

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

**HERIC RAMOS SILVA**

**ANÁLISE DE DADOS DE VIDA APLICADA A UM COMPONENTE  
AERONÁUTICO NA OTIMIZAÇÃO DO SEU INTERVALO DE MANUTENÇÃO.**

**MONOGRAFIA DE ESPECIALIZAÇÃO**

**SÃO PAULO**

**2016**

HERIC RAMOS SILVA

**ANÁLISE DE DADOS DE VIDA APLICADA A UM COMPONENTE  
AERONÁUTICO NA OTIMIZAÇÃO DO SEU INTERVALO DE MANUTENÇÃO.**

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 DADOS DE VIDA APLICADA A UM COMPONENTE AERONÁUTICO  
NA OTIMIZAÇÃO DO SEU INTERVALO DE MANUTENÇÃO.

por

HERIC RAMOS SILVA

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

---

Prof. Emerson Rigoni, Dr. Eng.  
UTFPR

---

Prof. Carlos Henrique Mariano Dr.  
UTFPR

---

Prof. Marcelo Rodrigues Dr.  
UTFPR

## RESUMO

SILVA, Heric Ramos. **Análise de dados de vida aplicada a um componente aeronáutico na otimização do seu intervalo de manutenção.** 2016. 41. Monografia Especialização em Engenharia da Confiabilidade - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2016.

Ao final dos anos 50 a frota de aviões cresceu muito e os custos de manutenção se tornaram significativamente altos, tornando viável um estudo mais detalhado sobre as técnicas de manutenção existentes à época. Paralelamente à isso, a *Federal Aviation Agency* (FAA), que regulava as práticas de manutenção preventivas, estava frustrada com estudos mostrando não haver controle entre confiabilidade e manutenção preventiva em certos tipos de motores. Isso levou, em 1960, à uma força tarefa entre FAA e companhias aéreas, com o objetivo de investigar as capacidades da manutenção preventiva. A metodologia é reconhecidamente um sucesso quanto à sua aplicação, gerando grandes ganhos em tarefas de manutenção preventiva, custos de manutenção, disponibilidade de sistemas, sobressalentes, etc. Porém ainda há pontos em que a metodologia apresenta fraquezas e necessita de ferramentas complementares. Um exemplo disto, e que será objeto de estudo neste trabalho, é a falta de modelos probabilísticos na determinação das estratégias de manutenção e intervalos de manutenção ficando dependente da experiência do analista, o que pode levar a um resultado enviesado e errôneo. Como resultado deste trabalho foi possível determinar o intervalo de manutenção para um componente fundamentado em evidências numéricas obtidas de dados de campo, aumentando em 25% o intervalo anteriormente utilizado.

Palavras-chave: Confiabilidade; Intervalo de manutenção; RCM; MSG-3; Weibull; Manutenção; Otimização.

## **ABSTRACT**

By the end of the 50s, the aircraft fleet had grown exponentially and the maintenance costs had become significantly high, this fact made a more thorough study about maintenance techniques viable at that time. At the same time, the Federal Aviation Agency (FAA), responsible for regulating the preventive maintenance was frustrated at some studies showing that there was no control between reliability and preventive maintenance in some kinds of engines. This led to, in 1960, a task force between FAA and the airlines, aiming the investigation of the capabilities of preventive maintenance. This methodology is known to be successful regarding its application, causing great benefit and gain in preventive maintenance tasks, maintenance costs, availability of systems, spares etc. However, there are still some weakness to some points of this methodology which requires additional features. An example of it, that will be an object in this study, is the lack of probabilistic models in determining the maintenance strategies and maintenance intervals depending on the analyst's own experience that can result in a bias and erroneous result. As a result of this study, it was possible to determine a maintenance interval for a specific component based on field data evidences, increasing in 25% the interval previously used.

Keywords: Reliability; Maintenance interval; RCM; MSG-3; Weibull; Maintenance; Optimization.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Curva P-F. ....	14
Figura 2: Função densidade de probabilidade. ....	20
Figura 3: Função confiabilidade. ....	21
Figura 4: Curva da banheira. ....	22
Figura 5: Dados organizados. ....	30
Figura 6: Método de estimação escolhido. ....	30
Figura 7: Aderencia das distribuições selecionadas. ....	31
Figura 8: Curva densidade de probabilidade de falha. ....	32
Figura 9: Curva de probabilidade de falha. ....	32
Figura 10: Curva de confiabilidade. ....	33
Figura 11: Confiabilidade em 5000h. ....	34
Figura 12: Otimização do intervalo de manutenção – dados de entrada. ....	35
Figura 13: Otimização do intervalo – resultado. ....	35

## SUMÁRIO

Capítulo 1 .....	9
1.1 Considerações iniciais.....	9
1.2 Problema .....	10
1.3 Justificativa .....	10
1.4 Objetivos .....	11
Objetivo Geral .....	11
Objetivo específico .....	11
1.5 Metodologia .....	12
1.6 Estrutura do trabalho.....	12
Capítulo 2 – Título do capítulo.....	13
Inserir um parágrafo introdutório do capítulo .....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
2.1 A Manutenção.....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
2.2 Confiabilidade e Manutenção .....	14
2.3 Manutenção na Indústria Aeronáutica .....	15
2.4 Custos de Manutenção .....	16
Capítulo 3 – Título do capítulo.....	18
Inserir um parágrafo introdutório do capítulo .....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
3.1 Análise de dados de vida e a confiabilidade .....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
3.1.1 Confiabilidade .....	19
3.1.2 Função densidade de probabilidade.....	19
3.1.3 Função de probabilidade acumulada .....	19
3.1.4 Função confiabilidade – R (t) .....	20
3.1.5 Taxa de falha – $\lambda$ (t).....	21
3.1.6 Vida média – T .....	22
3.2 Distribuições estatísticas .....	23
3.2.1 Distribuição exponencial .....	23

3.2.2	Distribuição normal .....	24
3.2.3	Distribuição Weibull.....	25
Capítulo 4 – Título do capítulo.....		28
Inserir um parágrafo introdutório do capítulo .....		<b>Erro! Indicador não definido.</b>
4.1	Metodologia aplicada.....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
4.2	Análise de Confiabilidade do Componente .....	28
Capítulo 5 .....		36
5.1	Resultados e conclusões.....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
5.2	Trabalhos futuros .....	37
Bibliografia.....		38



## Capítulo 1

### 1.1 Considerações iniciais

Ao final da década de 50 a frota de aviões tinha crescido bastante e os custos de manutenção se tornaram significativamente altos, tornando viável um estudo mais detalhado sobre as técnicas de manutenção existentes na época. Paralelamente a isso, a *Federal Aviation Administration* (FAA), que regulava as práticas de manutenção preventivas, estava frustrada por estudos mostrando não haver controle entre confiabilidade e manutenção preventiva em certo tipos de motores. Isso levou em 1960 à uma força tarefa entre FAA e companhias aéreas a investigar mais profundamente as manutenções preventiva. (MOUBRAY, 2000) (NOWLAN; HEAP, 1978)

A partir de então o conceito de Manutenção Centrada na Confiabilidade (MCC), do inglês *Reliability Centered Maintenance* (RCM), foi desenvolvido para assegurar a máxima confiabilidade e segurança que o equipamento pudesse oferecer a um custo mínimo. O primeiro documento usado para desenvolver um programa de manutenção centrada na confiabilidade, conhecido como MSG-1, foi aplicado no Boeing 747 e foi um sucesso. Posteriormente, uma atualização deu origem a um segundo documento, conhecido como MSG-2, que foi aplicado no programa de manutenção do Lockheed 1011 e Douglas DC-10, na aviação comercial, e no Lockheed P-3 e S-3 e o McDonnell F4J, na aviação militar. Os programas de manutenção do Airbus A300 e o Concorde foram baseados no MSG-2. (MOUBRAY, 2000) (NOWLAN; HEAP, 1978)

Após os trabalhos de Nowlan e Heap, em 1978, uma nova atualização deu origem ao MSG-3, que permace até os dias atuais como o processo utilizado para o desenvolvimento e refinamento do programa de manutenção de aeronaves civis. (MOUBRAY, 2000) (NOWLAN; HEAP, 1978)

A metodologia é reconhecidamente um sucesso quanto à sua aplicação, gerando grandes ganhos em tarefas de manutenção preventiva, custos de manutenção, disponibilidade de sistemas, sobressalentes e etc. Porém ainda há pontos em que a metodologia apresenta fraquezas e necessita de ferramentas complementares. Um exemplo disto, e que será objeto de estudo nesse trabalho, é a falta de modelos probabilísticos na determinação das estratégias de

manutenção e intervalos de manutenção ficando dependente da experiência do analista, o que pode levar à um resultado enviesado e errôneo. (D'APPIO; FIRPO E SÁVIO, 1998) (HAUGE, JOHNSTON, 2000) (HAUGE, 2002).

