

Fonte: adaptado de Yu, He e Zhang (2009)

A manutenção corretiva é definida por um conjunto de atividades que são executadas com a intenção de restaurar a funcionalidade e desempenho do sistema após uma falha ter acontecido. Este tipo de manutenção também pode ser chamada de "tarefa não agendada" ou "tarefa não programada", e seu tempo de execução é incerto.

Já as manutenções preventivas e controladas são programadas para então serem executadas. Na manutenção preventiva o item é trocado ou reparado de acordo com um plano

de manutenção previamente determinado, com o objetivo de reduzir a probabilidade de falha de um item/sistema ou maximizar a operação.

Finalmente, a manutenção condicional reconhece que uma mudança na condição ou desempenho do item pode preceder uma falha, então a tarefa de manutenção é baseada na condição atual do componente.

Quando se acredita que uma falha será iminente, uma ação preventiva é tomada. Através do monitoramento de alguns parâmetros de condição é possível identificar o instante de tempo ideal para se executar a manutenção preventiva. Por serem planejadas em um plano de manutenção, as manutenções preventiva e condicional, podem ter seu tempo de execução conhecido (KUMAR, 1996).

Segundo Kinnison e Siddiqui (2004), programas detalhados de manutenção são criados no desenvolvimento de cada nova aeronave ou de modelos derivativos do modelo existente. Este programa inicial de manutenção pode ser adaptado por cada operador visando compatibilizá-lo com a natureza de sua operação individual. Isso garante a aeronavegabilidade contínua em qualquer circunstância. Os programas de manutenção utilizados atualmente na aviação comercial foram desenvolvidos pela indústria através da combinação das atitudes com as ações de manutenção e as condições nas quais essas ações são determinadas e atribuídas aos componentes dos sistemas.

4.2 Confiabilidade e Manutenção

Bergamo Filho (1997) define confiabilidade como “a probabilidade de um produto executar, sem falhar, uma certa missão, sob certas condições, durante um determinado período de tempo”. Para Elsayed (2012), confiabilidade é “a probabilidade de um produto operar por um período específico de tempo sob as condições de operação ao qual foi projetado sem falhas”.

Analisando a convergência das definições de confiabilidade percebe-se que esta é expressa na probabilidade em função do tempo, podendo então ser quantificada. Existe também o foco no desempenho da função, uma vez que para se considerar confiável espera-se que o componente ou sistema apresente as mesmas características e eficiência ao longo de sua vida.

Além disto, o tempo de operação torna-se um fator de competitividade, uma vez que as exigentes companhias aéreas analisam os prazos de garantia e os consideram elemento decisivo na tomada de decisão. As condições de operação também devem ser perfeitamente

conhecidas e observadas pelos operadores do sistema, conforme exemplifica Vaccaro (1997), um aparelho de televisão exposto à chuva não serve como parâmetro para se afirmar que sua confiabilidade é baixa.

Desses fatores derivam diversos outros conceitos como MTBF⁴ (*mean time between failure*), MTTF⁵ (*mean time to failure*) e taxa de falha, que para este estudo foram revisados, porém não apresentados. Estes conceitos são bastante explorados por Elsayed (2012) e Bergamo (1997).

Devido ao risco relacionado com o alto número de fatalidades possível derivado a um acidente, em aeronaves, a confiabilidade deve ser elevada. Entretanto, para se manter as funcionalidades de um dispositivo, ou restaurar suas propriedades, tenha este falhado ou não é necessário utilizar-se de certas atividades. Estas atividades são as ações de manutenção que incluem revisão, reparo, remoção, substituição, modificação, inspeção, calibração, verificação, dentre outras.

Como a confiabilidade representa o bom funcionamento do produto em função do seu tempo de uso e dos fatores que influenciam seu desempenho, esta métrica é uma ferramenta poderosa na preparação das estratégias de manutenção, pois assim as atividades de manutenção podem ser adequadas, ao longo do tempo, conforme as variações no desempenho do componente, devido a fatores como por exemplo fadiga e corrosão. Conforme Moraes (2004), com a evolução tecnológica, a manutenção passou a ser sinônimo de qualidade, confiabilidade e disponibilidade de diversos setores, principalmente a aviação.

4.3 Programa de Manutenção

O programa de manutenção tem como função descrever detalhadamente quais serão os intervalos e tarefas de manutenção a serem seguidos no intuito de manter a aeronave aeronavegável. O programa de manutenção aparece como uma ferramenta para diminuir o custo operacional da aeronave. Neste plano, são detalhadas todas as tarefas de inspeção, substituição ou serviços executados na aeronave. Também deve ser fornecido procedimentos para o registro e arquivo dos serviços executados, inclusive das discrepâncias encontradas.

Para tornar a manutenção mais eficiente os fabricantes utilizam procedimentos estatísticos para assegurar a aeronavegabilidade da aeronave mesmo alterando-se os intervalos de inspeção ou realizando tarefas de manutenção em apenas parte da frota. Além disso, o programa de manutenção pode ser revisado ao longo dos anos com dados substanciais,

⁴ Tempo médio entre falha (tradução livre)

⁵ Tempo médio até falha (tradução livre)

obtidos durante um certo período de operação da aeronave, podendo resultar na alteração dos requisitos da manutenção executada pela operadora, de maneira a melhorar a eficiência operacional da mesma. Para aeronaves de grande porte, é recomendado um acumulado na ordem de dezenas de milhares de horas voadas, especialmente para as inspeções estruturais e/ou de intervalos mais longos.

Todo programa de manutenção é submetido à análise e aprovação da Autoridade Aeronáutica. Qualquer tipo de alteração no programa de manutenção só pode ser implantado após aprovação por parte do órgão. A aprovação tem como base se certificar de que os intervalos definidos no programa de manutenção são adequados tanto para reduzir a probabilidade do desenvolvimento de uma falha crítica, quanto para garantir que o aparecimento de tal falha é um evento expressivamente remoto. Para assegurar que estes intervalos projetados são representativos em relação à realidade da operação da aeronave, deve-se apresentar dados em volume suficiente ao definir ou contestar um intervalo de manutenção. Os dados ideais para os cálculos de tais intervalos são os registros de falhas encontradas durante os serviços de manutenção, seguidos das ações corretivas para as falhas encontradas durante a operação e os registros da tripulação. Estes dados são a base da requisição de modificações no programa de manutenção. Estudos indicam que operadores com larga experiência na operação de aeronaves de grande porte já conseguiram estender seus intervalos de inspeção em até três vezes o intervalo inicial recomendado pelo fabricante (PECCI, 2014).

4.3.1 Manutenibilidade

Para manter os custos dos planos de manutenção dentro dos patamares desejados, as fabricantes possuem requisitos contratuais para seus fornecedores. Durante a definição do programa de manutenção são levados em consideração a manutenibilidade da aeronave e os custos envolvidos com cada tarefa. A manutenibilidade representa a probabilidade de uma tarefa de manutenção ser completada em determinado período. Para tanto é necessário saber quando e com qual frequência as tarefas serão executadas, como estas serão executadas, quantos mecânicos serão necessários e quais qualificações estes devem possuir, quanto custará a restauração e quais equipamentos e instalações serão requeridas. Na aviação, estes parâmetros também são regulamentados pelas autoridades (WIKSTÉN; JOHANSSON, 2006).

Uma vez que o tempo consumido nas tarefas é variável, pode-se utilizar uma função de distribuição acumulada (do inglês, *cdf*) do tempo decorrido para encontrar a porcentagem

de tarefas que poderão ser cumpridas dentro um período específico de tempo. Conforme Pecci (2014), a partir deste valor e com experiência na operação de aeronaves similares é possível calcular até quantas horas/homem de manutenção corretiva serão necessárias para cada homem/hora de manutenção preventiva aplicada na aeronave. Na aviação, é boa prática criar sistemas redundantes, às vezes duplos ou triplos, permitindo alguns componentes falharem durante o voo. Isto geralmente é aplicado aos componentes eletrônicos, que possuem um tempo de vida imprevisível, ou aos componentes que podem impactar na segurança do voo. Entretanto, redundâncias implicam no aumento do custo do sistema, uma vez que manutenções corretivas podem ser onerosas se as falhas causarem danos a outros componentes, além de causar a indisposição do sistema.

É de igual importância determinar o número de mecânicos e inspetores adequados para aplicação do programa de manutenção. Como regra geral neste quesito cabe o equilíbrio, é sabido que o aumento do efetivo trabalhando no processo de manutenção tende a diminuir o tempo necessário para retornar uma aeronave ao pleno funcionamento, porém o custo gerado pelo maior número de funcionários parados enquanto a aeronave opera também será maior. Cabe ao operador determinar qual a melhor opção para sua frota, tendo em vista que quanto maior o nível de manutenção executado pelo operador, mais baixos serão os custos da empresa, se o número de aeronaves for grande o bastante.

Portanto, a mantabilidade tem como objetivo balancear a manutenção. A partir destas informações, a previsão de custos enviada para o planejamento estratégico é mais realista, que conseqüentemente contribui com uma administração mais adequada que garante a operação segura e confiável da frota durante anos.

4.3.2 Custos de Manutenção

Segundo Wikstén e Johansson (2006) o custo esperado nas tarefas corretivas corresponde ao custo total dos recursos necessários para o reparo ou substituição dos itens falhados. Enquanto o custo esperado na manutenção preventiva é o total dos recursos necessários para inspecionar e/ou examinar um item antes que a falha aconteça, além da substituição de qualquer item falhado. A soma destes custos representa o custo total da manutenção durante a vida do sistema. Os custos de manutenção podem ser divididos em duas categorias:

- **Custo Direto de Manutenção:** consiste no custo do sobressalente, material, equipe, ferramental e suporte, equipamento, instalações e dados técnicos;

- **Custo Indireto de Manutenção:** consiste no custo do pessoal de gestão e administração necessário para a conclusão bem-sucedida da tarefa, como também todos os custos relacionados a completa ou parcial perda da disponibilidade (lucro cessante). Inclui também custos fixos como aquecimento, seguro, taxas, instalações, eletricidade, telefone e TI. Este tipo de custo é extremamente difícil de ser dimensionado especificamente para cada operador.

A opção mais simples para diminuir o custo direto de manutenção de uma aeronave ou uma frota é aumentar os intervalos entre inspeções. Mas para tanto é necessário uma sólida base de dados e aprovação da Autoridade Aeronáutica. Uma alternativa é então dividir em intervalos menores as inspeções de frequência mais longa, diluindo os custos da inspeção e correção das falhas em um tempo maior, além de permitir a detecção mais rápida de falhas que possam colocar a segurança de voo em risco. Entretanto, se a base de dados não for significativa ou estiver impactada por algum erro de cálculo, as paradas frequentes podem diminuir as métricas de pontualidade e confiabilidade de despacho (despachabilidade) devido a atrasos no retorno da aeronave à operação. Neste ponto a confiabilidade de componentes focada nos componentes cujos custos de manutenção são muito elevados se torna essencial.

4.3.3 Disponibilidade x Despachabilidade

Conforme a NBR 5462, Confiabilidade e Manutenibilidade, “*disponibilidade é a capacidade de um item estar em condições de executar uma certa função em um dado instante ou durante um intervalo de tempo determinado, levando-se em conta os aspectos combinados de sua confiabilidade, manutenibilidade e suporte de manutenção, supondo que os recursos externos requeridos estejam assegurados. O termo disponibilidade é usado como medida do desempenho de disponibilidade*”.

