

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

JOSÉ GUILHERME DE CARVALHO

**SUBSTITUIÇÃO PREVENTIVA DOS MANCAIS DE UNIDADE DE
BOMBEIO MECÂNICO BASEADO EM ANÁLISE DE DADOS DE
VIDA**

MONOGRAFIA DE ESPECIALIZAÇÃO

CURITIBA

2016

JOSÉ GUILHERME DE CARVALHO

**SUBSTITUIÇÃO PREVENTIVA DOS MANCAIS DE UNIDADE DE
BOMBEIO MECÂNICO BASEADO EM ANÁLISE DE DADOS DE
VIDA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentada como requisito parcial à obtenção de título de Especialista em Engenharia de Confiabilidade, do Departamento de Eletrotécnica, da Universidade Tecnológica federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Henrique Mariano

CURITIBA

2016



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Curitiba

Diretoria de Pesquisa e Pós Graduação - DIRPPG
Especialização em Engenharia de Confiabilidade



TERMO DE APROVAÇÃO

SUBSTITUIÇÃO PREVENTIVA DOS MANCAIS DE UNIDADE DE BOMBEIO MECÂNICO BASEADO EM ANÁLISE DE DADOS DE VIDA

por

JOSÉ GUILHERME DE CARVALHO

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. Carlos Henrique Mariano Dr.
UTFPR

Prof. Emerson Rigoni, Dr. Eng.
UTFPR

Prof. Marcelo Rodrigues Dr.
UTFPR

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

AGRADECIMENTOS

Á DEUS
pela vida, paz e tranquilidade em todos os momentos da minha vida

AOS MEUS PAIS
pela minha vida e formação

A MINHA ESPOSA ELAINE,
pelo carinho e compreensão

AO MEU FILHO RAFAEL,
que tanto sofreu com a minha ausência durante o curso

AOS PROFESSORES
pelo conhecimento que nos transmitiram e pelo apoio prestado.

AOS COLEGAS DE SALA,
pelo companheirismo.

AOS COLEGAS DA PETROBRAS,
pelas constantes revisões e discussões colaborativas.

Enfim, a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a obtenção deste título.

RESUMO

CARVALHO, José Guilherme. **SUBSTITUIÇÃO PREVENTIVA DOS MANCAIS DE UNIDADE DE BOMBEIO BASEADA EM ANÁLISE DE DADOS DE VIDA**. 2016. 50 f. Monografia do Curso de Especialização em Engenharia de Confiabilidade – Departamento de Eletrotécnica - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2016.

A manutenção na indústria em geral vem sofrendo inúmeras modificações principalmente devido ao aumento do número e complexidade dos ativos físicos (equipamentos e instalações), surgimento de novas técnicas de manutenção, mudanças de paradigma sobre a organização e as responsabilidades da manutenção. A manutenção também está reagindo à uma crescente conscientização do quanto a falha de um equipamento afeta a segurança e o meio ambiente, além da maior pressão para se atingir alta disponibilidade das instalações e da crescente necessidade de redução de custos. Tradicionalmente, os engenheiros de manutenção lidam com problemas de manutenção sem buscar operar numa maneira ótima; por exemplo, muitos planos de manutenção são colocados em operação com apenas uma pequena, se alguma, abordagem quantitativa para a sua definição. Neste sentido, neste trabalho foi aplicada a Análise Quantitativa de Dados de Vida para se estabelecer a função de confiabilidade e determinar o tempo ótimo de substituição preventiva dos mancais propulsores de Unidades de Bombeio Mecânico (equipamentos utilizados em poços de produção de petróleo terrestres). Após comparar os custos globais e probabilidades de falha para diferentes periodicidades de substituição preventiva, verificou-se que a periodicidade de substituição preventiva utilizada atualmente não correspondia ao tempo ótimo de substituição e que este tempo poderia ser estendido, obtendo-se uma considerável redução dos custos de manutenção, sem comprometer a integridade do equipamento.

Palavras Chave: Manutenção. Análise de Dados de Vida. Confiabilidade. Análise Quantitativa.

ABSTRACT

CARVALHO, José Guilherme. **PREVENTIVE REPLACEMENT OF CRANK PIN ON SUCKER ROD PUMPS BASED ON LIFE DATA ANALYSIS**. 2016. 50 f. Monografia do Curso de Especialização em Engenharia de Confiabilidade – Departamento de Eletrotécnica - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2016.