## **1.2 Problema**

O desenvolvimento da metodologia de Manutenção Centrada na Confiabilidade (MCC) é muito bem desenhado e estruturado de maneira que é amplamente utilizado para a determinação das tarefas de manutenção para sistemas aeronáuticos. Desde o seu nascimento, na década de 1960, com um trabalho conjunto da FAA (*Federal Aviation Agency*) e operadores, o seu objetivo era desenvolver um plano de manutenção sistemático na indústria aeronáutica e desde então vem sendo aprimorada e aplicada também em diferentes setores da indústria pela sua grande eficácia.

No entanto, quanto à definição do intervalo de execução da tarefa o MCC é dependente da experiência do time de analistas responsáveis pela análise, sendo uma análise mais qualitativa do que quantitativa propriamente dita. Isso pode levar a erros devido à falta de experiência do time, principalmente.

Este trabalho propõe-se analisar a aplicação de modelos probabilísticos quantitativos à sistemática do MCC pela aplicação da análise de dados de vida na determinação do intervalo de manutenção definido previamente em um MCC minimizando possíveis erros decorrentes da experiência do analista e os custos da tarefa.

## **1.3 Justificativa**

A metodologia MCC é uma excelente ferramenta para a elaboração de um plano de manutenção desde o desenvolvimento do produtos favorecendo um produto competitivo no que se refere a custos e tarefas de manutenção. Considerando o fato de que companhias aéreas operam com grande quantidade de aviões o quesito custo de manutenção deve ser minimizado ao máximo para que seja economicamente atrativa a aquisição de uma aeronave.

Aeronaves, assim como veículos, possuem paradas programadas baseadas no calendário ou no tempo de utilização. Essas paradas são definidas na concepção do projeto da aeronave e os sistemas que a compõem devem seguir o máximo possível os intervalos programados, os chamados *letter-checks*, para que os custos totais sejam minimizados.

Nesse trabalho espera-se definir um intervalo de manutenção para uma tarefa de uma aeronave comercial por meio de análise probabilística de dados de vida de um componente que esteja em um dos *letter-checks* da aeronave.

## **1.4 Objetivos**

### **Objetivo Geral**

Determinar, utilizando ferramentas quantitativas de análise de dados de vida, o intervalo de execução de uma tarefa agendada de manutenção para um componente do sistema de aeronaves comerciais, diminuindo assim a subjetividade no julgamento do especialista quando definindo o intervalo de manutenção.

### **Objetivo específico**

Tendo o objetivo principal como foco do trabalho, alguns objetivos específicos são requeridos, entre eles:

- Descrever a aplicação da análise de dados de vida na manutenção centrada em confiabilidade, estabelecendo um elo entre as metodologias;
- Identificar os parâmetros de vida de um componente em serviço;
- Modelar os dados de tarefas agendadas executadas em campo para o conhecimento do comportamento do componente em serviço;
- Discutir os resultados da análise de vida de maneira a melhorar os intervalos de manutenção, visando assim uma diminuição dos custos da tarefa.

## 1.5 Metodologia

A metodologia aplicada nesse trabalho baseou-se em selecionar uma tarefa do plano de manutenção desenvolvido pela metodologia de Manutenção Centrada na Confiabilidade para o sistema. Então, por meio das tarefas agendadas executadas coletadas em uma frota de aeronaves foi realizada a análise de dados de vida do componente. Posteriormente, foram levantadas as métricas da confiabilidade que por sua vez foram comparadas a um processo de otimização de custos com a finalidade de se encontrar o intervalo ótimo de manutenção de maneira a diminuir os custos da tarefa pela seleção do melhor *check* para executá-la.

## 1.6 Estrutura do trabalho

O desenvolvimento do trabalho está estruturado em 5 capítulos. No capítulo 1 será feita a contextualização do trabalho, dando 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 se alcançará os o objetivo proposto pela pesquisa.

O capítulo 2 abordará o objeto de estudo do trabalho.

No capítulo 3 será feito um detalhamento da metodologia RCM (*Reliability Centered Maintenance*) ou Manutenção Centrada na Confiabilidade (MCC), em tradução livre, abordando os seus conceitos principais. Também, a análise de dados de vida será detalhada para melhor entendimento do desenvolvimento do estudo.

O capítulo 4 tem como objetivo o detalhamento da aplicação dos conceitos teóricos abordados no capítulo 3 ao objeto de pesquisa apresentado no capítulo 2

Por final, o capítulo 5 apresenta os resultados obtidos da aplicação da base teórica ao objeto de estudo e considerações finais, bem como a conclusão dos objetivos propostos no capítulo

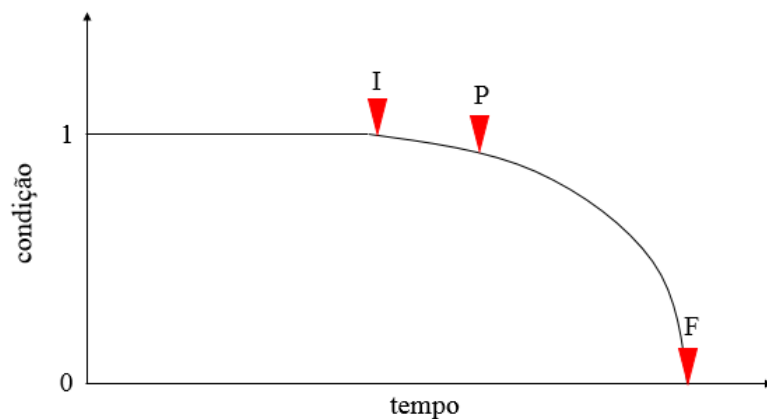
## Capítulo 2 – Título do capítulo

A manutenção pode ser entendida como um ramo da engenharia que assegura que o seu Sistema esteja com a sua maior disponibilidade, podendo ser dividida em corretiva e preventiva baseada na condição ou preventive baseada base tempo (NBR 5462; SS-EN 13306). Para tanto, a manutenção depende fortemente de todas as áreas da engenharia, podendo ser enxergada por diversos pontos de vista gerando práticas muitas vezes inéditas, saindo do escopo de soluções óbvias e imediatas para uma ação inovadora. (HIGGINS; MOBLEY, 2008)

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 é comumente conhecido como "tarefa não agendada" ou "tarefa não programada", e seu tempo de execução é incerto. Geralmente, esse tipo de abordagem é aplicada para sistemas que apresentam falhas aleatórias e/ou que possíveis falhas não afete a segurança da operação ou processo. Para facilitar o entendimento pode-se citar a troca da lâmpada do farol de um veículo.

No entanto, as manutenções preventivas, seja ela baseada na condição ou no tempo, 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 do Sistema, otimizando a operação e disponibilidade. Geralmente, esses tipos de manutenção são aplicados para sistemas que possui alguma degradação durante a sua operação devido ao tempo de uso e/ou a segurança da operação seja comprometida caso o Sistema esteja falhado, à exemplo disso pode-se citar a troca de óleo do motor de um caso, onde a troca é baseada na quilometragem do veículo

A ação preventiva de manutenção é tomada através do monitoramento de alguns parâmetros de condição e tempo, sendo assim possível identificar o instante ideal para se executar a manutenção preventive pela chamada curva P-F, representada pela figura abaixo, na qual mostra a evolução da degradação da função até a sua falha funcional.