Segundo a ATA Spec2000, despachabilidade (do inglês *Dispatch Reliability*) é a figura de desempenho operacional de uma aeronave dada pela porcentagem de voos programados sem a ocorrência de uma interrupção primária operacional maior do que 15 minutos ou cancelamento primário do voo. Neste caso, primário se refere ao primeiro voo atrasado ou cancelado, uma vez que os atrasos ou cancelamentos consequentes a um voo partido em atraso ou cancelado não são contabilizados neste momento.

$$\text{Confiabilidade de Despacho} = \left(1 - \frac{\sum \text{interrupções primárias} + \sum \text{cancelamentos primários}}{\sum \text{voos agendados} + \sum \text{cancelamentos primários}} \right) \times 100$$

Figura 6 – Confiabilidade de Despacho

Fonte: ATA Spec2000

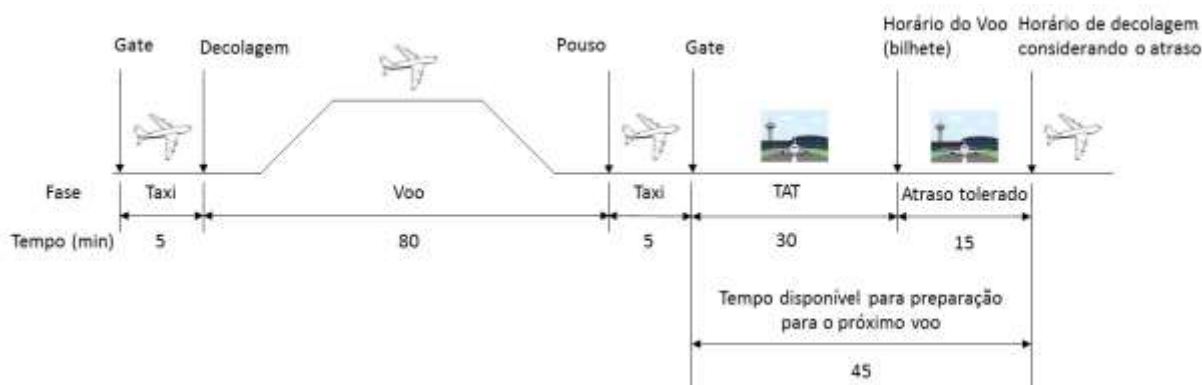


Figura 7 – Distribuição de tempo para a missão típica de uma aeronave comercial regional

Fonte: adaptado de CARDOSO, 2010

A despachabilidade da aeronave é considerada um requisito mandatório para todos os operadores. A ocorrência de manutenções não agendadas pode introduzir custos com atrasos e cancelamentos se o problema não puder ser resolvido dentro do tempo disponível. A despachabilidade é a possibilidade da aeronave atingir os requisitos operacionais em termos de confiabilidade operacional (a porcentagem de voo agendados, que partem ou chegam com atraso sem refletir uma interrupção operacional ou técnica), risco operacional (o risco de causar custos adicionais através de eventos de manutenção não programados) e custos (manutenção e operacional).

Portanto, para assegurar uma alta despachabilidade, a disponibilidade dos sistemas é essencial. Devido à complexidade dos sistemas e ao elevado número de redundâncias envolvidos na aeronave, a aviação lança mão de um artifício para manter os níveis de despachabilidade durante determinadas indisponibilidades, chamado *Master Minimum Equipment List*⁶ (MMEL). Segundo a FAA, a MMEL é uma lista chave dos itens da aeronave que podem estar inoperativos dada certas condições operacionais, enquanto mantém a aeronavegabilidade e fornece o nível mínimo de segurança para a operação. Todas MMELs são desenvolvidas e revisadas pelo *Flight Operations Evaluation Boards*⁷ (FOEB), em concordância com a sede da FAA, e aprovado pelo Gerente do *Aircraft Evaluation Group*⁸ (AEG). A MMEL é utilizada pelos operadores como base para sua MEL (*Minimum Equipment List*).

⁶ Lista Principal de Equipamento Mínimo (tradução livre)

⁷ Conselho de Avaliação de Operações em Voo (tradução livre)

⁸ Grupo de Avaliação de Aeronaves (tradução livre)

4.3.3.1 Lista Mínima de Equipamento (MEL)

A lista mínima de equipamento do operador deve incluir um conteúdo específico baseado nos itens instalados nos aviões do operador a partir dos dados fornecidos na MMEL:

- 1) Identificação de acordo com a ATA do sistema, subsistema e item;
- 2) Nível de Reparo: todo item incluído na MEL (exceto *NEF*⁹) possui sua categoria de reparo identificado por A, B, C ou D:
 - a. Itens com categoria de reparo A: frequentemente afetam a capacidade operacional da aeronave ou a habilidade do operador cumprir algum regulamento operacional. Não podem ter seu intervalo de reparo estendido e devem ser reparados de acordo com o intervalo especificado na coluna de observações.
 - b. Itens com categoria de reparo B: devem ser reparados em até 3 dias consecutivos (72 horas), excluindo o dia que a falha foi registrada no livro de bordo da manutenção da aeronave. O operador pode pedir autorização para extensão do tempo de reparo apenas uma vez;
 - c. Itens com categoria de reparo C: devem ser reparados em até 10 dias consecutivos (240 horas), excluindo o dia que a falha foi registrada no livro de bordo da manutenção da aeronave. O operador pode pedir autorização para extensão do tempo de reparo apenas uma vez;
 - d. Itens com categoria de reparo D: devem ser reparados em até 120 dias consecutivos (2880 horas), excluindo o dia que a falha foi registrada no livro de bordo da manutenção da aeronave. Não podem ter seu intervalo de reparo estendido.
- 3) Número de itens instalados: quantidade específica do item instalado na aeronave. Geralmente representa a configuração do avião utilizado no preparo da MMEL;
- 4) Número requerido para permitir o despacho: reflete o número mínimo de itens necessários, conforme as condições na coluna de observações;
- 5) Observações: comentários e observações em geral. Também inclui as indicações de manutenção (M) e operações (O).
- 6) Procedimentos (M) e (O): (M) indica que um procedimento específico de manutenção deve ser realizado quando aquele item estiver inoperativo. Estes

⁹ *Nonessential Equipment and Furnishings* (Equipamentos não essenciais e acabamentos)

procedimentos devem ser feitos por pessoal devidamente qualificado. Dependendo da complexidade, o operador pode autorizar o membro da tripulação de voo a executar a tarefa. (O) indica que um procedimento específico de operação deve ser realizado quando aquele item estiver inoperativo. Estes procedimentos podem ser executados pela própria tripulação de voo.

7) Ressalvas e notas (se aplicável).

SYSTEM & SEQUENCE NUMBERS		ITEM	1.	REPAIR CATEGORY	
				2.	3.
26 FIRE PROTECTION					
-43-01	APU Fire Extinguisher Discharge Discs	C	2	0	(M) Discs may be missing provided bottle integrity is verified by weighing the bottle once each flight day (Ref. AMM 26-22-11).

Figura 8 – Exemplo MEL

Fonte: FAA MEL *Requirements for 14 CFR* (2015)

Com base na MEL, é prática da indústria aeronáutica classificar os itens em suas listas de sobressalentes como: GO (liberado), NO GO (não liberado), ou GO IF (liberado se) para criticidade e provisionamento de estoque:

- Itens GO: NEF;
- Itens NO GO: itens não incluídos na MEL e que impactam na aeronavegabilidade, operação e/ou segurança do voo. Neste caso o avião não é liberado para assumir voo até que a falha seja propriamente solucionada;
- Itens GO IF: itens incluídos na MEL e que a partir da aplicação do procedimento determinando na MEL a aeronave é liberada para assumir voo.

4.4 Dados Para Análise de Confiabilidade e Manutenção

Com a evolução da capacidade de processamento computacional, enormes quantidades de dados estão sendo coletados, entretanto, uma quantidade muito pequena destes dados é realmente analisada adequadamente ou colocada de forma que possa auxiliar a

tomada de decisão. Muitos tipos de dados são relevantes para a estimativa e predição da confiabilidade e manutenibilidade, porém frequentemente não são registrados da forma correta, o que se torna um problema para a análise de confiabilidade. (RELIASOFT, 2011).

Os dados de confiabilidade, dentre os mais utilizados e conhecidos, incluem dados de testes de aceitação, ciclagem, amostras de uma população observada em campo (dados obtidos durante a utilização do produto para os propósitos aos quais foi projetado), ou ainda das equipes de manutenção corretiva e/ou preventiva. Blischke e Murthy (2000) dividem as possíveis fontes de dados de confiabilidade e manutenção nas seguintes categorias:

Categoria	Tipo de dado
Histórico	Testes ou outros dados de um produto, parte, ou componente similar existente ao analisado
Fornecedores	Testes ou outros dados de partes ou componentes terceirizados
Guias/Manuais	Características de materiais e produtos obtidos a partir de manuais e normas de engenharia ou banco de dados de confiabilidade
Subjetivos	Informação baseada no julgamento do engenheiro ou especialista, avaliações subjetivas, e outras fontes não experimentais
Amostragem	Dados obtidos de amostras de populações bem definidas
Teste	Desempenho das partes ou componentes submetidos a experimentos delineados
Observacional	Dados obtidos a partir de estudos (chamados de estudos observacionais) que não envolvem experimentos adequadamente aleatorizados ou sem aleatoriedade dos dados
Produção	Dados ambientais, taxas de produção e outros
Qualidade	Número de defeituosos, outras variáveis de cheque de qualidade, e causas das falhas
Operacional	Dados de campo sobre o desempenho obtido de clientes ou testes
Ambiental	Dados das características ambientais que podem afetar o desempenho; estes dados são coletados durante a produção, operação ou teste
Garantia	Tipos, taxas, e causas das falhas dos itens sob garantia, geralmente obtidos dos distribuidores ou centros de serviços
Custo	Custos de material e mão de obra de cada aspecto do projeto, produção, distribuição, operação, e custos diretos e indiretos associados ao produto

Tabela 1 – Definições dos tipos de dados de confiabilidade

Fonte: adaptado de Blischke e Murthy (2000)

A variáveis chaves observadas dos dados relacionados acima consistem na informação do tempo de operação de um equipamento associado a falhas, discrepâncias, problemas de operação e suas causas. O detalhamento da falha deve incluir condições operacionais, sintomas da não conformidade, causas do problema, consertos realizados, componentes trocados, tempo de reparo, comentários dos usuários e das equipes de reparo, além de uma identificação única do item falhado (VACCARO, 1997).

O mínimo de informação necessária que deve ser registrada para a obtenção de dados de confiabilidade para posterior análise é:

- Tipo, modelo, série e/ou número de modificação do produto;
- Número de série;
- Número da parte;
- Data da falha (ou intervalo até a falha);
- Tempo ou número de ciclos de uso (até a falha);
- Como a falha foi identificada;
- Condições operacionais;
- Descrição do problema;
- Disposição do item falhado.

4.4.1 Utilização dos dados de confiabilidade

Os dados de confiabilidade são utilizados não somente para a avaliação do desempenho de um produto, equipamento ou componente, como também para identificar quais áreas requerem maiores esforços e ações corretivas. Relatórios de campo fornecem informações que afetam significativamente a qualidade futura dos produtos manufaturados, especialmente em reação a qualidade dos componentes utilizados.

Esses dados são essenciais para programas de diminuição de custos e melhoria focados na confiabilidade. Estes dados podem ser usados para medir o progresso de um novo projeto, um meio de identificação de tendências desfavoráveis e desencadeamento de ações corretivas, e ainda servir como manutenção de um sistema de informações que armazena os problemas de projeto existentes e ajuda continuamente na sua eliminação (FRACAS¹⁰).

As operações possíveis com os dados de confiabilidade serão descritas no Capítulo 3 e juntamente a estes, são ainda utilizadas outras ferramentas estatísticas mais simples, como:

¹⁰ *Failure Reporting, Analysis, and Corrective Action System* (Sistema de Registro de Falhas, Análises, e Ações Corretivas – Tradução livre)

- Gráficos de Pareto (separando as causas principais de problemas de causas secundarias);

- Histogramas (visualização de variabilidade);
- Gráficos de dispersão (análises de correlação e regressão);
- Cartas de controle (visualização de tendências).

Conforme Vaccaro (1997) destacam-se os principais resultados a serem reportados com esses dados:

- Causas dominantes de falha, preferencialmente classificadas por severidade, através de gráficos de Pareto;

- Gráficos de confiabilidade considerando o tempo de produção e o tempo de uso;
- Comparações de estimativas de confiabilidade preditas com os valores obtidos durante a operação em campo.

5.1 Fundamentos da Análise de Confiabilidade

5.1.1 Confiabilidade e Qualidade

Os fabricantes estão interessados na confiabilidade do produto por esta se relacionar diretamente com os custos de garantia. Como apresentado na seção 4.2, a definição de confiabilidade é a probabilidade de um produto satisfazer a função pretendida durante seu ciclo de vida operando nas condições para as quais foi projetado. (RYAN, 2007).