The maintenance in the industry in general has undergone numerous changes mainly due to the increased number and complexity of physical assets (equipment and facilities), appearance of new maintenance techniques, paradigm shifts on the organization and responsibilities of maintenance. Maintenance is also responding to a growing awareness of how the failure of equipment affects the safety and the environment, as well as greater pressure to achieve high availability of facilities and the growing need for cost reduction. Traditionally, maintenance engineers deal with maintenance problems without seeking to operate in optimized way; For example, many service plans are put into operation with only a small, if any quantitative approach to its definition. In this sense, this work was applied Life Data Quantitative Analysis to establish the reliability function and determine the optimal time for preventive replacement of Crank Pin on Sucker Rod Pumps (equipment used in on-shore oil production wells). After comparing the overall costs and probabilities of failure for different periodicities of preventive substitution, it was verified that the periodicity of preventive substitution used today did not correspond to the optimal time of substitution and that this time could be extended, obtaining a considerable reduction of the costs, without compromising the integrity of the equipment.

Keywords: maintenance, Life Data Analysis, reliability, Quantitative Analysis

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1– Distribuição de Unidades de Bombeio por Fabricante e Tamanho API.....	12
Figura 2 - Componentes da Unidade de Bombeio.	13
Figura 3 – Componentes do Mancal Propulsor da Unidade de Bombeio Mecânico.....	14
Figura 4 - Curva da Banheira idealizada.	20
Figura 5 - Exemplo de dados completos.	24
Figura 6 – Exemplo de dados censurados à direita.	25
Figura 7 - Exemplo de dados censurados em intervalo.	25
Figura 8 - Exemplo de dados censurados à esquerda.	26
Figura 9 – Distribuições de Weibull para diferentes valores de β	28
Figura 10 - Taxa de falha de Weibull para $0<\beta<1$, $\beta=1$ e $\beta>1$	28
Figura 11 - Distribuição Exponencial.....	30
Figura 12 - Distribuição Normal.....	31
Figura 13 – Distribuição Lognormal.....	32
Figura 14 – Limite de confiança bilateral.....	33
Figura 15 – Limite de Confiança unilateral inferior e superior	33
Figura 16 – Curvas de custos por unidade de tempo para substituição preventiva e corretiva.....	35
Figura 17 – Probabilidades de Falha (Limite de Confiança Bilateral de 95%).....	41
Figura 18 – Gráfico da Probabilidade de Falha versus tempo.	42
Figura 19– Gráfico da Função Densidade de Probabilidades (pdf) versus Tempo.	42
Figura 20– Gráfico da Taxa de Falha versus Tempo	44
Figura 21 – Tempo ótimo para substituição preventiva com relação a custo.....	46
Figura 22 – Comparação entre os custos para substituição em 2, 3 e 4 anos.....	47

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dados completos de tempos até a falha da amostra.....	40
Tabela 2 – Probabilidades de Falha de Mancais Propulsores (Limite de Confiança de 95%)	43
Tabela 3 - Avaliação da Economia Anual e Risco Estimado	47

LISTA DE FOTOGRAFIAS

Fotografia 1 - Unidade de Bombeio Mecânico na produção de petróleo em terra	12
Fotografia 2 - Exemplo de desprendimento do mancal propulsor.	15
Fotografia 3 – Referências para classificação da contaminação da graxa em C1, C2 e C3	39

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	FORMULAÇÃO DO PROBLEMA	15
1.2	JUSTIFICATIVA	16
1.3	OBJETIVOS	16
1.3.1	Objetivo Geral	16
1.3.2	Objetivos Específicos	16
1.4	METODOLOGIA	17
1.5	ESTRUTURA DO TRABALHO	17
2	REFERENCIAL TEÓRICO	19
2.1	ENGENHARIA DE CONFIABILIDADE	19
2.2	TAXAS DE FALHAS E TIPOS DE FALHAS	20
2.3	ANÁLISE DE DADOS DE VIDA (LDA)	21
2.4	CLASSIFICAÇÃO DOS DADOS DE VIDA	23
2.4.1	Dados Completos	23
2.4.2	Dados Censurados	24
2.5	DISTRIBUIÇÕES DE DADOS DE VIDA	26
2.5.1	Distribuição de Weibull	27
2.5.2	Distribuição Exponencial	29
2.5.3	Distribuição Normal	30
2.5.4	Distribuição Lognormal	31
2.6	LIMITES DE CONFIANÇA	32
2.6.1	Limite de Confiança Bilateral	32
2.6.2	Limite de Confiança Unilateral	33
2.7	TEMPO ÓTIMO DE SUBSTITUIÇÃO PREVENTIVA	34
3	ANÁLISE DE CONFIABILIDADE APLICADA	37
3.1	COLETA DOS DADOS	37
3.2	ANÁLISE DOS DADOS	37
3.3	ANÁLISE DA VIDA CARACTERÍSTICA	40
4	TEMPO ÓTIMO DE SUBSTITUIÇÃO PREVENTIVA	44
4.1	COMPARAÇÃO DOS CUSTOS DE MANUTENÇÃO	46
5	CONCLUSÃO	49
	REFERÊNCIAS	51