**Figura 1: Curva P-F.**  
**Fonte: Autor**

A figura 1 ilustra a curva P-F, mostrando o ponto onde a falha se inicia (I), o ponto a partir de onde podem ser observadas alguma degradação (P) e o ponto de falha funcional (F). (MOUBRAY, 1997)

## 2.1 Confiabilidade e Manutenção

Confiabilidade é a capacidade de um item desempenhar uma função requerida sob condições especificadas, durante um intervalo de tempo. (NBR 5462). A confiabilidade também pode ser definida como “a probabilidade de um produto executar, sem falhar, uma certa missão, sob certas condições, durante um determinado período de tempo” (BERGAMO FILHO, 1997).

Seu objetivo está em analisar o desempenho de uma função, ou seja, como o Sistema se comporta durante sua vida. Adicionado à função, as condições de uso para as quais foram projetados. Então, como a confiabilidade representa o desempenho de uma função em virtude do seu tempo de uso e das condições nas quais está sendo aplicado, esta métrica é uma ferramenta poderosa na preparação das estratégias de manutenção. Assim, atividades de manutenção corretivas ou preventivas podem ser melhor adequadas, ao longo do tempo, conforme as variações no desempenho, devido a fatores de desgaste ou envelhecimento como por exemplo fadiga e corrosão.

Expandindo o conceito de confiabilidade pode-se perceber que esta é uma função direta do tempo e então é uma variável contínua e quantitativa, podendo ser modelada

estatisticamente, trazendo um maior embazamento para as decisões de manutenção e, conseqüentemente, uma otimização de ativos, tempo e dinheiro.

Desta filosofia de unir a confiabilidade à manutenção surgiu o conceito de Manutenção Centrada na Confiabilidade, do inglês *Reliability Centered Maintenance*, com trabalhos iniciais para a aviação. (NOWLAN; HEAP, 1978)

## **2.2 Manutenção na Indústria Aeronáutica**

Na indústria aeronáutica, a manutenção é uma essencial para garantir a um voo seguro, ou seja, que falhas críticas não ocorram durante o voo. Devido ao alto risco relacionado com o número de fatalidades derivados de um acidente, em aeronaves, a confiabilidade deve ser elevada. Entretanto, para se manter as funcionalidades do sistema, ou restaurar suas funções é necessário utilizar-se das ações de manutenção, incluindo, mas não limitado a revisão, reparo, remoção, substituição, modificação, inspeção, calibração e verificação

Um programa de manutenção ou plano de manutenção tem como função descrever detalhadamente quais serão os intervalos e tarefas de manutenção a serem executados com o objetivo de manter a aeronave em condições de voo. Esses programas são desenvolvidos para cada nova aeronave ou modelos derivados dos existentes, sendo adaptado de acordo com a necessidade de cada operador tendo em vista o perfil de operação individual. Atualmente os planos de manutenção das aeronaves seguem o conceito de Manutenção Centrada na Confiabilidade. O programa de manutenção além de garantir a disponibilidade e segurança da aeronave, também é utilizada como uma ferramenta de melhoria dos custos operacionais de uma aeronave devido a grande competitividade no mercado aeronáutico.

Para otimizar a manutenção, os fabricantes utilizam procedimentos estatísticos para assegurar os limites de segurança 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 mais acurados, obtidos durante um certo período de operação da aeronave, resultando em alteração dos intervalos de manutenção, de maneira a melhorar a eficiência operacional da mesma.

Todo plano de manutenção ou alteração do mesmo é submetido para análise e aprovação das Autoridade Aeronáutica em que a aeronave foi certificada bem como os

operadores. Em resumo, a aprovação tem como principal objetivo certificar-se que os intervalos definidos no plano são adequados tanto para reduzir a probabilidade de uma falha crítica, como para monitorar a degradação de um sistema crítico visando a otimizar recursos.

A justificação dos intervalos deve ser feita, principalmente, baseada em dados de campo, como por exemplo os registros de falhas encontradas durante os voos ou manutenções. 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).

### 2.3 Custos de Manutenção

Devido a grande competitividade no mercado os custos de manutenção devem ser analisados para viabilidade da ação de manutenção. Os custos correspondem ao quanto de recurso será aplicado, seja para um reparo, substituição, inspeção ou testes, para reestabelecer ou monitorar a função do sistema. (WIKSTÉN; JOHANSSON, 2006)

A soma dos custos representam o custo total de manutenção durante a vida deste sistema, podendo ser divididos em custos direto de manutenção, que consiste no custo do sobressalente, material, equipe, ferramental etc, e custos indiretos de manutenção, que são custos de gestão, lucro cessante, reputação etc. Os custos indiretos são geralmente muito difíceis de serem mensurados, principalmente no caso de empresas aéreas onde uma falha pode causar uma fatalidade com várias perdas materiais e de imagem, inclusive vidas. O custo total de manutenção é dado pela equação abaixo:

$$CT = \frac{C_p * R(t) + C_c * (1 - R(t))}{\int_0^t R(t)dt} \quad (1)$$

Onde,

CT = Custo total de manutenção por tempo

C<sub>p</sub> = Custo da manutenção preventiva

C<sub>c</sub> = Custo da manutenção corretiva



$R(t)$  = Função confiabilidade

Com o propósito de se otimizar o intervalo de manutenção, a equação (1) deve ser analisada de maneira que, para uma dada relação dos custos da preventiva pela corretiva, seja tal que o custo total de manutenção seja o menor possível. (RELIAWIKI, 2016)

Dependendo de quão crítica é a falha, a otimização dos intervalos de manutenção tendo em vista somente os custos de manutenção pode não ser eficiente uma vez que os custos indiretos podem ser tão elevados que os intervalos ficam impraticáveis de tão pequenos que são.

Portanto, um plano de manutenção de sucesso deve considerar, além dos custos associados à falha, o risco associado a mesma para determinação de uma tarefa de manutenção efetiva e eficiente e do seu respectivo intervalo.

### Capítulo 3 – Título do capítulo

Uma grande quantidade de dados é coletada diariamente com a evolução da capacidade de processamento e o desenvolvimento de sistemas integrados e redes, o chamado Big-Data. No entanto, somente uma pequena parcela é efetivamente transformada em informação relevante para a tomada de decisão. Para a análise de confiabilidade esses dados são fundamentais, no que tange a predição de vida e manutenibilidade de um component ou Sistema, porém estão estruturados de maneira incorreta, dificultando seu tratamento. (RELIASOFT, 2011).

Existem diversos meios de obter dados de vida de um Sistema, os mais utilizados e conhecidos pelos profissionais do setor são: testes de ciclagem e qualificação, amostras de campo, conhecimento das equips de manutenção, retornos de garantia entre outros. Blischke e Muthy (2003) dividiram as fontes de dados em 13 categorias, a saber: 1) Histórico; 2) Fornecedores; 3) Guias/Manuais; 4) Subjetivos; 5) Amostragem; 6) Testes; 7) Observacional; 8) Produção; 9) Qualidade; 10) Operacional; 11) Ambiental; 12) Garantia; 13) Custo.

Como anteriormente, há grande quantidade de informação disponível para desenvolver uma análise, porém esta informação precisa estar estruturada de maneira que seja possível identificar os sintomas do problema, suas possíveis causas, as ações corretivas executadas, incluindo os itens trocados, o tempo médio para o reparo, alguma observação do time de manutenção, data do evento e uma identificação de rastreamento do Sistema, por exemplo número de série, lote etc. (VACCARO, 1997)

Partindo de um dado estruturado como enunciado é possível, além de uma avaliação de desempenho do Sistema por meio de KPIs, como por exemplo MTBF e disponibilidade, identificar áreas de melhoria do Sistema, seja com uma ação de manutenção, projeto ou manufatura, e com isso trazer informações para futuros projetos iniciando assim um ciclo de melhoria continua e redução de custos.