A qualidade por sua vez está associada não somente às características incorporadas no projeto do produto para atender as necessidades dos usuários, desde aspectos estéticos ao desempenho, como também com a redução da variabilidade do desempenho. Conforme Flogiatto e Ribeiro (2011) as classificações para as fontes da variabilidade são:

- i. Variabilidade nos processos de manufatura: principal responsável pela ocorrência de falhas prematuras, as quais costumam surgir no início da vida operacional do produto. Pode ser atenuada com práticas de controle da qualidade de processos.
- ii. Variabilidade no ambiente de operação: geram a ocorrência de falhas aleatórias nos itens. Um projeto robusto e bem definido diminui os efeitos dessa variabilidade;
- iii. Deterioração do produto: Relacionado com as falhas por desgaste e deterioração dos itens. Práticas de manutenção preventiva podem retardar o seu aparecimento ou diminuir sua intensidade.

A confiabilidade do produto pode ser melhorada através da aplicação de ações de melhoria da qualidade que reduzam essas fontes de variabilidade, uma vez que as falhas no produto podem ter sua origem em uma ou mais destas fontes. Associando as falhas aos estágios do ciclo de desenvolvimento de produtos e integrando estes estágios, os resultados da melhoria da qualidade apresentarão um impacto maior sobre a confiabilidade do produto, como segue:

- i. Projeto do produto: projeto conceitual no qual as necessidades dos usuários são convertidas em especificações de desempenho e detalhamento do projeto, definindo a configuração de componentes e partes e identificando parâmetros e tolerâncias;
- ii. Projeto do processo: detalhamentos de processo de manufatura e especificações de operação;

iii. Manufatura: início da manufatura e monitoramento da produção.

5.1.2 Funções de Confiabilidade

Com o estudo de confiabilidade de um componente, e posteriormente do sistema onde este está inserido, garante-se um desempenho livre de custos, de forma que os custos com garantia sejam reduzidos, não ocorram falhas prematuras, e o cenário financeiro da organização seja melhorado.

Os dados de confiabilidade são medições de tempo T da duração de vida ou duração até falha de um componente ou sistema. Estes dados são variáveis aleatórias que podem assumir uma distribuição de probabilidade a ser estimada e que estará associada à Função de Confiabilidade do componente. Estas distribuições de probabilidade são mandatórias para permitir que afirmações de probabilidade sejam adequadas e precisas, como se espera em uma análise de confiabilidade.

Conforme Ryan (2007) um dos objetivos do estudo de confiabilidade é estimar a porcentagem de unidades de um produto que ainda estarão funcionando após um determinado período de tempo. Componentes idênticos sujeitos a esforços idênticos não retornam tempos de falha iguais e previsíveis, portanto, o tempo T não pode seguir diretamente um modelo determinístico. Alguns componentes falharão no início de sua vida, enquanto outros demorarão mais para falhar, definindo-se um comportamento aleatório para as falhas de tal tipo de componente. Segundo Vaccaro (1997), define-se então a confiabilidade de um componente (ou sistema) no instante de tempo t , denotada por $R(t)$ do inglês *Reliability*, é definida como $R(t) = P(T > t)$, onde T é a variável aleatória que modela a duração da vida do componente .

Desta forma, para se determinar o comportamento da confiabilidade de um produto dois pontos precisam ser determinados e analisados: a distribuição de vida dos dados do componente estudado e suas chamadas Funções de Confiabilidade (Função Confiabilidade, Distribuição Acumulada de Falha, Densidade de Probabilidades de Falha e Taxa de Risco ou Taxa de Falha).

5.1.2.1 Função Confiabilidade $R(t)$

A função confiabilidade (1) é determinada por:

$$R(t) = 1 - F(t) \quad (1)$$

sendo a probabilidade de uma unidade ainda estar funcionando de acordo com os requisitos de projeto no tempo t (RYAN, 2007).

5.1.2.2 Distribuição Acumulada de Falha $F(t)$

Por convenção, o início de operação do sistema é definido como $t = 0$. O tempo até falha é interpretado como uma variável aleatória. O estado do componente em um tempo t pode ser descrito por uma variável aleatória de estado $X(t)$, definida como:

$$X(t) = \begin{cases} 1, & \text{se o componente estiver operando em } t \\ 0, & \text{se o componente estiver em estado de falha em } t \end{cases}$$

A relação entre a variável de estado $X(t)$ e o tempo até falha pode ser representada como:

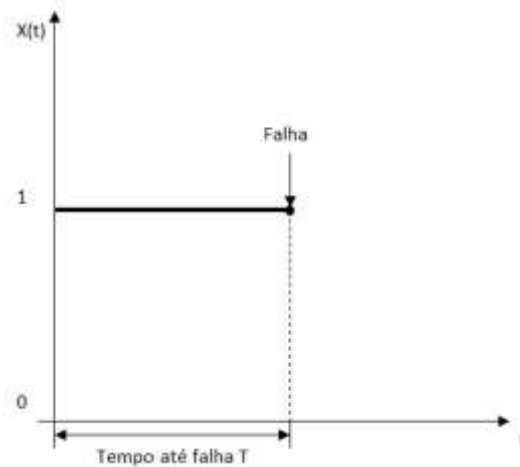


Figura 9 – Variável de estado e tempo até falha

Fonte: adaptado de Fogliato e Ribeiro (2011)

O tempo até falha nem sempre é medido como tempo de calendário, podendo assumir valores discretos, como números de ciclos até falha. Para o propósito deste trabalho, assume-se que a variável T é distribuída continuamente, com densidade de probabilidade dada por $f(t)$ e função de distribuição acumulada (2) (do inglês *cumulative distribution function* – cdf) dada por:

$$F(t) = P(T \leq t) = \int_0^t f(u)du, \text{ para } t > 0 \quad (2)$$

A função $F(t)$ denota assim a probabilidade de falha do componente no intervalo de tempo $[0, t]$.

5.1.2.3 Densidade de Probabilidade de Falha $f(t)$

A função densidade de probabilidade de falha (3) (do inglês *probability density function* – pdf) é definida como:

$$f(t) = \frac{d}{dt}F(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{F(t + \Delta t) - F(t)}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P(t < T \leq t + \Delta t)}{\Delta t} \quad (3)$$

5.1.2.4 Função Taxa de Risco ou Taxa de Falha $h(t)$

A função de risco $h(t)$ (do inglês *hazard rate*) é uma das mais populares na análise de confiabilidade. Esta função representa a “quantidade” de risco associada a um componente no tempo t . A função de risco é abrangentemente utilizada na análise do risco que um componente está exposto ao longo do tempo, servindo como base para comparação entre unidades com características distintas (Fogliatto e Ribeiro, 2011).

A função de risco (4) pode ser derivada usando probabilidade condicional. Considerando, a probabilidade de falha entre t e $t + \Delta t$, dada por:

$$P(t \leq T \leq t + \Delta t) = \int_t^{t+\Delta t} f(u)du = R(t) - R(t + \Delta t) \quad (4)$$

Considerando que no tempo t o componente estará operacional:

$$P(t \leq T \leq t + \Delta t | T \geq t) = \frac{P(t \leq T \leq t + \Delta t)}{P(T \geq t)} = \frac{R(t) - R(t + \Delta t)}{R(t)} \quad (5)$$

Uma taxa média no intervalo $(t, t + \Delta t)$ pode ser obtida dividindo a Equação (5) por Δt . Tendendo $\Delta t \rightarrow 0$, obtém-se a taxa de falha instantânea, que é a função de risco (6):

$$h(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{R(t) - R(t + \Delta t)}{R(t)\Delta t} = \frac{-R'(t)}{R(t)} = \frac{f(t)}{R(t)}, t \geq 0 \quad (6)$$

Todas as funções de risco devem satisfazer as seguintes condições:

- i. $\int_0^{+\infty} h(t)d(t) = +\infty$
- ii. $h(t) \geq 0$, para todo $t \geq 0$

5.1.3 Função confiabilidade e o tempo médio até falha (MTTF)

Uma das estatísticas de confiabilidade mais utilizadas é o Tempo Médio até Falha (MTTF¹¹) relacionado a sistemas e/ou componentes não reparáveis ou o Tempo Médio Entre Falhas (MTBF¹²) nos casos de sistemas e/ou componentes reparáveis. Esse tempo é o valor médio dos tempos até a falha das unidades em serviço (ou em teste).

Conceitualmente, dada uma variável aleatória contínua T , associada aos tempos de falha das unidades em serviço, o MTTF (7) é dado pela Esperança Matemática de T :

$$MTTF = \int_0^{+\infty} tf(t)dt \quad (7)$$

Aplicando a equação (3) em (1) chega-se à conclusão que:

$$\frac{d}{dt}R(t) = -\frac{d}{dt}F(t) = -f(t) \quad (8)$$

Portanto, utilizando a expressão (8) em (7), obtém-se:

$$MTTF = -\int_0^{+\infty} t \frac{d}{dt}R(t)dt = -\int_0^{+\infty} t dR(t) = \int_0^{+\infty} R(t)dt \quad (9)$$

que relaciona o MTTF (9) de um sistema ou componente com sua confiabilidade.

5.1.4 Função de risco e as fases de vida de um produto

A taxa de falha ou taxa de risco é dada em termos de falhas por unidade de tempo. A forma da função de risco indica como é o comportamento de envelhecimento do componente, conhecida como “a curva da banheira”. Esta curva representa as fases da vida característica de um sistema: mortalidade infantil, maturidade e desgaste e estão associadas ao parâmetro de forma β de uma eventual distribuição de Weibull que descreva a confiabilidade do item, como será apresentado na seção 5.1.5.4. A análise das fases auxilia e orienta a manutenção nas ações a serem tomadas nos diferentes períodos em função do seu comportamento (REIS; ANDRADE, 2009).

¹¹ do inglês *Mean Time to Failure*

¹² do inglês *Mean Time Between Failure*

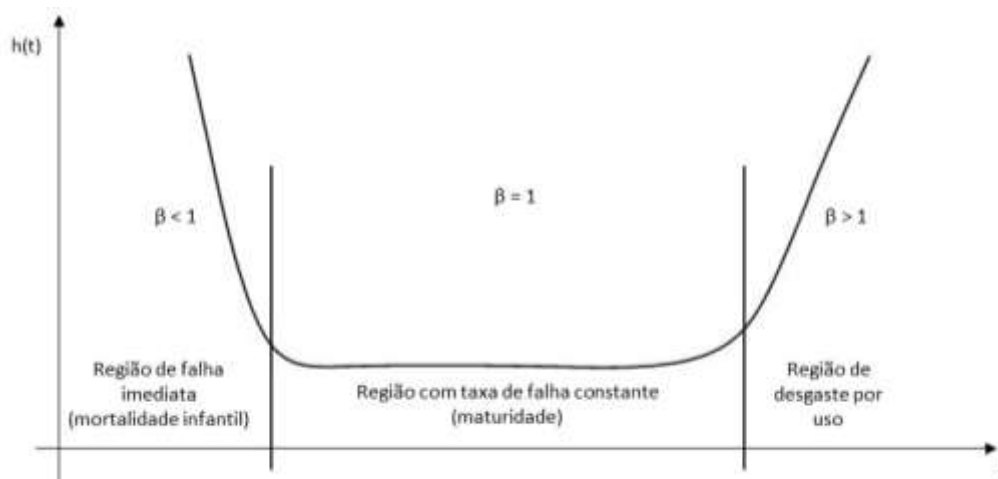


Figura 10 – Curva da Banheira

Fonte: adaptado de Reis e Andrade (2009)

Segundo Wuttke e Sellitto (2008) as características de ocorrência vinculadas com cada fase são:

- **Mortalidade infantil:** falhas neste período são consideradas prematuras. Geralmente são causadas devido a erros de projeto, componentes ou operação inadequada, defeitos de fabricação ou instalação. Conforme os componentes defeituosos são substituídos e os erros de projeto ou instalação são corrigidos, estas falhas prematuras tendem a diminuir. A ação mais indicada nesta região é a manutenção corretiva, que atuará no reparo e na correção para que a falha não se repita.