1 INTRODUÇÃO

O método de elevação mais simples e econômico na produção de petróleo é, sem dúvida, a produção por surgência, a qual requer do reservatório grande quantidade de energia armazenada na forma de pressão. Porém, nem sempre a energia disponível é suficiente para a elevação natural, sendo frequentemente necessária à sua complementação através de métodos de elevação artificial.

Os métodos de elevação artificial tradicionais e mais largamente empregados em poços terrestres são o Bombeamento Mecânico (BM), o Bombeamento de Cavidades Progressivas (BCP), o Bombeamento Centrífugo Submerso (BCS) e o Gás *Lift*.

Dentre estes métodos de elevação artificial, o mais usado no mundo é o Bombeamento Mecânico. Em relação aos outros métodos disponíveis, sua popularidade está associada ao baixo custo de investimento e manutenção, grande flexibilidade de vazão e profundidade, alta eficiência energética e a possibilidade de operação com fluidos de diferentes composições e viscosidades e em larga faixa de temperaturas (NASCIMENTO, 2009).

O sistema de bombeio mecânico é constituído por bomba de fundo, coluna de hastes, coluna de produção, **unidade de bombeio mecânico** e cabeça de poço. A unidade de bombeio mecânico é o equipamento responsável pela conversão do movimento rotativo fornecido por um motor em movimento alternativo da coluna de hastes. A Fotografia 1 apresenta uma vista geral de uma Unidade de Bombeio Mecânico utilizada na produção de petróleo em poços terrestres.



Fotografia 1 - Unidade de Bombeio Mecânico na produção de petróleo em terra

Fonte: Autoria própria

Na Unidade de Operações da empresa analisada existem atualmente 346 poços de produção terrestres que utilizam unidades de bombeio mecânico como método de elevação artificial do petróleo. A Figura 1 apresenta a quantidade de unidades de bombeio mecânico distribuídas pelos principais fabricantes e tamanhos API (American Petroleum Institute).