A análise de dados de vida é feita sob a ótica da estatística inferencial, na qual utilizando-se de dados passados faz-se previsões ou inferências sobre o futuro por meio de modelos probabilísticos. Alguns dos modelos probabilísticos e funções estatísticas utilizadas na confiabilidade serão apresentados a seguir.

### 3.1 Confiabilidade

Confiabilidade pode ser entendida como “a probabilidade de um produto operar por um período específico de tempo sob as condições de operação ao qual foi projetado sem falhas” ( ELSAYED, 2012).

Para o entendimento do conceito de confiabilidade é necessário definir o conceito de falha. O termo falha é difícil de se definir uma vez que depende de cada caso particular, mas, de maneira geral, pode-se definir falha como incapacidade de um item desempenhar a função requerida (CARAZAS, 2011; NBR 5462).

#### 3.1.1 Função densidade de probabilidade

Seja  $X$  uma variável aleatória contínua, a função densidade de probabilidade de  $X$  (1),  $f(x)$ , é uma função  $f(x)$ , tal que para dois números reais  $a$  e  $b$ , com  $a \leq b$ , tem-se:

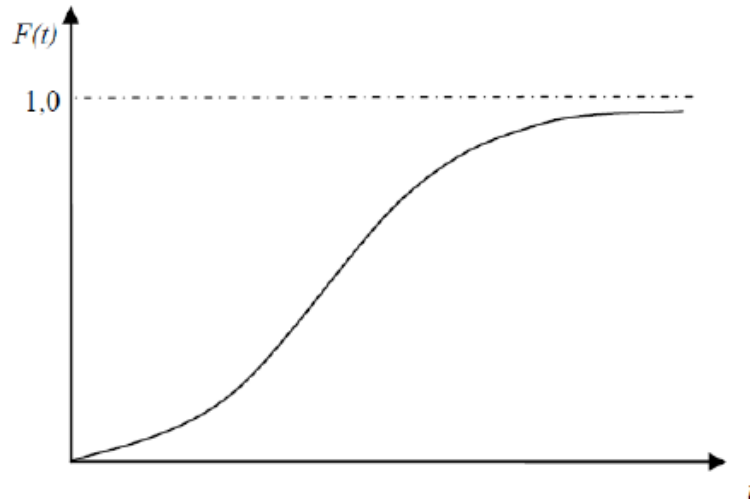
$$P(a < x \leq b) = \int_a^b f(x)dx \quad (2)$$

#### 3.1.2 Função de probabilidade acumulada

A função de probabilidade acumulada ou distribuição acumulada (2),  $F(x)$ , é uma função  $F(x)$  de uma variável aleatória  $X$ , definida para um número real  $x$  por:

$$F(x) = P(X \leq x) = \int_{-\infty}^x f(x)dx \quad (3)$$

A figura abaixo representa o gráfico da função distribuição acumulada.



**Figura 2: Função densidade de probabilidade.**  
**Fonte: LEITCH, 1995**

Como o objeto de estudo na confiabilidade é a falha, a função de probabilidade acumulada representa a probabilidade de um item estar falhado em um determinado tempo.

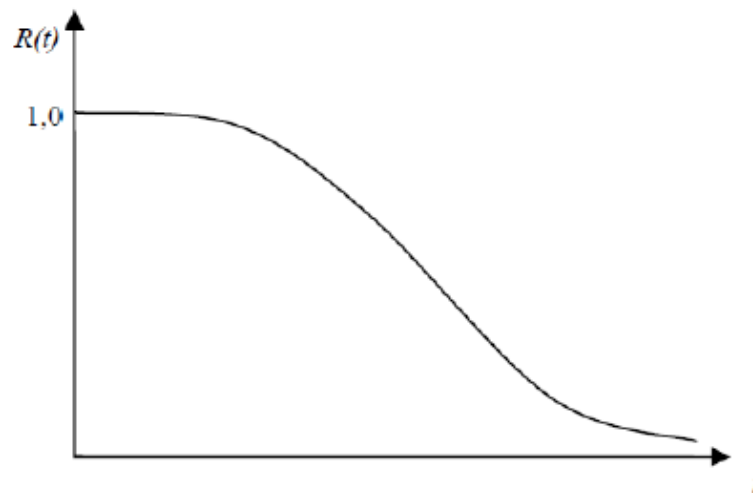
### 3.1.3 Função confiabilidade – $R(t)$

Confiabilidade é definida como a probabilidade de um item desempenhar uma função requerida sob condições específicas, durante um dado intervalo de tempo. Também conhecida como “taxa de êxito”.

Dá ótica da operação de um componente, ou ele está operando normalmente conforme o especificado ou está no estado de falha. Portanto, por serem eventos mutuamente excludentes, a confiabilidade pode ser expressa matematicamente pela seguinte equação (3):

$$R(t) = 1 - F(t) \quad (4)$$

A figura abaixo apresenta uma representação da função confiabilidade no tempo.



**Figura 3: Função confiabilidade.**  
**Fonte: LEITCH, 1995**

As expressões matemáticas que definem a função confiabilidade dependem diretamente do tipo de distribuição estatística a que os tempos para falha estejam associados. Assim, podem existir funções de confiabilidade que se enquadram como distribuições exponenciais, normais, Weibull etc.

### 3.1.4 Taxa de falha – $\lambda(t)$

Taxa de falha é definida como o limite, se existir, da razão da probabilidade condicional de um item estar no estado de falha em um determinado intervalo de tempo, dado que no instante anterior estava disponível, quando  $\Delta t$  tende a zero.

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P[t < T < (t + \Delta t) | T > t]}{\Delta t} = \frac{F(t + \Delta t) - F(t)}{R(t)} \cdot \frac{1}{\Delta t} = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (5)$$

Onde,

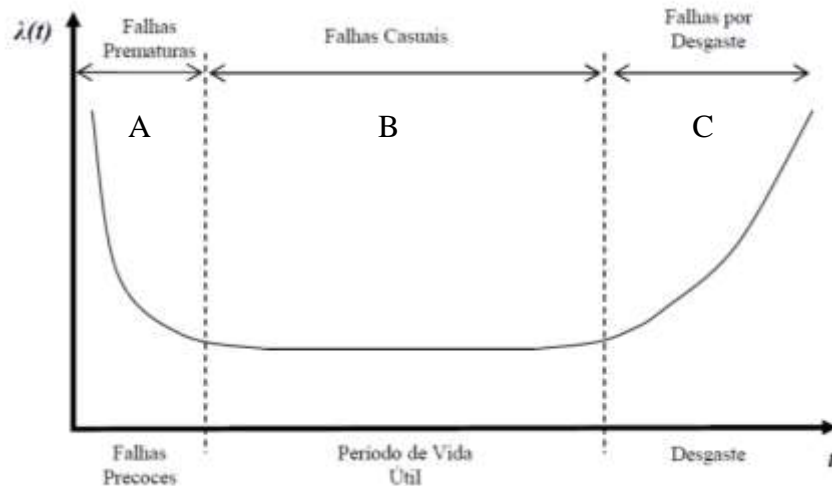
$t$  = variável aleatória de interesse

$F(t)$  = função de distribuição acumulada para o instante  $t$

$R(t)$  = função de confiabilidade para o instante  $t$

$f(t)$  = função densidade de probabilidade para o instante  $t$

A taxa de falha como função do tempo é um indicador das causas de falha. A figura abaixo mostra o comportamento da taxa de falha de um componente ou sistema, sem redundância, em função do tempo, também conhecida como curva da banheira.



**Figura 4: Curva da banheira.**  
**Fonte: Adaptado de LAFRAIA, 2001**

A primeira região da curva da banheira, região A, com taxas de falha decrescente com o tempo indica que o componente/sistema está falhando prematuramente, denominadas falhas precoces. As falhas nesse período indicam problemas associados à montagem, fabricação ou seleção de materiais.

A região intermediária, indicada por B, com taxa de falhas aproximadamente constante no tempo indica que o componente/sistema apresenta falhas aleatórias. Esse comportamento é observado durante o período de vida útil do item.