- **Maturidade:** nesta região a taxa de falha se torna menor e constante. As falhas ocorrem por razões aleatórias normais oriunda de fontes externas e imprevisíveis como acidentes, mau uso ou operação inadequada (falhas induzidas). Devido a aleatoriedade das falhas neste período, exceto em alguns casos mais complexos, a ação recomendada em termos de manutenção é uma tarefa preditiva e/ou preventiva, acompanhando sistematicamente todas as variáveis que indicam o desempenho do componente para se planejar uma intervenção;

- **Desgaste:** demonstra o aumento na taxa de falhas devido ao envelhecimento e deterioração das peças a medida que elas se aproximam do fim da sua vida útil. Nesta fase é comum o aparecimento de trincas, fadigas, corrosão, deterioração elétrica/mecânica ou química, como também pode decorrer de manutenção insuficiente. A decisão mais viável quanto ao descarte ou reparo do componente é determinada em termos da vida econômica o componente versus sua vida útil. A manutenção preventiva nesta região é a mais aconselhada, uma vez que a falha é certa de acontecer, à manutenção caberá substituir ou reparar o item nesta intervenção programada.

Com o desenvolvimento de novos métodos estatísticos, surgiram modelos de probabilidade que graficamente correspondem à curva da banheira e podem melhor representar o comportamento do componente estudado. Quatro modelos de probabilidade se destaquem devido à comprovada adequação para descrever o comportamento até a falha de componentes ou sistemas em várias situações práticas, são estas: Exponencial, Gama, Log-normal e Weibull. As representações apresentadas para as distribuições são as mais comumente usadas em estudos de Confiabilidade: *pdf* $f(t)$, *cdf* $F(t)$, confiabilidade $R(t)$, taxa de falha $h(t)$ e MTTF.

5.1.5 Modelos de Confiabilidade

5.1.5.1 Distribuição Exponencial

A distribuição exponencial já foi a mais utilizada nas aplicações de confiabilidade. É a única distribuição que possui taxa de falha constante e não depende do tempo t (RYAN, 2009). As funções de confiabilidade para a distribuição exponencial se definem como:

- Função de Confiabilidade (10):

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (10)$$

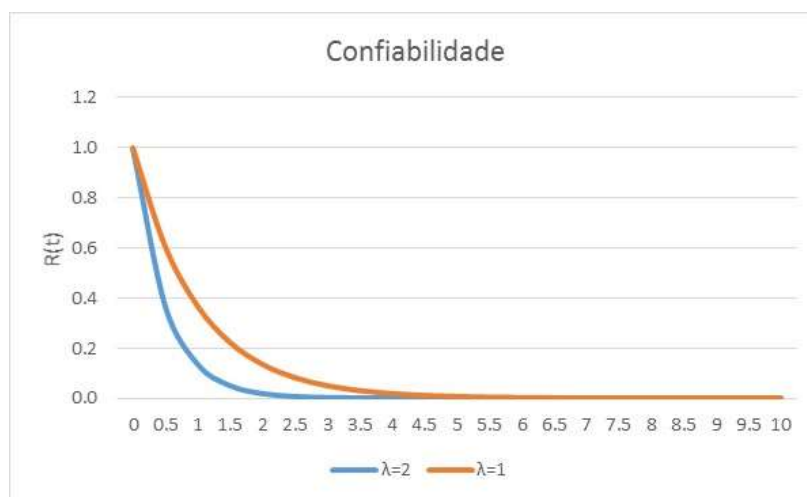


Figura 11 – Representações da Função de Confiabilidade da distribuição Exponencial

Fonte: adaptado de Fogliatto e Ribeiro (2011)

- Função acumulada de falha (11):

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda t} \quad (11)$$

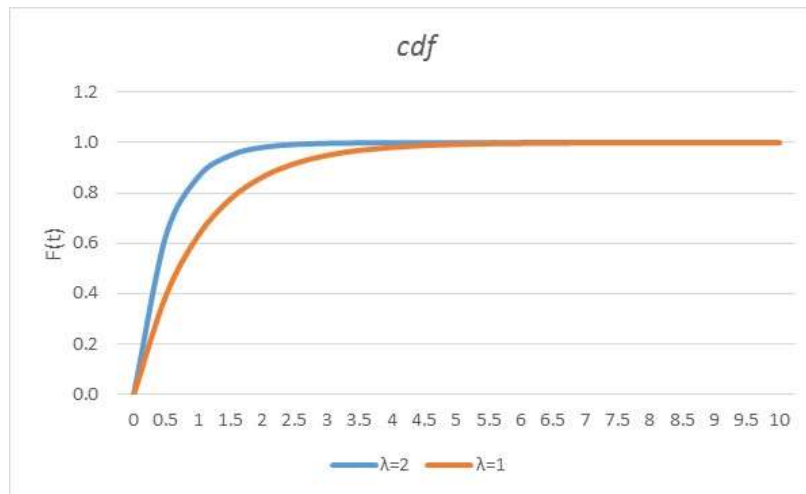


Figura 12 – Representação da Função *cdf* da distribuição Exponencial

Fonte: adaptado de Fogliatto e Ribeiro (2011)

- Função densidade de probabilidade de falha (12):

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t} \quad (12)$$

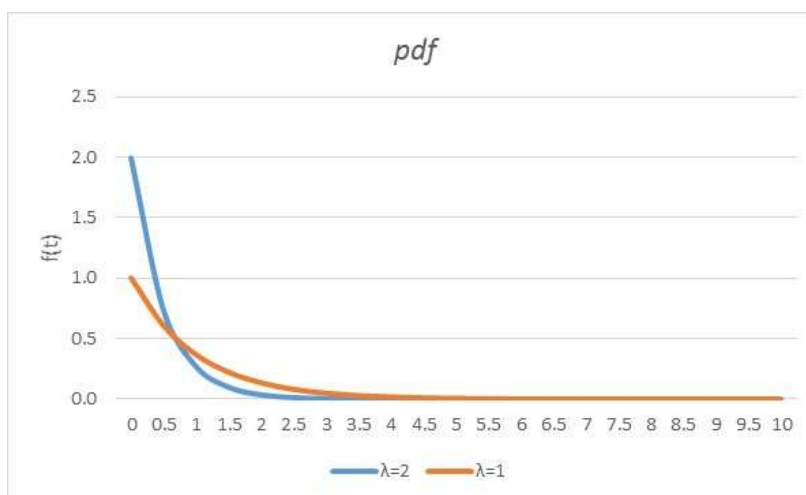


Figura 13 – Representação da função *pdf* da distribuição Exponencial

Fonte: adaptado de Fogliatto e Ribeiro (2011)

- Taxa de Falha (13):

$$h(t) = \lambda \quad (13)$$

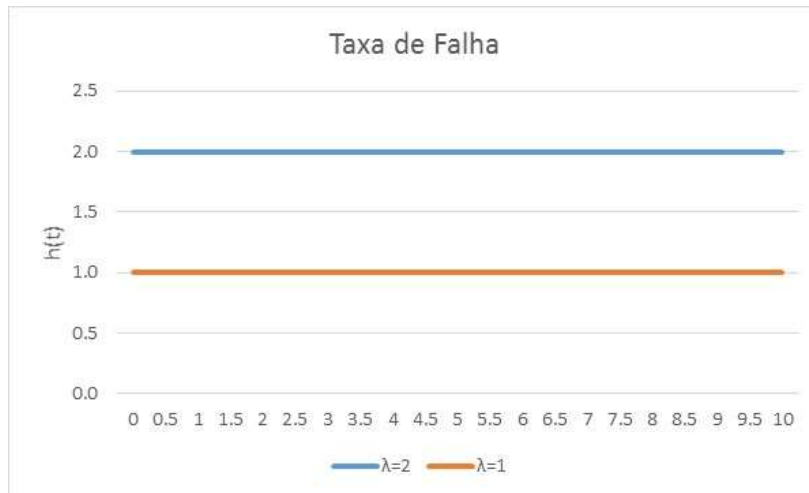


Figura 14 – Representação da Taxa de Falha da distribuição Exponencial

Fonte: adaptado de Fogliatto e Ribeiro (2011)

- Tempo Médio até Falha (14):

$$MTTF = \frac{1}{\lambda} \quad (14)$$

Conforme ilustrado na Figura 10, a distribuição exponencial representa a região central da curva da banheira, correspondente a vida útil do produto. A taxa de falha usualmente é maior quando o produto é utilizado pela primeira vez (já que este pode estar defeituoso); então a taxa de falha se nivela e segue a mesma durante um longo período de tempo. Finalmente, a taxa volta a aumentar conforme o item se aproxima do fim de sua vida.

A função exponencial é frequentemente utilizada para modelar componentes eletrônicos como circuito integrados com diodos, resistores e capacitores, que geralmente não sofrem desgaste até extrapolar consideravelmente a vida esperada do produto no qual estão instalados. Entretanto, a distribuição exponencial não deve ser usada para modelar componentes mecânicos ou elétricos esperados que mostrem fadiga, corrosão ou desgaste antes do fim da expectativa da vida útil do produto como rolamentos ou certos filamentos.

5.1.5.2 Distribuição Gama

A variável aleatória contínua T tem distribuição gama quando sua função densidade de probabilidade de falha (15) é dada por:

$$f(t) = \frac{\beta^\alpha}{\Gamma(\alpha)} t^{\alpha-1} \exp(-\beta t), t > 0$$

$$f(t) = 0, t \leq 0$$
(15)

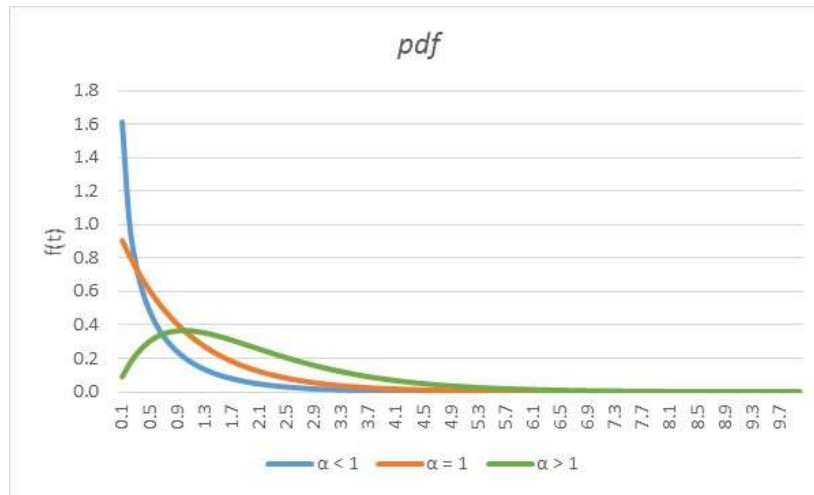


Figura 15 – Representação da função pdf da distribuição Gama

Fonte: Autora (2016)

A Função de Distribuição Acumulada de Falha (16) na distribuição gama é dada por:

$$F(t) = 1 - \sum_{k=0}^{\alpha-1} \frac{e^{-\beta t} (\beta t)^k}{k!}, t > 0$$
(16)

A expressão acima é a soma de termos da Distribuição de Poisson com média βt . Assim, tabelas da Poisson acumulada podem ser usadas para calcular a função de distribuição gama.

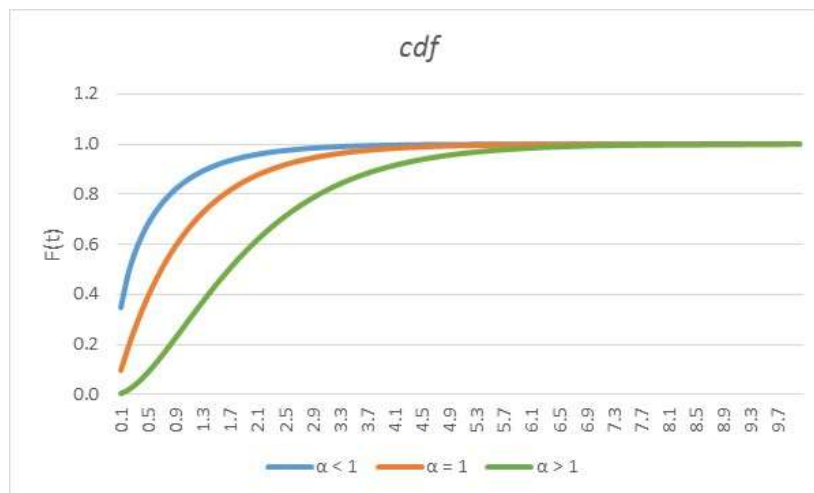


Figura 16 – Representação da função cdf da distribuição Gama

Fonte: Autora (2016)

Existe uma clara relação entre a distribuição exponencial e a distribuição gama. Quando $\alpha = 1$, a distribuição gama se reduz às características da distribuição exponencial, facilmente observado na Figura 20 representando a taxa de falha da distribuição. Tal fato se deve da definição geral de que se a variável aleatória x é a soma de α variáveis aleatórias independentes, distribuídas exponencialmente cada uma com parâmetro β , então x tem uma densidade gama com parâmetros α e β (LIBERAL, 2013).