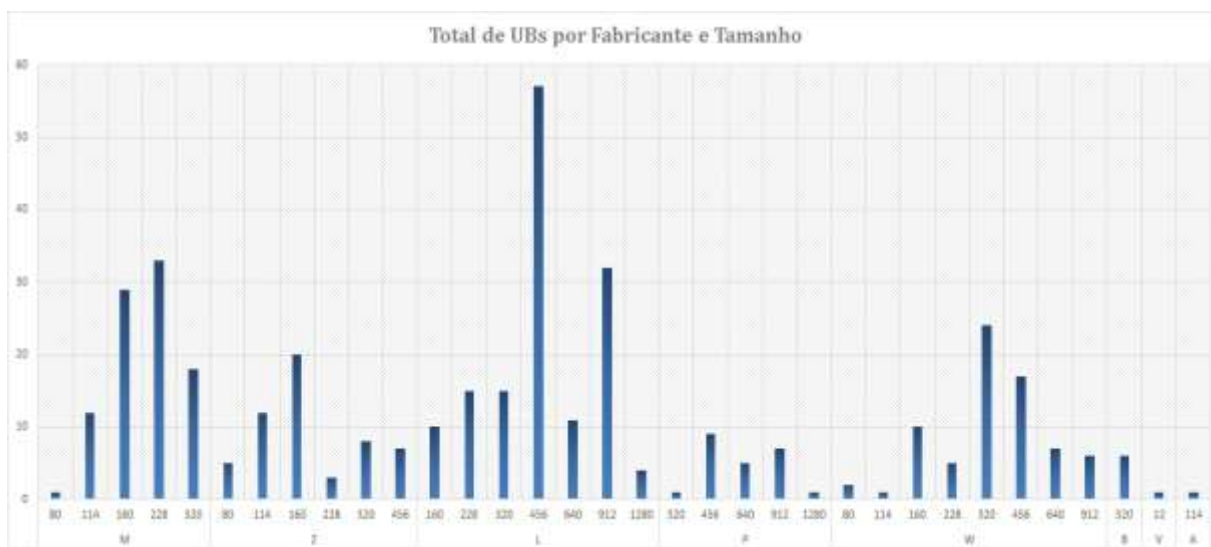


Figura 1– Distribuição de Unidades de Bombeio por Fabricante e Tamanho API

Fonte: Autoria própria

Uma unidade de bombeio mecânico é constituída principalmente pelos componentes mostrados na Figura 2.

O mancal manivela ou propulsor, objeto de estudo neste trabalho, é o componente utilizado para ligação da Manivela na Biela (indicado pela posição 13 na Figura 2), sendo fixado nos furos de curso das manivelas e preso à raquete do braço equalizador através de parafusos de fixação. Este conjunto Manivela-Biela é o responsável pela transformação do movimento rotativo do redutor em movimento alternativo da Viga Principal e Coluna de Hastes.

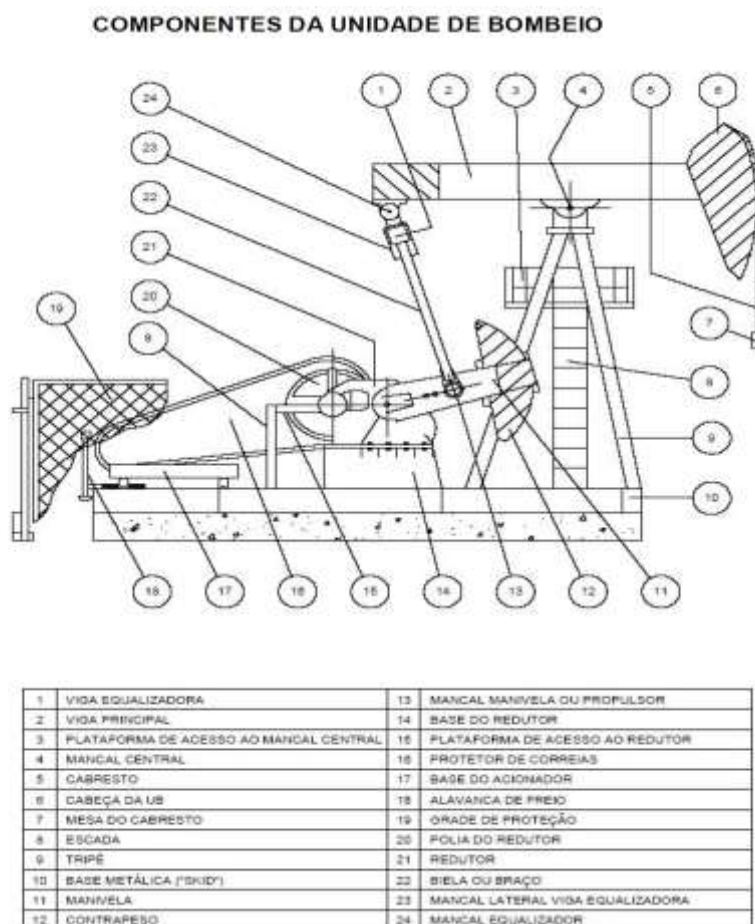


Figura 2 - Componentes da Unidade de Bombeio.
Fonte: Manual de Operação e Manutenção Lufkin.

O mancal propulsor é constituído principalmente por um eixo cônico (4), mancal de rolamento (10) e porca castelo (1), mostrados na Figura 3.

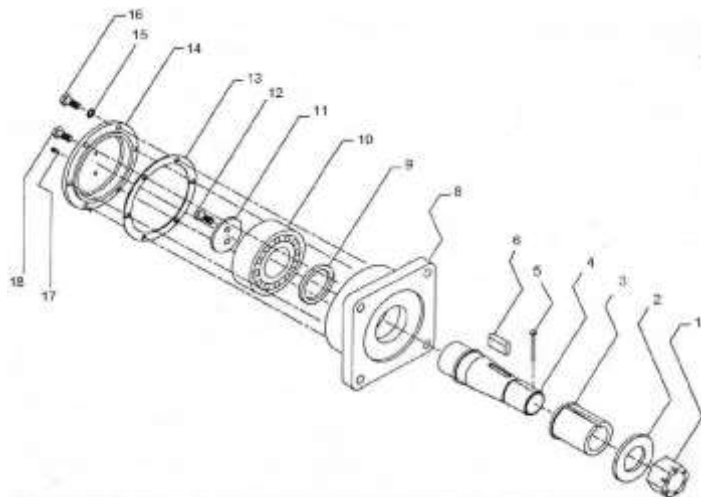


Figura 3 – Componentes do Mancal Propulsor da Unidade de Bombeio Mecânico.
Fonte: Desenho LS Petrochem.