A última região, região C, com taxa de falha crescente com o tempo indica que o item apresenta falhas por desgaste. Nessa região as principais causas de falha estão associadas à fenômenos físicos, tais como: fadiga, corrosão, atrito etc.

### 3.1.5 Vida média – $\bar{T}$

Vida média representa o tempo médio em que um componente ou sistema opera antes de falhar. Para sistemas reparáveis a vida média refere-se ao tempo médio entre falhas, do inglês “mean time between failure” (MTBF), ou seja, o tempo médio entre falhas

consecutivas. Quando o sistema é não-reparável, esse conceito é entendido como tempo médio até a falha, do inglês “mean time to failure” (MTTF).

Estatisticamente, a vida média é definida pela esperança matemática ou expectativa, dada por:

$$\bar{T} = E(t) = \int_0^{\infty} t * f(t) dt \quad (6)$$

Onde,

$t$  = variável aleatória de interesse

$f(t)$  = função densidade de probabilidade

## 3.2 Distribuições estatísticas

Uma distribuição estatística define uma curva na qual a área sob esta curva representa a probabilidade de ocorrer o evento associado. Existem diversos tipos de distribuições, podendo ser contínuas ou discretas. No entanto, as principais distribuições contínuas utilizadas são: exponencial, normal e a Weibull (HAVIARAS, 2006; VILELA JUNIOR, 2016)

### 3.2.1 Distribuição exponencial

A distribuição exponencial é muito utilizada na engenharia de confiabilidade, pois é ela que melhor representa um componente na sua vida útil, na qual falhas aleatórias ocorrem levando a uma taxa de falha constante. Sistemas complexos, em que muitos modos de falhas ocorrem simultaneamente, tendem a serem bem modelado por essa distribuição.

Matematicamente, podemos definir a função densidade de probabilidade como:

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t} \quad (7)$$

Onde,

$\lambda$  = taxa de falha, constante

t = variável aleatória de interesse

Assim, a função probabilidade acumulada é definida por:

$$F(t) = e^{-\lambda t} \quad (8)$$

Portanto, a função confiabilidade é dada por:

$$R(t) = 1 - e^{-\lambda t} \quad (9)$$

Como apresentado anteriormente, a taxa de falha será constante:

$$\lambda(t) = \lambda = \text{constante} \quad (10)$$

A vida média será dada por:

$$\bar{T} = \frac{1}{\lambda} \quad (11)$$

### 3.2.2 Distribuição normal

A distribuição normal, também conhecida como distribuição de Gauss ou Gaussiana, é a mais conhecida e amplamente utilizada, principalmente na área das ciências biológicas devido ao comportamento dos fenômenos biológicos e naturais poderem ser bem modelados por esta distribuição. No âmbito da análise de falhas, componentes/sistemas que são bem representados por uma distribuição normal, apresentam modos de falha bem característicos e geralmente dependentes do tempo.

Essa distribuição é bem desenvolvida nos livros de estatística, assim como suas variantes como a log-normal, e portanto, suas propriedades são conhecidas.

A função densidade de probabilidade é definida por:



$$f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad (12)$$

Onde,

$\mu$  = média

$\sigma$  = desvio padrão

$t$  = variável aleatória de interesse

A função probabilidade acumulada é definida por:

$$F(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^t e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)^2} dt \quad (13)$$

Dado a função probabilidade acumulada, a função confiabilidade é definida por:

$$R(t) = 1 - \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^t e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)^2} dt \quad (14)$$

A taxa de falha para um distribuição normal é definida por:

$$\lambda(t) = \frac{e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)^2}}{\sigma\sqrt{2\pi} - \int_{-\infty}^t e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)^2} dt} \quad (15)$$

A vida média é dada por:

$$\bar{T} = \mu \quad (16)$$

### 3.2.3 Distribuição Weibull

A distribuição Weibull é a mais versátil de todas as distribuições, podendo se ajustar melhor à vida do componente em estudo devido aos seus parâmetros.

Uma distribuição Weibull é definida pelos parâmetros de escala ( $\beta$ ), a vida característica ou parâmetro de forma ( $\eta$ ) e o parâmetro de deslocamento ( $\gamma$ ), e as funções estatísticas são definidas a seguir.

Função densidade de probabilidade:

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left( \frac{t - \gamma}{\eta} \right)^{\beta-1} e^{-\left( \frac{t - \gamma}{\eta} \right)^\beta} \quad (17)$$

Função probabilidade acumulada:

$$F(t) = 1 - e^{-\left( \frac{t - \gamma}{\eta} \right)^\beta} \quad (18)$$

Função confiabilidade:

$$R(t) = e^{-\left( \frac{t - \gamma}{\eta} \right)^\beta} \quad (19)$$

Taxa de falha:

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\eta} \left( \frac{t - \gamma}{\eta} \right)^{\beta-1} \quad (20)$$

Vida média:

$$\bar{T} = \eta \Gamma \left( 1 + \frac{1}{\beta} \right) \quad (21)$$

Onde,

$\Gamma$  = função gama

O parâmetro de forma, ou vida característica, tem um efeito no alongamento ou estreitamento da distribuição. Fixando-se o parâmetro de escala, para valores maiores de  $\eta$  tem-se uma distribuição mais longa, e para valores menores de  $\eta$  tem-se uma distribuição

mais estreita. Sua unidade é a mesma da variável aleatória de interesse e fisicamente representa o tempo em que 63,2% dos itens terão falhados.

O parâmetro de deslocamento localiza o início da distribuição, ou seja, antes de  $\gamma$  não há uma probabilidade associada. Sua unidade é a mesma da variável aleatória de interesse e fisicamente representa um período “livre” de falhas.

O parâmetro de forma define onde a distribuição irá se comportar. Dependendo do seu valor as equações das funções estatísticas se reduzem para outras distribuições, isso mostra a sua grande versatilidade.

Para  $\beta = 1$ , as funções estatísticas se reduzem para o caso exponencial. Nesse caso a taxa de falha é constante e igual ao inverso do parâmetro de escala,  $\eta$ .

Para  $0 < \beta \leq 1$ , a função densidade de probabilidade decresce com o aumento do tempo tendendo assintoticamente a zero para tempos muito longos. Nesse caso, temos um comportamento claro de falhas prematuras.

Para  $\beta > 1$ , a função densidade de probabilidade cresce até certo valor, a chamada moda, e posteriormente decresce, lembrando uma curva tipo “sino”. Para este caso de  $\beta$  existem algumas peculiaridades, a saber: para  $1 < \beta < 2,6$  a distribuição apresenta um cauda para a direita; para  $2,6 < \beta < 3,7$  a distribuição é simétrica, tornando semelhante a uma distribuição normal; e para  $\beta > 3,7$  a distribuição apresenta uma cauda a esquerda. (RELIASOFT, 2016)

## Capítulo 4 – Título do capítulo

O objeto de estudo apresentado representa um dos vários estudos de campo realizados em uma empresa do setor Aeronáutico, na qual a aplicação dos conceitos da análise de dados de vida permitiu determinar e melhorar o intervalo de manutenção de uma tarefa agendada para uma aeronave comercial. O presente estudo foi desenvolvido com o auxílio do *software PTC Windchill® Quality Solutions* facilitando o processo matemático e estatístico necessário para o atingir o objetivo proposto.

### 4.1 Análise de Confiabilidade do Componente

Este trabalho propõe-se a analisar a aplicação de modelos probabilísticos quantitativos à sistemática da manutenção centrada na confiabilidade pela aplicação da análise de dados de vida para determinação um intervalo de manutenção ao componente minimizando possíveis erros decorrentes da experiência do analista e otimizando os custos da tarefa.

O componente objeto de estudo é parte de um sistema de segurança de cabine e, portanto, seu funcionamento tem relação direta com a segurança em voo. Ele é instalado todas as aeronaves comerciais que estão em atividade hoje em dia. No entanto, para o trabalho foi analisado em uma aeronave comercial de médio porte e alta *performance* desenvolvida em meados dos anos 1990. Atualmente existem mais de 800 aeronaves desse modelo voando com abrangência mundial e mais de 20 milhões de horas voadas. Por termos de confidencialidade, o nome do sistema e da aeronave não serão divulgados.