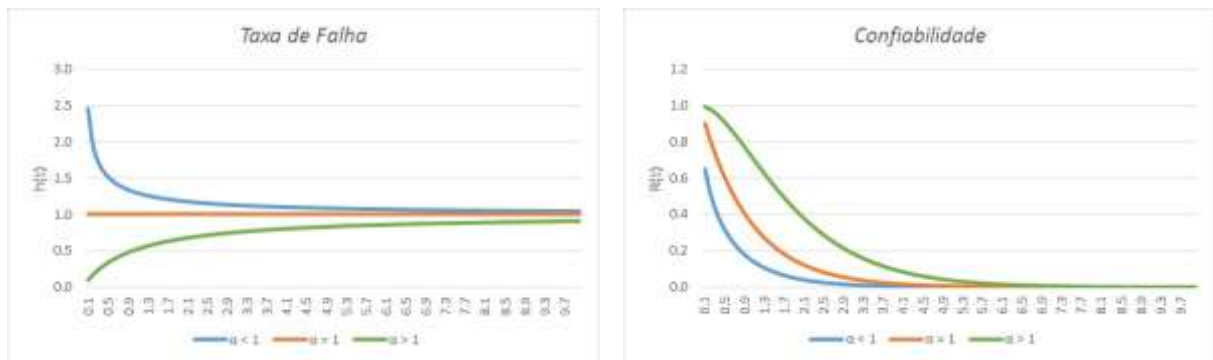


Figura 17 – Representação da Taxa de Falha e Função Confiabilidade da distribuição Gama

Fonte: Autora (2016)

A esperança matemática ou o Tempo Médio até Falha (17) na distribuição Gama é definido como:

$$MTTF = \sum_{i=1}^{\alpha} \frac{1}{\beta} = \frac{\alpha}{\beta} \quad (17)$$

5.1.5.3 Distribuição Log-normal

Assim como a distribuição de Weibull, a distribuição log-normal é muito usada para caracterizar tempo de vida de produtos e materiais. Isso inclui fadiga de metal, semicondutores, diodos e isolamento elétrica.

A função densidade de probabilidade de falha (18) da distribuição log-normal é dada por:

$$f(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\log(t) - \mu}{\sigma} \right)^2 \right], \quad t > 0 \quad (18)$$

Sendo $-\infty < \mu < \infty$ e $\sigma > 0$

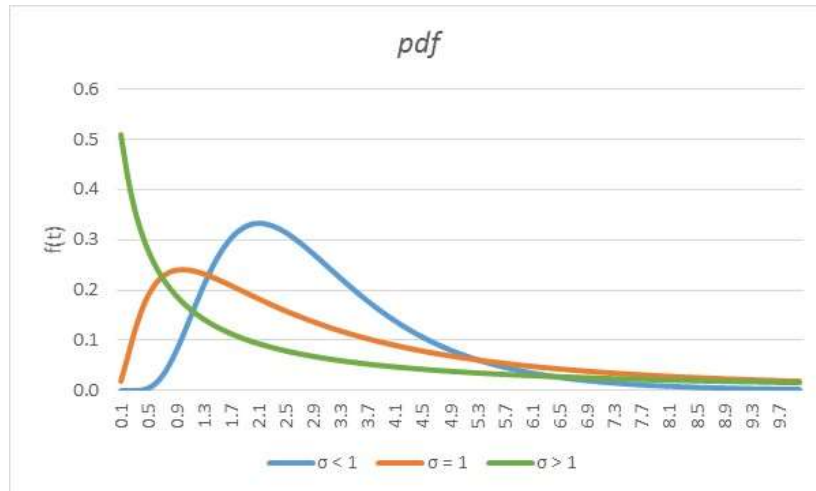


Figura 18 – Representação da função *pdf* da distribuição Log-normal

Fonte: Autora (2016)

Existe uma relação entre as distribuições log-normal e normal. O logaritmo de uma variável que segue distribuição log-normal com parâmetros μ e σ tem distribuição normal com média μ e desvio-padrão σ . Essa relação significa que dados provenientes de uma distribuição log-normal podem ser analisados segundo uma distribuição normal, se o logaritmo dos dados for considerado ao invés dos valores originais.

A função de confiabilidade (19) de uma distribuição log-normal é dada por:

$$R(t) = \Phi\left(\frac{\log(t) - \mu}{\sigma}\right) \quad (19)$$

Onde Φ representa a função de distribuição acumulada de uma distribuição normal padrão definido por: $\Phi(x) = \frac{1}{2}\left[1 + \operatorname{erf}\left(\frac{x}{\sqrt{2}}\right)\right]$; send erf por sua vez a função de erro definida: $\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x \exp(-t^2) dt$.

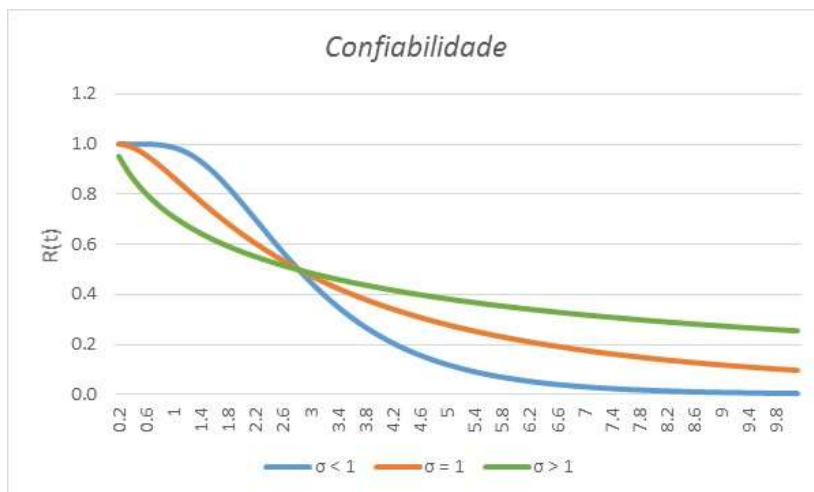


Figura 19 – Representação da Função Confiabilidade da distribuição Log-normal

Fonte: Autora (2016)

A função de distribuição acumulada de falha (20) da distribuição log-normal é dada por:

$$F(t) = \Phi\left(\frac{\ln(t) - \mu}{\sigma}\right) \quad (20)$$

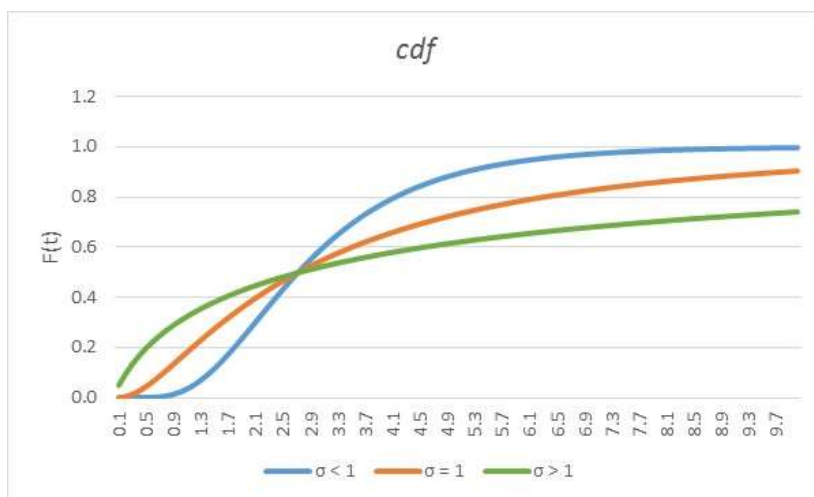


Figura 20 – Representação da Função *cdf* da distribuição Log-normal

Fonte: Autora (2016)

O Tempo Médio até Falha na distribuição Log-normal é definido como:

$$MTTF = \exp\left(\mu + \frac{\sigma^2}{2}\right) \quad (21)$$

E a Taxa de Falha representada por (18)/(19):



Figura 21 – Representação da Taxa de Falha da distribuição Log-normal

Fonte: Autora (2016)

5.1.5.4 Distribuição de Weibull

A distribuição de Weibull é a mais utilizada para modelar dados de confiabilidade. É usada para avaliar a confiabilidade em diversas aplicações mecânicas ou eletrônicas. A distribuição de Weibull pode modelar a função de risco em qualquer fase de vida do produto ou componente, ou seja, pode representar falhas típicas de partida, falhas aleatórias e falhas devido ao desgaste.

A distribuição acumulada de falha (22) da distribuição de Weibull é dada por:

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta} = 1 - \exp\left[-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta\right], t > 0 \quad (22)$$

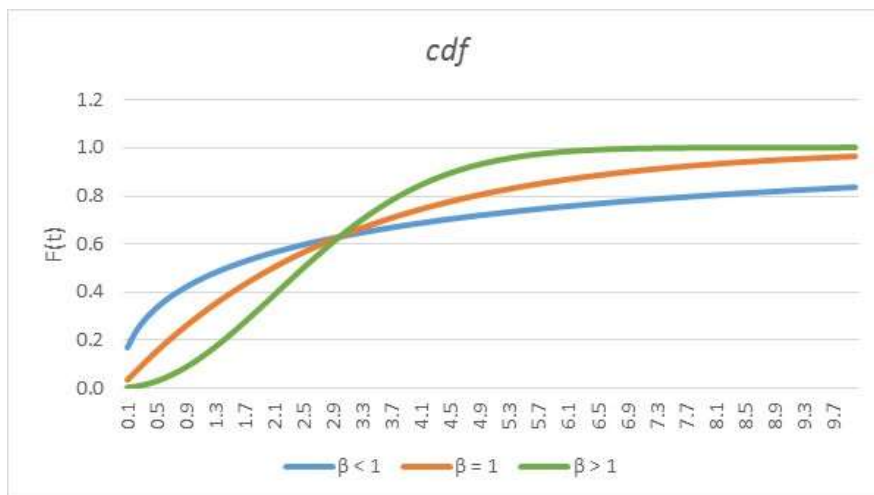


Figura 22 – Representação da Função cdf da distribuição Weibull

Fonte: Autora (2016)

A função de confiabilidade (23) então será:

$$R(t) = \exp \left[- \left(\frac{t - \gamma}{\eta} \right)^\beta \right] \quad (23)$$

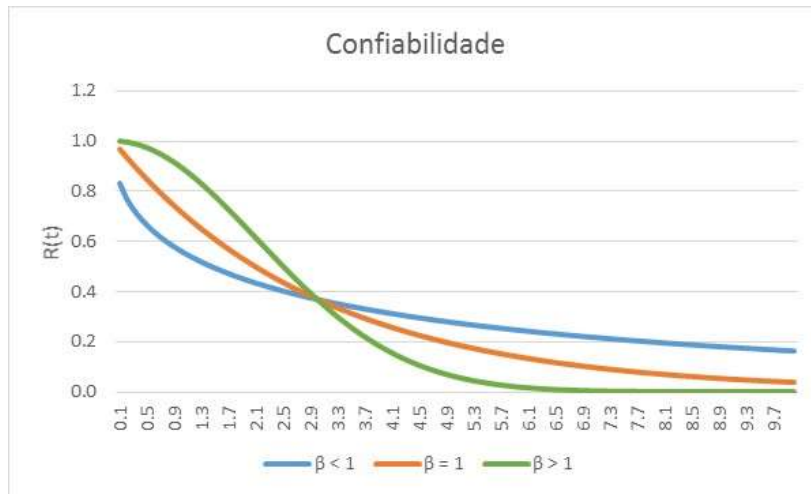


Figura 23 – Representação da Confiabilidade da distribuição Weibull

Fonte: Autora (2016)

A função densidade de probabilidade de falha (24) é:

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t - \gamma}{\eta} \right)^{\beta-1} \exp \left[- \left(\frac{t - \gamma}{\eta} \right)^\beta \right] \quad (24)$$