A manutenção preventiva da Unidade de Bombeio Mecânico é essencial para promover uma operação segura, longa vida útil da unidade e evitar falhas onerosas e perda de produção. Durante esta intervenção, muitos itens podem ser verificados por meio de inspeção visual ou através de ruídos anormais. A estratégia de manutenção adotada atualmente para as unidades de bombeio mecânico é composta basicamente pelos seguintes itens:

- Ronda do Operador Diária: Verificação de ruídos anormais e vazamentos;
- Manutenção Preventiva Semestral: Verificação de ruídos anormais, vazamentos, desgaste de componentes, aperto de parafusos, lubrificação dos mancais (com avaliação qualitativa da contaminação por limalha da graxa do mancal), etc.;
- Manutenção Preventiva Bial¹: substituição dos mancais propulsores a cada 2 anos.

Tradicionalmente, os engenheiros de manutenção lidam com problemas de manutenção sem buscar operar numa maneira ótima. Por exemplo, muitos planos de manutenção são colocados em operação com apenas uma pequena, se alguma, abordagem quantitativa para a sua definição. Visto que, a área de manutenção está cheia de incertezas (ex.: incerteza sobre

¹ Tarefa inserida a partir de 2014

quando o equipamento irá falhar) é requerido um conhecimento de probabilidade e estatística para a realização de análises quantitativas de confiabilidade (JARDINE, 1973).

Considerando estes pontos, este trabalho procura introduzir uma análise quantitativa para determinar o período ótimo para substituição preventiva dos mancais propulsores das Unidades de Bombeio Mecânico.

1.1 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

O histórico de falhas das unidades de bombeio mecânico mostra que o desprendimento do mancal propulsor foi a principal causa de falhas graves neste tipo de equipamento. A ocorrência de tais falhas pode ter como consequências perdas materiais consideráveis e possíveis impactos ao meio ambiente. Dessa forma, foi estabelecida a necessidade da substituição preventiva a cada dois anos dos mancais propulsores como uma ação para evitar este tipo de ocorrência. Entretanto, essa periodicidade de substituição foi estabelecida levando em consideração apenas a vida média dos mancais das unidades que falharam no período, sem uma análise estatística completa considerando os dados de vida dos outros equipamentos em operação.



Fotografia 2 - Exemplo de desprendimento do mancal propulsor.
Fonte: Autoria própria

Assim, se torna necessário um estudo quantitativo para avaliar se esta substituição preventiva é uma opção válida e, caso positivo, qual seria o tempo ideal para realizar esta substituição, considerando aspectos relacionados a custo e integridade do equipamento.

1.2 JUSTIFICATIVA

A decisão de inserir uma manutenção preventiva de substituição dos mancais propulsores a cada 2 anos na estratégia de manutenção das unidades de bombeio mecânico aumentou consideravelmente o custo da manutenção preventiva do ativo de produção, sem uma análise de confiabilidade que indicasse que esta seria a periodicidade que traria a melhor relação custo-benefício para o Ativo.

A escolha deste estudo está relacionada a necessidade de redução dos custos de manutenção, principalmente em função da grande redução no preço do petróleo a partir de 2014, que reduziu as margens de lucro de maneira especial em campos maduros de petróleo em terra.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

Assim, o objetivo deste trabalho é estimar o tempo ótimo de substituição preventiva dos mancais propulsores baseado na análise de confiabilidade e custo, procurando assim otimizar os aspectos de integridade e recursos financeiros disponíveis.