Como o componente já vem sendo usado a algum tempo, já existe uma tarefa agendada no plano de manutenção da aeronave. A saber, é um teste funcional para uma falha não evidente e que afeta a segurança, segundo a metodologia da manutenção centrada na confiabilidade categorizada como CAT 8, realizada a cada 4000FH<sup>1</sup>. Esse intervalo apresenta um descasamento com as paradas agendadas da aeronave para manutenção (*letter-checks*), o que causa um aumento dos custos de manutenção uma vez que o operador precisa parar a aeronave para realizar apenas esta tarefa.

---

<sup>1</sup> *Flight hour*, em tradução livre horas de voo.

Devido à categoria da falha funcional não é possível simplesmente deslocar a tarefa de manutenção para o intervalo de parada mais próximo, neste caso 5000 FH. Ou seja, é necessário um estudo mais detalhado seguindo normas para garantir a qualidade dos dados e utilizando de ferramentas quantitativas de análise de dados de vida com o intuito de determinar o intervalo da tarefa deste componente, e isto será o objetivo deste trabalho. Para falhas funcionais de categoria 8, as normas publicadas pelas autoridades aeronáuticas (*Issue Paper 044*) exigem que a amostra tenha representatividade geográfica e quantidade de tarefas realizadas; e que a análise estatística tenha confiabilidade mínima de 90% com intervalo de confiança de 95%.

Para efeitos de representatividade da amostra, foi analisado dados de campo no período de Abril de 1998 à Janeiro de 2016, com pouco mais de 890 aeronaves acumulando mais de 25 milhões de horas. Dados da tarefa foram obtidos dos operadores, totalizando 77 aeronaves e 374 tarefas de manutenção executadas de Setembro de 2010 à Outubro de 2015, das quais em 4 tarefas o componente estava falhado. Um cruzamento de informações foi feito com o propósito de evitar duplicidade de informação. Pelas normas publicadas o requisito amostral mínimo é de 216 tarefas executadas para ser considerado representativo, na qual foi atingido.

Uma vez que a amostra analisada é representativa da população de aeronaves foi possível iniciar a análise estatística do intervalo de manutenção.

Como os dados coletados foram a partir de 2010 e grande parte das aeronaves já estavam em atividade nesta data e continuam voando após 2015 foi utilizado de dados suspensos para organizar a amostra. Os dados foram agrupados para facilitar a estruturação. A Figura 5 mostra como os dados foram organizados no programa, dada a quantidade de tarefas somente parte dos dados foram apresentados. Foi utilizado o método de estimação de MLE (*maximum likelihood estimation*) com ranking mediano, como mostrado na Figura 6.

Após feita a limpeza dos dados e a sua estruturação, utilizou-se de uma ferramenta no *software* para verificar a aderência dos dados em diversas distribuições estatísticas escolhidas. A distribuição log-normal foi a que mais representa os dados, no entanto pode-se observar que a distribuição Weibull 2 parâmetros adere muito bem ao conjunto de dados também, com verossimilhança (*Log Likelihood*) bem próxima a da log-normal, mostrados na Figura 7. Portanto, a distribuição Weibull 2 parâmetros foi escolhida.

Weibull Data Points			
	Last Inspected	Time to Failure/Suspension	Failure/Suspension
1	0.000000	4936.000000	Failure
2	1098.560000	1098.560000	Suspension
3	1242.340000	1242.340000	Suspension
4	1606.630000	1606.630000	Suspension
5	1629.500000	1629.500000	Suspension
6	1738.300000	1738.300000	Suspension
7	2363.000000	2363.000000	Suspension
8	2518.000000	2518.000000	Suspension
9	2848.000000	2848.000000	Suspension
10	3187.000000	3187.000000	Suspension
11	3387.000000	3387.000000	Suspension
12	3387.000000	5873.000000	Failure
13	3668.000000	3668.000000	Suspension
14	3685.000000	3685.000000	Suspension
15	3715.000000	3715.000000	Suspension
16	3716.000000	3716.000000	Suspension
17	3727.000000	3727.000000	Suspension
18	3759.000000	3759.000000	Suspension
19	3759.000000	3759.000000	Suspension
20	3761.000000	3761.000000	Suspension

**Figura 5: Dados organizados.**

**Fonte: Autor**

The screenshot shows the 'Weibull Advanced' software window. It contains several configuration options for the estimation method:

- Estimation method:** MLE (selected)
- Median ranking method:** Median (selected)
- Use MMLE
- MMLE type:** RBA Mean (selected)
- Confidence type:** Lower Confidence (selected) with a value of 95.000 %
- Confidence method:** Fisher Matrix (selected)

**Figura 6: Método de estimação escolhido.**

**Fonte: Autor**

	Analyze	Distribution	Rank	LKV
1	<input checked="" type="checkbox"/>	Weibull (2 Parameters)	3	-22.4604
2	<input checked="" type="checkbox"/>	Weibull (3 Parameters)	2	-22.2307
3	<input checked="" type="checkbox"/>	Lognormal	1	-22.1998
4	<input checked="" type="checkbox"/>	Normal	5	-23.2721
5	<input type="checkbox"/>	Gumbel- (Lower)		
6	<input type="checkbox"/>	Gumbel+ (Upper)		
7	<input checked="" type="checkbox"/>	Exponential (1 Parameter)	4	-23.2010
8	<input type="checkbox"/>	Exponential (2 Parameters)		
9	<input type="checkbox"/>	Rayleigh (1 Parameter)		
10	<input type="checkbox"/>	Rayleigh (2 Parameters)		
11	<input type="checkbox"/>	Gamma		
12	<input checked="" type="checkbox"/>	Logistic	6	-23.6262
13	<input type="checkbox"/>	Log-Logistic		

Select All

Clear All

Lognormal	
$\mu$ :	10.814056
$\sigma$ :	1.104404
Log Likelihood:	-22.199753
Weibull (3 Parameters)	
$\beta$ :	1.615159
$\eta$ :	45016.473728
$\gamma$ :	1087.574400
Log Likelihood:	-22.230720
Weibull (2 Parameters)	
$\beta$ :	1.996369
$\eta$ :	36449.113749
Log Likelihood:	-22.460385
Exponential (1 Parameter)	
$\lambda$ :	0.000005
$\eta$ :	205023.452218
Log Likelihood:	-23.201022

**Figura 7: Aderencia das distribuições selecionadas.**

**Fonte: Autor**

Posteriormente, aplicou-se a distribuição Weibull aos dados e obteve-se as curvas de densidade de probabilidade de falha, probabilidade de falha e confiabilidade, apresentados, respectivamente, nas figuras 8, 9 e 10.

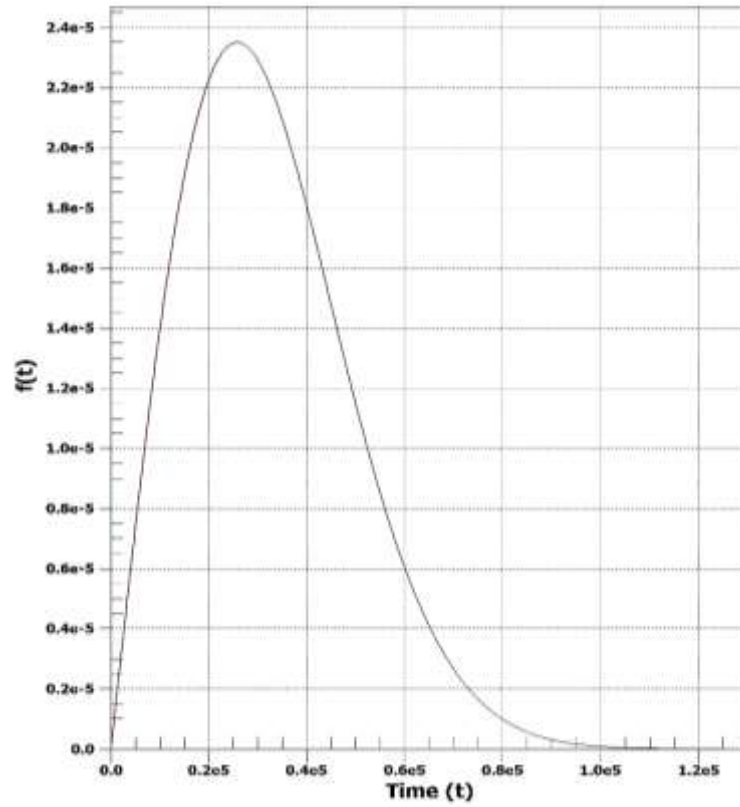


Figura 8: Curva densidade de probabilidade de falha.