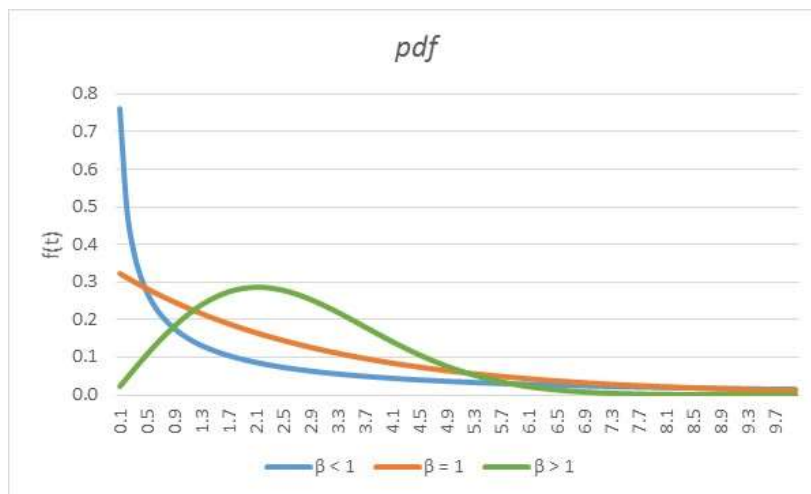


Figura 24 – Representação da função pdf da distribuição Weibull

Fonte: Autora (2016)

Dividindo (24) por (23) tem-se a função de taxa de falha (25):

$$h(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t - \gamma}{\eta} \right)^{\beta-1} \quad (25)$$

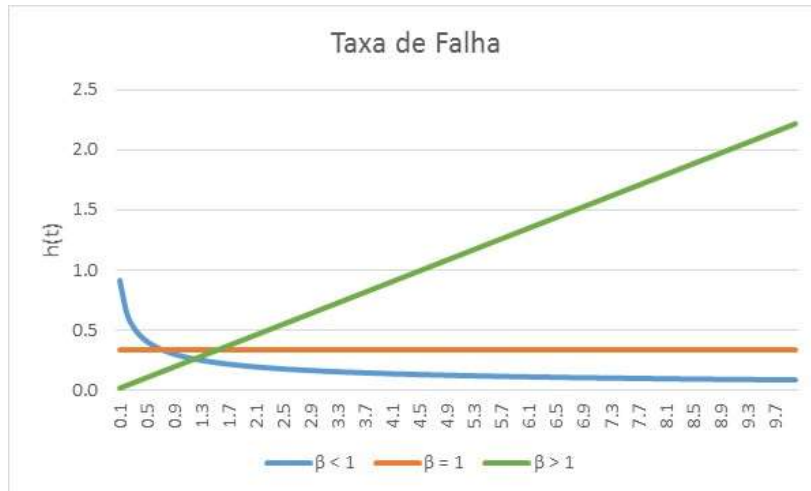


Figura 25 – Representação da Taxa de Falha da distribuição Weibull

Fonte: Autora (2016)

O Tempo Médio até Falha (26) na distribuição de Weibull:

$$MTTF = \gamma + \eta \cdot \Gamma\left(\frac{1}{\beta} + 1\right) \quad (26)$$

Na equação (26), o termo $\Gamma\left(\frac{1}{\beta} + 1\right)$ designa a função gama de $\left(\frac{1}{\beta} + 1\right)$. A função gama é uma integral indefinida tabelada. Os parâmetros β e η são os parâmetros de forma e escala respectivamente e γ representa o parâmetro de deslocamento, no caso de uma distribuição triparamétrica.

6.1 Metodologia

O estudo de caso apresentado representa um dos vários estudos de campo realizados em uma empresa do setor Aeronáutico, na qual a aplicação dos conceitos da análise de confiabilidade permitiu aos engenheiros de processo a análise e o direcionamento de esforços de melhoria na solução de problemas práticos envolvendo tempos de vida de componentes e produtos. O estudo foi desenvolvido com o auxílio do *software* Reliasoft Weibull++[®] responsável por documentar e facilitar o processo matemático e estatístico necessário.

6.2 Análise de Confiabilidade de Componente

O presente estudo foi realizado em uma empresa do setor aeronáutico, objetivando demonstrar a aplicabilidade prática da metodologia descrita neste trabalho, bem como evidenciar o tipo de informação às quais empresas em geral podem ter acesso com a utilização das Análises de Confiabilidade e como estas podem trazer melhorias em termos de custos e operação.

Através dos relatórios de falhas em campo sobre cada sistema fornecido pela empresa, compreendendo 18 meses (2015-2016), observou-se qual destes sistemas apresenta pior resultado considerando tempo de parada do sistema, impactando na confiabilidade de despacho do avião. A Figura 26 indica o Pareto resultante desta primeira análise.



Figura 26 – Pareto Sistemas x Indisponibilidade

Fonte: Autora (2016)

A segunda etapa da análise consistiu em identificar se o sistema com maior indisponibilidade, Sistema A, possui alguma tarefa programada de manutenção e se esta é realizada conforme os procedimentos dentro do período adequado. No plano de manutenção do avião analisado não foi constatada nenhuma tarefa relacionada ao sistema em questão, portanto, apenas tarefas corretivas são feitas no momento da falha do componente. O Sistema A é um sistema mandatório para o despacho do avião, não permitindo que este assuma o voo se uma falha relacionada a este sistema não for propriamente isolada e/ou reparada conforme instruções contidas na MMEL.

Com o sistema de estudo definido, através dos dados de manutenção do sistema, remoção de seus subsistemas e relatórios das estações de reparo, foram identificados os componentes contribuintes para a indisponibilidade do sistema e priorizado para o desdobramento da análise o componente apresentando maior número de remoções, no caso chamado de “Motor”. A Figura 27 representa a estruturação do sistema demonstrando os itens necessários para a total operação do sistema, itens reparáveis e não reparáveis. Por termos de confidencialidade, o nome do sistema não será divulgado e seus componentes são generalizados:

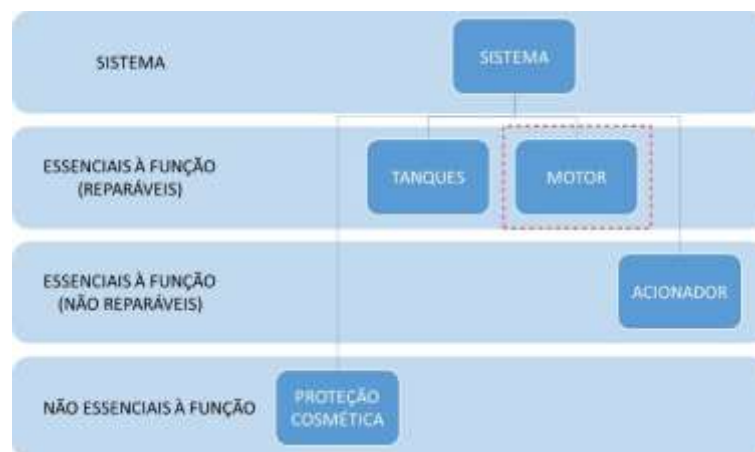


Figura 27 – Estrutura simplificada do Sistema Analisado

Fonte: Autora (2016)

As estações de reparo recebem os itens falhados ou suspeitos removidos do campo para identificação da causa da falha e eventual reparo ou descarte conforme a situação do item. Para o componente analisado, os eventos reportados nos relatórios das estações de reparo consistem em:

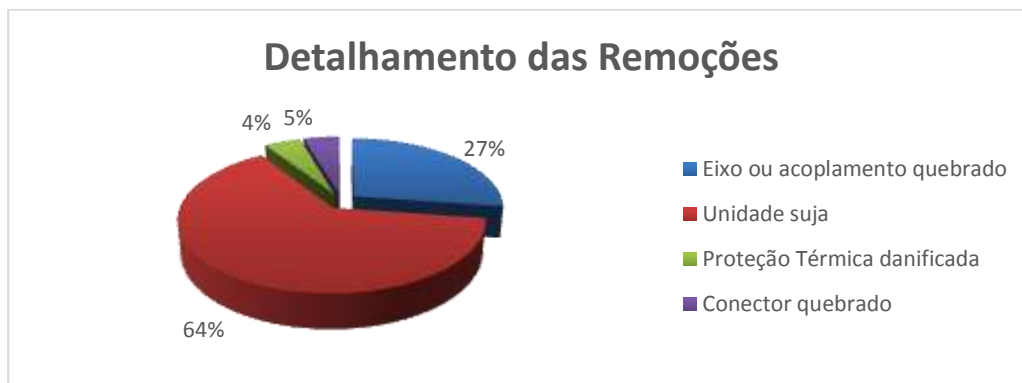


Figura 28 – Detalhamento das Remoções do período de 18 meses

Fonte: Autora (2016)

Consultando especialistas do componente estudado, constatou-se que os eventos reportados nas estações de reparo estão diretamente relacionados com a falta de manutenção no componente. Os dados analisados indicam que a falta de uma manutenção adequada permite o acúmulo de sujeira na unidade, que por sua vez força o eixo e seu acoplamento levando a quebra destes componentes. Em outras palavras, as fatias do gráfico representando a unidade suja e o eixo ou acoplamento quebrado estão associadas, sendo a quebra dos componentes a consequência da unidade estar com sujeira em excesso. Portanto, o modo de falha analisado no estudo de dados de vida ou estudo de confiabilidade do componente é sujeira em excesso.

A partir destes dados, foram realizadas as etapas de modelagem e análise de confiabilidade do componente crítico, segundo a metodologia descrita anteriormente. As análises foram realizadas com o uso do *Reliasoft Weibull++*[®], através das seguintes etapas:

1. Classificação das amostras de dados;
2. Análise dos dados e estimação dos modelos de Confiabilidade;
3. Escolha do modelo mais adequado para o sistema analisado;
4. Geração dos dados de Confiabilidade para o sistema, a partir do modelo escolhido;
5. Determinação do tipo de tarefa mais adequada para a situação problema;
6. Determinação do tempo ótimo da tarefa, baseado nos custos e vida do componente.

Em resumo, a classificação da amostra de dados tem as seguintes características:

Componente	Tamanho da Amostra	Número de Dados Suspensos	Tempo mínimo até a Falha (horas)	Tempo Máximo até a falha (horas)
Motor	36	12	312	5213

Pelos testes de aderência, o modelo considerado mais adequado para a descrição dos tempos até falha foi a distribuição G-Gamma seguida da distribuição Weibull de dois parâmetros. Devido à facilidade de interpretação promovida pela distribuição Weibull dois parâmetros, esta foi escolhida para ser atribuída como modelo para os dados analisados.