Fonte: Autor

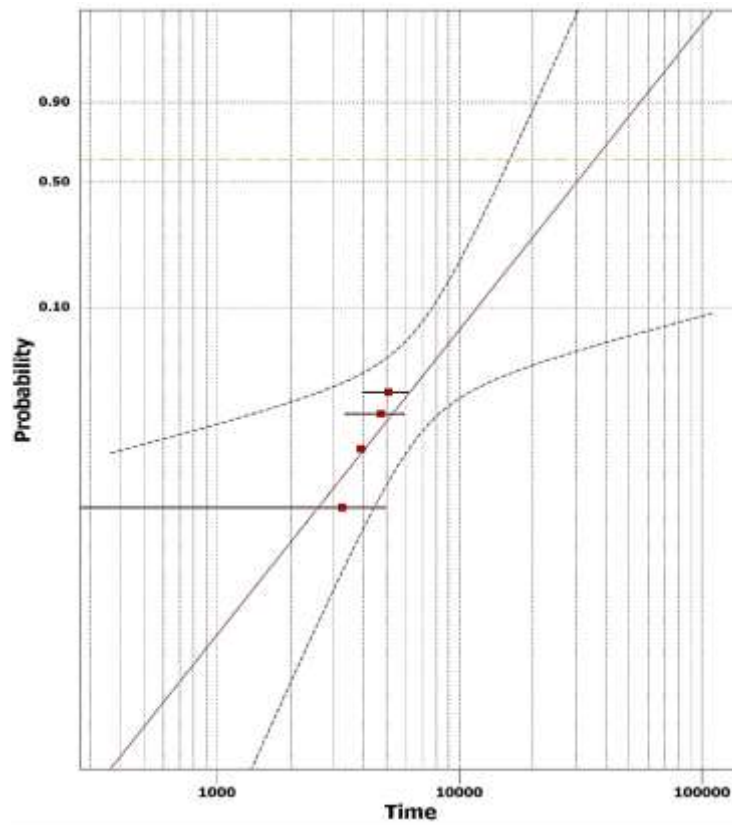
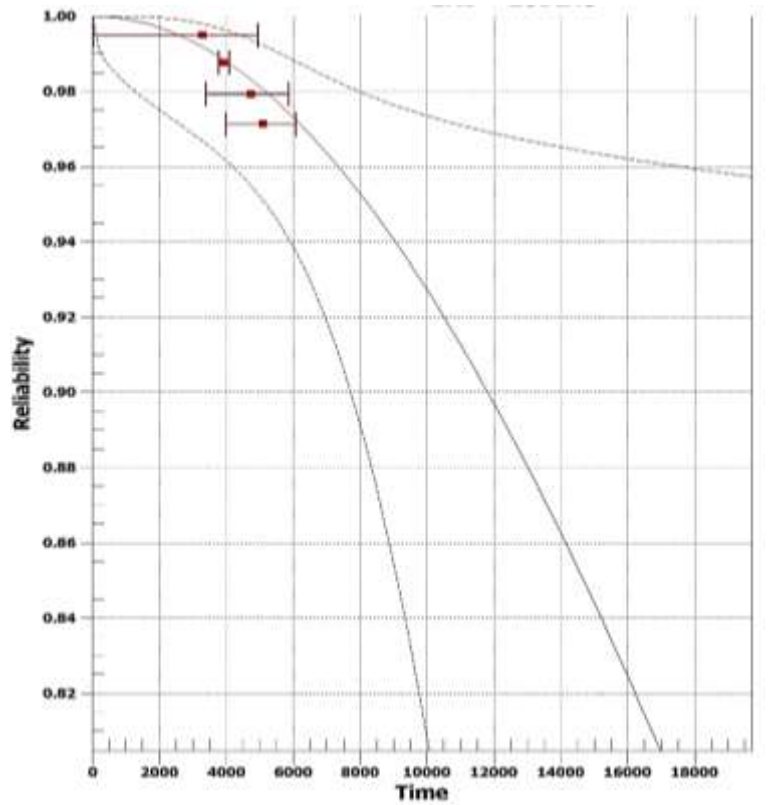


Figura 9: Curva de probabilidade de falha.

Fonte: Autor





**Figura 10: Curva de confiabilidade.**  
**Fonte: Autor**

Os parâmetros resultante da aplicação do modelo foram  $\beta = 1,99$  e  $\eta = 36499,11$ . Portanto, com base nas informações anteriores, pode-se inferir que o componente em estudo é maduro, não apresentando falhas prematuras e envelhecendo com o passar do tempo, característico de  $\beta$  (fator de forma) maior que 1. É possível, então, calcular um intervalo de manutenção que minimize os custos. A vida característica do componente é relativamente alta,  $\eta = 36499$  horas comparado ao tempo de vida útil de uma aeronave, que varia em torno de 10 anos.

A partir de então foi possível determinar qual a confiabilidade para o componente em qualquer tempo e/ou confiabilidade requerida. Utilizando de uma ferramenta no programa para o cálculo da confiabilidade dado um determinado tempo, tem-se que, para 5000 horas, a confiabilidade é de 98% com 95% de confiança. Foi utilizado o intervalo de confiança unilateral inferior, pois o requisito exige uma confiabilidade mínima de 90%.

End time:

Calculate confidence bounds

Confidence level:

Double-sided  
 Single-sided

Confidence method:

Confidence method:

Calculation results			
	Reliability	Probability of Failure	
Value	0.981225	0.018775	
Lower bound	0.952082	0.007289	

**Figura 11: Confiabilidade em 5000h.**  
**Fonte: Autor**

Paralelamente, foi calculado o intervalo de manutenção baseado do ponto de vista estritamente econômico, pela razão dos custos de uma tarefa agendada por uma tarefa não agendada, mostrado na Figura 12 utilizando da equação ( 1 ). Como o componente em estudo tem relação direta com a segurança em voo, uma possível falha acarreta em custos indiretos incalculáveis, e portanto, esta relação de custos foi de 1:10000, ou seja, para uma unidade monetária gasta em uma tarefa agendada gasta-se 10000 para uma não agendada. Entenda-se por tarefa não agendada como uma troca no caso de uma falha, o chamado *run-to-failure*.

O resultado mostra que o intervalo ótimo é da ordem de 320 h, como apresentado na Figura 13. Ou seja, a relação de custos tarefa agendada e tarefa não agendada é mínima para o intervalo de 320 h baseado na razão 1:10000. Esse intervalo é economicamente inviável na prática, dado que o operador deveria parar a aeronave a cada dois meses para executar um único teste.

Replacement objective		Replacement time interval	
<input checked="" type="radio"/> Minimize cost		Minimum:	0.000000
<input type="radio"/> Minimize downtime		Maximum:	646065.408615
Replace based on		Cost of replacement:	
<input checked="" type="radio"/> Failure or age		Planned:	1.000000
<input type="radio"/> Failure or block of time		Unplanned:	10000.000000
Maximum number of failures in replacement interval:			
			5

**Figura 12: Otimização do intervalo de manutenção – dados de entrada.**  
**Fonte: Autor**

```

Optimal replacement within the time interval: 319.834361
Optimal replacement Cost: 0.005576

Cycle length: 319.821834

Replacements per cycle: 1.000000
Planned replacements per cycle: 0.999922
Unplanned replacements per cycle: 0.000078

Replacements per unit of time: 0.003127
Planned replacements per unit of time: 0.003126
Unplanned replacements per unit of time: 0.000000

'Cost' of planned replacements per cycle: 0.999922
'Cost' of unplanned replacements per cycle: 0.783299

```

**Figura 13: Otimização do intervalo – resultado.**  
**Fonte: Autor**

O intervalo de manutenção foi baseado na confiabilidade do componente e não na minimização dos custos de manutenção, pois, apesar da relação entre custo de tarefa agendada e não agendada ser o menor em 320 h, na prática esse intervalo é inviável dado que seria necessário parar o avião com muito mais frequência para se executar uma tarefa. Outro porém é que o componente será utilizado somente no caso de um evento considerado extremamente improvável de se acontecer, ou seja, a sua probabilidade de ocorrência é menor que  $1 \times 10^{-9}$ . Sendo assim, realizar a tarefa a cada 5000 h é mais viável do que considerar somente os custos de manutenção.