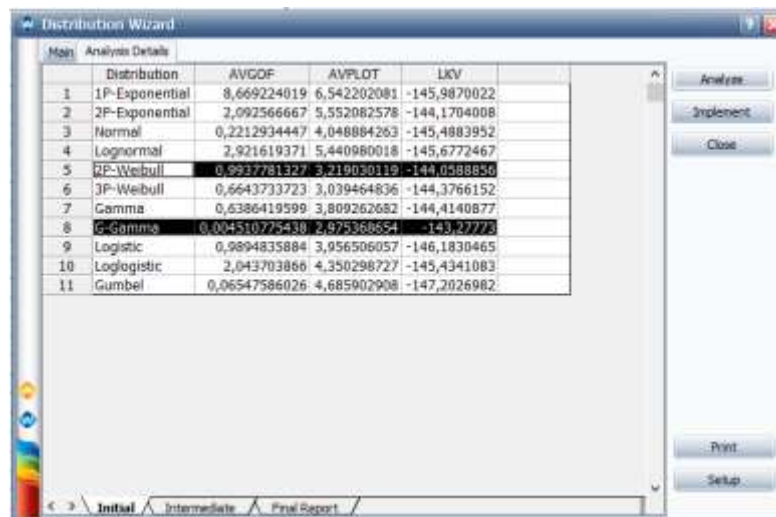
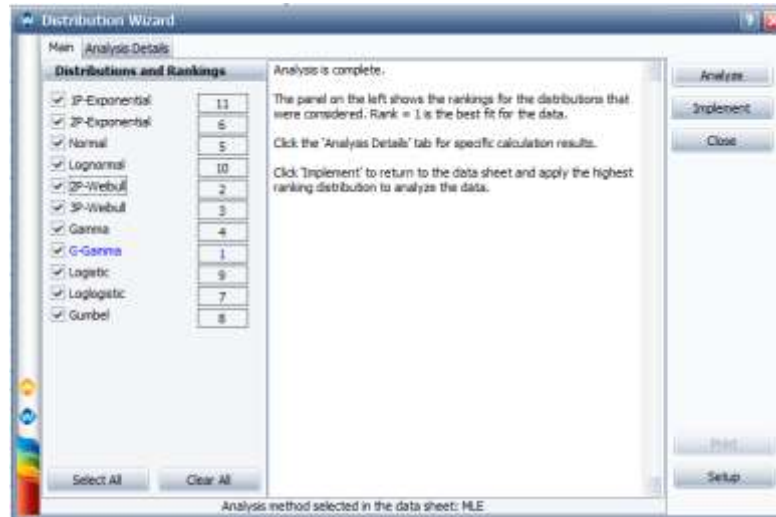


Figura 29 – Tela do *software*: assistente de distribuição

Fonte: Autora (2016)

	Condição F ou S	Tempo até F ou S (Hr)
1	F	207
2	F	312
3	S	514
4	F	531
5	F	571
6	S	997
7	F	1039
8	F	1053
9	S	1084
10	F	1303
11	S	1512
12	S	1532
13	F	1635
14	F	1720
15	S	1969
16	S	2016
17	F	2018
18	F	2238
19	S	2293
20	S	2346
21	S	2361
22	F	2967
23	S	3114
24	S	3122
25	F	3257
26	F	3259
27	F	3819
28	F	5213

Figura 30 – Tela do *software*: Tempos até falha

Fonte: Autora (2016)

Com base nas informações anteriores o ajuste dos modelos para as falhas foi realizado bem como estimados intervalos de confiança para os parâmetros dos modelos. A observação da *pdf* associada aos eventos juntamente ao resultado do parâmetro de forma $\beta = 1.55$ evidencia que as falhas do componente acontecem devido à falta de manutenção. O fator de forma acima de 1, representa que o componente está em sua maturidade, entretanto, o fator de vida característica do componente é relativamente baixo $\eta = 3032.84$ horas comparado ao tempo de vida útil do sistema onde este opera, projetado para 50000 horas. O nível de confiança utilizado neste modelo foi de 95%.

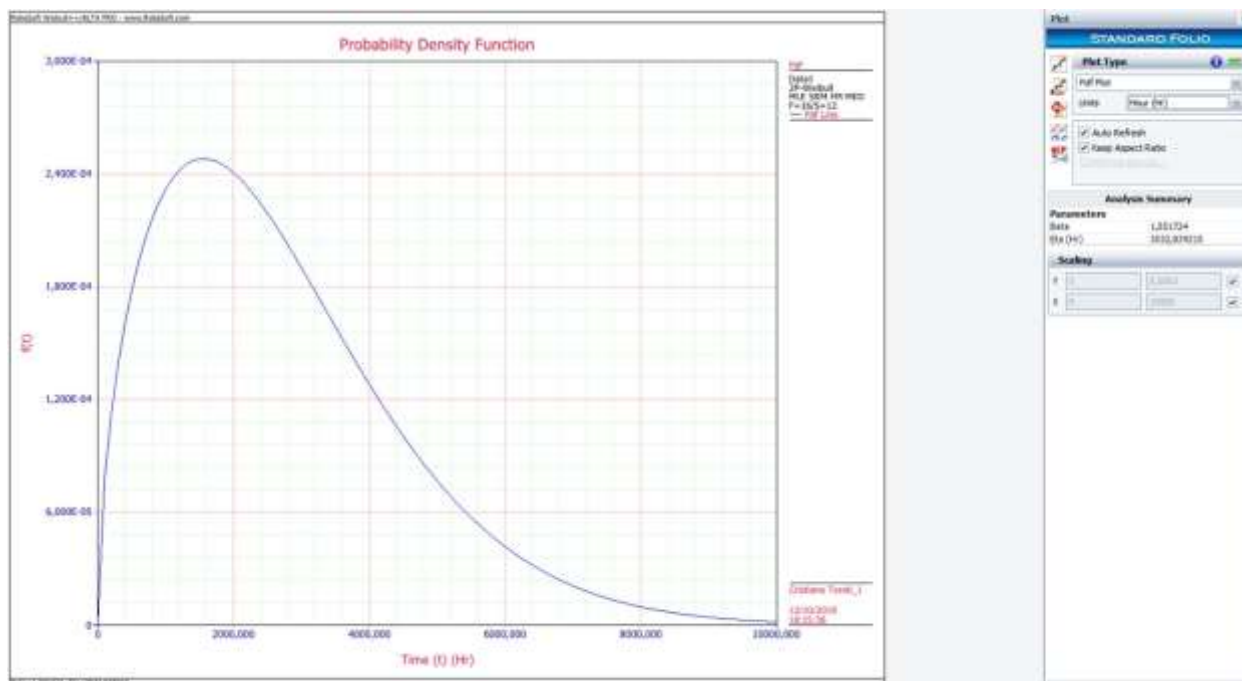


Figura 31 – Tela do *software*: Gráfico pdf

Fonte: Autora (2016)

Como ação corretiva dos dados analisados, a limpeza do componente foi comprovada eficaz em 100% dos casos, tornando em um primeiro momento a tarefa agendada de manutenção para limpeza do componente efetiva, entretanto, os custos das tarefas devem ser considerados para a inclusão de uma nova tarefa programada no plano de manutenção do avião.

Nas falhas analisadas, foi constatado que quando a mesma ocorre, o avião fica inoperante, atrasando os próximos voos agendados. O tempo de reparo abrange desde a parada do avião, retirada do componente, substituição, recolocação no avião e retomada de operação da partida. Apenas um colaborador é necessário para execução da tarefa. Além disto, também deve ser adicionado ao custo total da tarefa corretiva, o custo do item de substituição e o lucro cessante. Conforme um estudo realizado pela organização ATA (A4A), em 2015 o custo por minuto de atraso para as companhias aéreas americanas foi de US\$ 65.43, logo a perda total por lucro cessante é dada pela média de minutos atrasos por falha vezes o custo do minuto.

Conforme Bertulucci (2016), o cálculo do custo total da tarefa corretiva é dado por:

$$C_{mc} = \text{Custo da mão de obra} + \text{Custo de Material} + \text{Custo da perda por lucro cessante} \quad (27)$$

Como a tarefa preventiva é programada antes de ser realizada e geralmente feita em conjunto com a operação, não ocorre a perda por lucro cessante. Sendo assim, o cálculo do custo total da tarefa preventiva consiste no custo da mão de obra e material (BERTULUCCI, 2016).

$$C_{mp} = \text{Custo da mão de obra} + \text{Custo do Material} \quad (28)$$

Desta forma, os custos totais das tarefas são:

- A. Custo total da tarefa corretiva: US\$ 5.350,80
- B. Custo total da tarefa preventiva: US\$ 1.360,00

Como apresentado anteriormente no capítulo 4.3, na aviação existem os programas de manutenção onde os intervalos de paradas para manutenção são analisados previamente ao início de operação a fim de se determinar os melhores intervalos para as tarefas incluídas no quadro de manutenção. Portanto, é de extrema importância que o intervalo de manutenção estudado encaixe nos cheques de manutenção do avião já existentes, uma vez que o avião já está em operação há alguns anos.

Com os custos calculados e os parâmetros obtidos através da análise de distribuição de vida do componente, pôde-se estimar o tempo ótimo para realização da tarefa preventiva. A fim de se confirmar o resultado e demonstrar que mesmo na eventualidade do *software* não estar disponível é possível se aplicar a otimização, o tempo ótimo da tarefa foi estimado tanto através do comando de planejamento de manutenção contido no *software Weibull++*® como por uma planilha de cálculo para o ponto ótimo de manutenção baseada na confiabilidade estruturada conforme apresentada por Bertulucci (2016).



Figura 32 – Tela do software: Planejamento da manutenção

Fonte: Autora (2016)

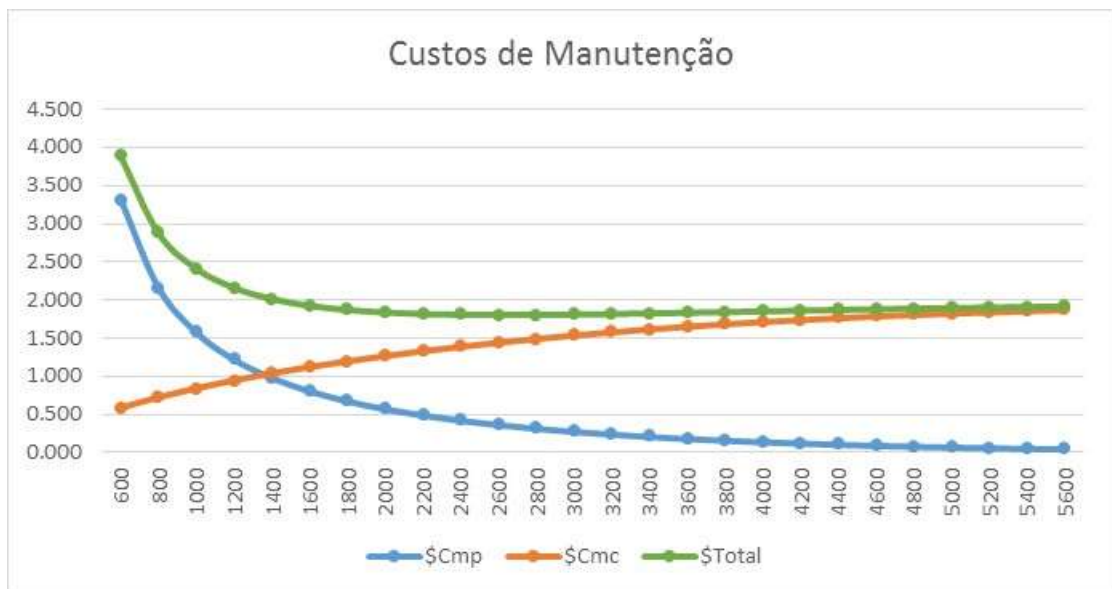


Figura 33 – Custos de manutenção

Fonte: Autora (2016)

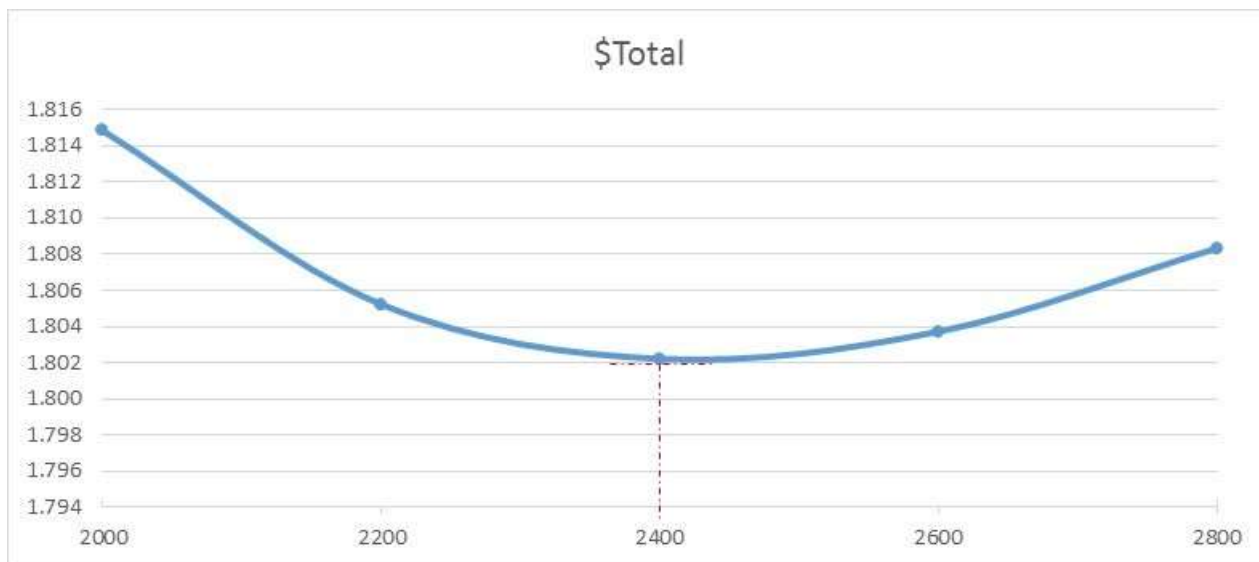


Figura 34 – Detalhamento da curva do custo total de manutenção

Fonte: Autora (2016)

O ponto mínimo da curva do total do custo de manutenção representa o ponto ótimo para execução da tarefa preventiva, neste caso 2400 horas. A aplicação da tarefa preventiva representa uma economia de US\$ 4.000,00 por componente.

7.1 Resultados e Conclusão

O presente estudo buscou analisar como a engenharia de confiabilidade deve ser aplicada à aviação, especificamente na manutenção e redução de custos, por meio da exploração dos conceitos básicos da disciplina, acrescidos de estudo teórico e prático do seu emprego.

Devido ao investimento elevado, como no caso dos aviões, espera-se que os mesmos operem entre 20-30 anos. Por apresentar um período de operação prolongado, e ser uma atividade de risco, a função confiabilidade deve ser analisada nos diversos setores envolvidos com a aviação, desde o projeto até a operação. Caso a confiabilidade seja negligenciada, falhas poderão ocorrer, causando perdas de vidas, danos ao ambiente e perda de reputação e patrimonial das companhias aéreas.

A manutenção aparece entre os 3 principais fatores nos custos de operação, conforme os diversos estudos feitos pelas organizações internacionais de apoio aos operadores como a IATA e a A4A. A fim de se tornarem mais competitivas, as companhias aéreas juntamente com as fabricantes estão constantemente desenvolvendo melhorias nos planos de manutenção para garantir a disponibilidade de todos os sistemas além do ininterrupto acompanhamento da performance dos componentes em campo.

Durante a operação, a performance observada em campo pode confirmar a confiabilidade especificada pelo fornecedor ou mostrar-se discrepante seja para mais ou para menos. Caso o desempenho medido seja inferior às especificações, os prejuízos aos usuários são notórios, uma vez que o avião necessitará de algum tipo de intervenção ou manutenção não prevista, sem contar a indisponibilidade do equipamento, propriamente dita.

Dessa forma, o monitoramento e acompanhamento do componente e a função confiabilidade relacionada a ele se tornam essenciais para a identificação de possíveis melhorias seja nas fases de projeto, fabricação, instalação ou manutenção. Com o estudo prático desenvolvido fica evidente a importância de tal acompanhamento com também os ganhos que a análise de confiabilidade de componente pode trazer.

A implementação da tarefa proposta pelo trabalho custa ao operador US\$1.360,00 por componente e elimina as perdas por atraso e paradas não programadas. Estas impactam diretamente no lucro cessante, na satisfação do cliente e na imagem do fornecedor. O estado atual custa a um operador US\$ 5.350,00 por componente, portanto a inclusão da tarefa preventiva economiza US 4.000,00 por componente. Como o avião analisado já possui outras

tarefas preventivas determinadas no mesmo intervalo proposto pelo estudo, 2400 horas, não existe resistência à inclusão da tarefa de limpeza proposta para o componente analisado.

Como aprimoramento da análise, um próximo passo seria o estudo dos dados de vidas dos outros componentes que compõem todo o sistema do avião e assim identificar a nível do sistema quais os componentes críticos e melhorias possíveis a serem aplicadas. Outro estudo bastante interessante que este trabalho propõe é a revisão dos planos de manutenção de tempos em tempos, uma vez que a frota tenha gerados dados suficientes para as análises, a fim de verificar a efetividade das tarefas e chegar nos intervalos ótimos de todas as tarefas incorporadas no plano, para torna-lo mais econômico e eficiente.

REFERÊNCIAS

- Air Transport Association (ATA). **ATA Spec2000: Reliability Data Collection and Exchange - Chapter 11**. Washington Dc, Estados Unidos da América, 2014. 2335
- Airlines for America (A4A). **Cost of Aircraft Delay to U.S. Passenger Carriers**. 2015. Disponível em: <<http://airlines.org/data/cost-of-aircraft-delay-to-u-s-passenger-carriers/>> Acesso em: 15 jun. 2016.
- _____. **Per-Minute Cost of Delays to U.S. Airlines**. 2015. Disponível em: <<http://airlines.org/data/per-minute-cost-of-delays-to-u-s-airlines/>> Acesso em: 22 set. 2016.
- Associação Brasileira De Normas Técnicas (ABNT). **NBR 5462: Confiabilidade e Mantenabilidade**. Rio de Janeiro, 1994. 37 p.
- BARBOSA, Alessandra Costa. **Aplicação da Manutenção Centrada em Confiabilidade na Função Transmissão a fim de reduzir o tempo de indisponibilidade**. 2009. 72 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009. Disponível em: <<http://monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10000970.pdf>>. Acesso em: 23 jul. 2016.
- BARBOSA, Gustavo Franco. **Desenvolvimento de um modelo de análise para implantação de automação na manufatura aeronáutica, orientado pelos requisitos das metodologias de Projeto para Excelência (DFX – Design for Excellence) e Produção Enxuta (Lean Manufacturing)**. 2012. 332 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18145/tde-17052013-142409/publico/GustavoFrancoBarbosa.pdf>>. Acesso em: 23 jul. 2016.
- BERGAMO FILHO, Valentino. **Confiabilidade: Básica E Prática**. São Paulo: Edgard Blucher, 1997. 108 p.
- BERTULUCCI, Cristiano S. **Confiabilidade e disponibilidade de máquinas: um exemplo prático**. 2016. Disponível em: < <https://www.citisystems.com.br/confiabilidade-disponibilidade-maquinas/>>. Acesso em: 22 set. 2016
- BLISCHKE, Wallace R. ; MURTHY, D. N. Prabhakar. **Reliability: Modeling, Prediction, and Optimization**. John Wiley & Sons, Hoboken, NJ – Estados Unidos da América, 2000. 848 p.
- CARDOSO, Juarez. **Modelamento da Despachabilidade de uma Frota de Aeronaves Comerciais**. II Simpósio de Confiabilidade e Gestão de Segurança Operacional DCA-BR. São José dos Campos, 2010. 35 p.
- CONTI, Laís Rezende Serrano. **Melhoria Do Sistema De Gestão De Ferramentais De Manutenção Aeronáutica Utilizando A Tecnologia De Identificação Automática De Dados**. 2011. 153 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia de Produção, Programa de Pós-graduação,

Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2011. Disponível em: <<http://saturno.unifei.edu.br/bim/0038667.pdf>>. Acesso em: 23 jul. 2016.

Department Of Transportation (DOT). **On-Time Performance**: Bureau of Transportation Statistics. 2016 ed. Washington Dc, Estados Unidos da América, 2016. Disponível em: <http://www.transtats.bts.gov/TableInfo.asp?Table_ID=236>. Acesso em: 19 jul. 2016.

DUEK, Carlos. **Análise de Confiabilidade na manutenção de componente mecânico de aviação**. f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção Área de concentração Qualidade e Produtividade, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria – RS, 2005.

ELSAYED, Elsayed A. **Reliability Engineering**. 2. ed. New Jersey: Wiley, 2012. 792 p.

Federal Aviation Administration (FAA). **Chapter 4 Configuration Deviation List (CDL) And Minimum Equipment List (MEL)**: Section 2 MEL Requirements for 14 CFR Parts 91, 137, and 142 Operations. Washington Dc, Estados Unidos da América, 2015. 16 p. Disponível em: <<http://fsims.faa.gov/PICDetail.aspx?docId=8900.1,Vol.4,Ch4,Sec2>>. Acesso em: 31 ago. 2016.

FOGLIATTO, Flávio Sanson; RIBEIRO, José Luis Duarte. **Confiabilidade e Manutenção Industrial**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2011. 288 p.

HIGGINS, Lindley R.; MOBLEY, Keith. **Maintenance Engineering Handbook**. 7. ed. New York: Mcgraw-hill, 2008. 1200 p.

International Air Transportation Association (IATA). **Maintenance Cost Task Force (MCTF), 2014**. Atenas, Grécia, 2014. 30 p. Disponível em: <<http://www.iata.org/whatwedo/workgroups/Pages/mctf.aspx>> Acesso em: 22 de jul. 2016.

_____. **Airline Disclosure Guides (ADG): Aircraft Acquisition Cost and Depreciation**. Montréal, Canada, 2016. 20 p.

_____. **Best Practices for Component Maintenance Cost Management**. Montréal, Canada, 2016. 35 p. Disponível em: <<http://www.iata.org/whatwedo/workgroups/Pages/mctf.aspx>> Acesso em: 22 de jul. 2016.

KINNISON, Harry; SIDDIQUI, Tariq (Ed.). **Aviation Maintenance Management**. 2. ed. New York: Mcgraw-hill, 2004. 322 p.

KUMAR, K. International Journal of Quality and Reliability Management. **Effect of the product term on reliability prediction of integrated circuits**. UK, v.13, n.8, 1996, 78 p.

MARCORIN, Adilson José.; ABACKERLI, Alvaro J. **Estudo exploratório sobre áreas potenciais de aplicação de técnicas de confiabilidade**. Encontro Nacional de Engenharia de Produção XXI. Salvador, 2001.

MORAIS, Vivian Cardoso de. **Metodologia de priorização de equipamentos médico-hospitalares em programas de manutenção preventiva**. 2004. 106 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Biomédica, Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2004.

REIS, Luiz Otavio Rosa; ANDRADE, Jairo José de Oliveira. **Análise de falhas e da posição na curva da banheira de moldes empregados em equipamentos de injeção**. XXIX ENEGEP. Salvador.

ABEPRO, 11p. 2009. Disponível em:

<http://www.abepro.org.br/biblioteca/enegep2009_TN_STO_092_626_14075.pdf>. Acesso em: 23 ago. 2016.

RELIASOFT. **Asset Performance Management Supported By Reliability Engineering**. Reliability Edge, 11., Tucson, 2011. 24 p. Disponível em: <http://www.reliasoft.com/pubs/reliabilityedge_v11i1.pdf>. Acesso em: 03 ago. 2016.

RYAN, Thomas. **Modern Engineering Statistics**. 1. ed. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2007. 586 p.

PECCI, Samuel R. A.. **Programa de Manutenção**. São Paulo, 2014. Disponível em: <<http://www.aerobyte.com.br/site/index.php/artigos/45-programa-de-manutencao>>. Acesso em: 03 ago. 2016.

SILVA, Robson Carneiro Correia da. **Sistema Especialista de apoio à decisão para o diagnóstico de falhas em aeronaves**. 2010. 84 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia da Computação, Departamento de Sistemas e Computação, Universidade de Pernambuco, Recife, 2010. Disponível em: <http://tcc.ecomp.poli.br/20101/TCC_final_Robson.pdf>. Acesso em: 23 jul. 2016.

YU, Wen; HE, Haibo; ZHANG, Niam. **Advances in Neural Networks – ISNN 2009**. 6º Simpósio Internacional Em Redes Neurais, Wuhan - China. Alemanha: Springer, 2009.

Swedish Standards Institute. **SS-EN 13306:2010: Maintenance - Maintenance terminology**. Estocolmo, 2010. 40 p.

VACCARO, Guilherme Luis Roehle. **Modelagem e Análise da Confiabilidade de Sistemas**. 1997. 222 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Produção, Programa de Pós-graduação, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1997. Disponível em: <<https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/128105/000199240.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 31 jul. 2016.

WIKSTÉN, Johan; JOHANSSON, Marcus. **Maintenance and Reliability: With Focus on Aircraft Maintenance and Spares Provisioning**. 2006. 262 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Aeronáutica, Divisão de Operação e Manutenção, Luleå University Of Technology, Luleå, Suécia, 2006.

WUTTKE, Régis André; SELBITTO, Miguel Afonso. Cálculo da disponibilidade e da posição na curva da banheira de uma válvula de processo petroquímico. **Revista Produção: Associação Brasileira de Engenharia de Produção - ABEPRO**, Santa Catarina, v 8 , n. 4, p.23, jan. 2008. Disponível em: <<https://www.producaoonline.org.br/rpo/article/viewFile/134/266>>. Acesso em: 23 ago. 2016.