Portanto, baseado nas observações e cálculos acima foi possível determinar o intervalo de manutenção no componente a cada 5000h, com 95% de confiança.

## Capítulo 5 – Resultados e conclusões

O trabalho buscou utilizar de ferramentas de análise quantitativa de dados para determinar o intervalo de manutenção de uma tarefa agendada do plano de manutenção de uma aeronave comercial, minimizando possíveis erros advindos do julgamento tendencioso do especialista. Teve-se como objeto de estudo um teste funcional para uma falha de categoria 8 no plano de manutenção de uma aeronave.

Para tal, primeiramente os dados foram estruturados de maneira a poder ser modelados estatisticamente. Vale ressaltar que uma das principais dificuldades encontradas para realizar este trabalho foi na obtenção de dados com informações necessárias para estruturação e posterior modelagem, uma vez que muitas vezes os técnicos de manutenção não dão a atenção devida às informações que precisam ser colocadas no sistema de informação das estações de reparo, dificultando, assim, o entendimento da tarefa de manutenção e principalmente quando ocorreu a falha.

A seguir, utilizou-se da distribuição Weibull de dois parâmetros para modelar os tempos de inspeção e falhas do componente, tendo como resultado o parâmetro de forma  $\beta$  igual a 1,99 e o fator de forma  $\eta$  igual a 36499,11.

A partir destes parâmetros obtidos pela distribuição foi possível determinar o intervalo de manutenção, tendo como resultado o intervalo de manutenção a cada 5000 h obedecendo aos requisitos normativos das autoridades aeronáuticas. Neste tempo, os componentes apresentam confiabilidade de 98% com 95% de confiança.

Esse intervalo calculado é 25% maior do que o intervalo executado anteriormente a 4000 h, gerando uma diminuição dos custos de manutenção uma vez que pode coincidir com as paradas programadas. O cálculo do retorno financeiro com a otimização do intervalo não foi possível ser feita, mas pode-se entender, por razões que não fogem dos padrões da normalidade, que houve uma economia significativa para um operador que tem em sua frota ao menos 10 aeronaves.

É interessante observar que dependendo do impacto da falha funcional do componente uma análise puramente econômica de custos de manutenção não necessariamente retorna o melhor resultado financeiro como foi exposto no presente estudo, onde considerando a relação de custo de manutenção o intervalo proposto seria de 320 h. Entretanto, uma análise

mais detalhada das paradas agendadas, da confiabilidade do componente e de sua aplicação pode efetivamente melhorar os custos de manutenção.

Conclui-se, portanto, que a utilização da modelagem matemática e estatística de dados de vida mostrou-se muito útil e de extrema importância para a tomada de decisão. Tal estudo é fundamental para complementar uma análise de manutenção centrada na confiabilidade eliminando possíveis tendências trazidas de experiências do especialista, levando a análise para um patamar quantitativo e fundamentado em evidências numéricas obtidas do campo com ganhos efetivos em custos de manutenção.

## **5.1 Trabalhos futuros**

Os estudos de realizados no componente pode ser expandido para outros componentes e sistemas instalados na aeronave melhorando os intervalos de manutenção da mesma. Tendo em vista a complexidade dos sistemas aeronáuticos e suas aplicações alguns trabalhos futuros podem ser citados:

- Desenvolver diagrama de blocos a fim incluir na análise do tempo de manutenção a probabilidade de ocorrência do evento externo que ativa o funcionamento do componente.
- Realizar uma simulação de Monte Carlo para o diagrama de blocos do sistema a fim de otimizar o intervalo de manutenção.

## Bibliografia

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5462**: Confiabilidade e manutenibilidade. Rio de Janeiro: Abnt, 1994.

BERGAMO FILHO, Valentino. **Confiabilidade: Básica E Prática**. São Paulo: Edgard Blucher, 1997. 108 p.

CARAZAS, F. J. **Decisões baseadas em risco – método aplicado na indústria de geração de energia elétrica para a seleção de equipamentos críticos e políticas de manutenção**. 2011. 218p. Tese (Doutorado), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

D'ADDIO, G. F.; FIRPO, P.; SAVIO, S. Reliability centered maintenance: A solution to optimize mass transit system cost effectiveness. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON DEVELOPMENTS IN MASS TRANSIT SYSTEMS, n. 543, 1998, IEE, 1998. p.211-216.

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

HAUGE, B. S. Optimizing intervals for inspection and failure-finding tasks. In: ANNUAL RELIABILITY AND MAINTAINABILITY SYMPOSIUM, 2001, IEEE. **Proceedings**: IEEE, 2002. p.14-19.

HAUGE, B. S.; JOHNSTON, D. C. Reliability centered maintenance and risk assessment. In: ANNUAL RELIABILITY AND MAINTAINABILITY SYMPOSIUM, 2001, IEEE. **Proceedings**: IEEE, 2001. p.36-40.

HAVIARAS, G. J. **Metodologia para análise de pneus radiais em frotas de caminhões de longa distância**. 2005. 113p. Dissertação (Mestrado Profissionalizante) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

LAFRAIA, J. R. **Manual de Confiabilidade, Manutenibilidade e Disponibilidade**. Rio de Janeiro: Qualitymark. 2001.

LEITCH, R. **Reliability Analysis for Engineering**. New York: Oxford Press. 1995

MORE: Mecanismo online para referências, versão 2.0. Florianópolis: UFSC Rexlab, 2013.

Disponível em: < <http://www.more.ufsc.br/> > . Acesso em: 23 ago. 2016.

MOUBRAY, John. **Manutenção Centrada na Confiabilidade**. 2. ed. Lutterworth, Inglaterra: Aladon Ltd, 2000. Tradução de: Kleber Siqueira.

NOWLAN, F. Stanley; HEAP, Howard F. **Reliability-Centered Maintenance**. San Francisco, California: Dod, 1978.

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: 24 ago. 2016.

RELIABILITY EDGE, 11., 2011, Tucson. **Asset Performance Management Supported By Reliability Engineering**: Reliasoft Corporation., 2011. 24 p. Disponível em: <[http://www.reliasoft.com/pubs/reliabilityedge\\_v11i1.pdf](http://www.reliasoft.com/pubs/reliabilityedge_v11i1.pdf)>. Acesso em: 24 ago. 2016.

RELIASOFT. **The Weibull Distribution**. Disponível em: <[http://reliawiki.org/index.php/The\\_Weibull\\_Distribution](http://reliawiki.org/index.php/The_Weibull_Distribution)>. Acesso em: 24 ago. 2016.

RELIAWIKI. Maintenance Planning. Tucson, AZ, 2016. Disponível em: . Acesso em 24 ago. 2016.

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

TCCA (Europe). Easa. **IP044 MRB Check Interval Escalations**. 2001. Disponível em: <<https://www.easa.europa.eu/document-library/imrbpb-issue-papers>>. Acesso em: 24 ago. 2016.

VILELA JUNIOR, Prof. Dr. Guanis de Barros. **Estatística: Tipos de Distribuição**. Disponível em: <[http://www.cpaqv.org/estatistica/tipos\\_distribuicao.pdf](http://www.cpaqv.org/estatistica/tipos_distribuicao.pdf)>. Acesso em: 23 ago. 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.