1.3.2 Objetivos Específicos

A proposta deste trabalho é introduzir alguns procedimentos quantitativos na melhoria do desempenho da função manutenção. Para isto, será utilizada a Análise Quantitativa de Dados de Vida (LDA) para determinar o tempo ótimo de substituição dos mancais propulsores das Unidades de Bombeio Mecânico, comparando estes resultados com a periodicidade utilizada atualmente. Os objetivos específicos do trabalho são:

- ▶ Revisar a teoria de Análise Quantitativa de Dados de Vida (LDA) e Tempo Ótimo de Substituição Preventiva;
- ▶ Coletar dados de falha dos mancais propulsores para obtenção da curva de confiabilidade;
- ▶ Obter do tempo ótimo de substituição dos mancais propulsores das Unidades de Bombeio Mecânico baseado em dados de vida;
- ▶ Avaliar a relação custos de manutenção x risco.

1.4 METODOLOGIA

A metodologia de pesquisa foi dividida em 4 partes. Inicialmente será revisada a teoria sobre os Tipos de Falhas, Análise de Dados de Vida e Determinação do Tempo ótimo de Substituição Preventiva. Em seguida será realizada a coleta dos dados de vida, a análise dos dados e a elaboração da análise desses dados com o auxílio de um software especialista (Reliasoft Weibull ++). A etapa seguinte compreende a determinação do tempo ótimo para a substituição preventiva dos mancais propulsores. Posteriormente serão analisados os resultados das análises e identificada a estratégia adequada para o problema proposto. Por fim, na última etapa serão expostas as conclusões sobre o trabalho.

1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

A partir do capítulo seguinte, o presente trabalho estará estruturado da seguinte forma:

- Capítulo 2: Referencial teórico sobre Taxa de Falhas, Tipos de Falhas, Análise de Dados de Vida e Determinação do Tempo Ótimo de Substituição Preventiva;
- Capítulo 3: Coleta dos dados e uso da Engenharia de Confiabilidade Aplicada (Análise de Dados de Vida) para

encontrar a curva de vida do componente objeto do estudo (Mancal Propulsor);

- Capítulo 4: Determinação do Tempo Ótimo de Substituição Preventiva, com a aplicação a solução encontrada no Capítulo 3;
- Capítulo 5: Análise dos resultados comparando os custos globais e probabilidades de falha para diferentes periodicidades de substituição preventiva.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo serão abordados os conceitos relacionados a Análise de Dados de Vida, os quais serão utilizados neste estudo para a obtenção da Curva de Vida e determinação do Tempo Ótimo de Substituição Preventiva do Mancal Propulsor da Unidade de Bombeio Mecânico.

2.1 ENGENHARIA DE CONFIABILIDADE

Desde o começo da história, a humanidade tem tentado prever o futuro. Felizmente, os engenheiros atualmente não dependem de uma bola de cristal para prever o futuro de seus produtos. Através do uso da Análise de Dados de Vida, os engenheiros de confiabilidade usam os dados de vida dos produtos para determinar a probabilidade e a capacidade das partes, componentes e sistemas para realizar suas funções requeridas pelos desejados períodos de tempo sem falha, em ambientes especificados (RELIASOFT, Life Data Analysis Reference).

Decisões relacionadas a um problema probabilístico tais como decidir quando realizar uma manutenção preventiva num equipamento sujeito a quebra requer informações sobre quando o equipamento irá atingir o estado de falha. O engenheiro nunca sabe exatamente quando a transição do equipamento de um estado “bom” para “em falha” irá ocorrer, mas usualmente é possível obter informações sobre a probabilidade de ocorrência desta transição em um tempo particular.

Uma avaliação de Engenharia de Confiabilidade é baseada nos resultados de testes de laboratório e/ou dados de desempenho dos produtos no campo. Os dados produzidos por estas fontes são utilizados para medir e melhorar a confiabilidade dos produtos.

Em análise de dados de vida e engenharia de confiabilidade, o resultado da análise sempre é uma estimativa. O valor verdadeiro da probabilidade de falha, a probabilidade de sucesso (confiabilidade), a vida média, os parâmetros de uma distribuição ou qualquer outro parâmetro aplicável nunca é conhecido e quase certamente irá permanecer desconhecido para propósitos práticos. Apenas se o produto não é mais fabricado e todas as

unidades que foram produzidas tenham falhado e todos os dados tenham sido coletados e analisados, podemos reivindicar ter aprendido o valor verdadeiro da confiabilidade do produto. Obviamente, esta não é uma ocorrência comum. Assim, o objetivo da Engenharia de Confiabilidade e Análise de Dados de Vida é estimar acuradamente estes valores verdadeiros (RELIASOFT, Life Data Analysis Reference).

2.2 TAXAS DE FALHAS E TIPOS DE FALHAS

A taxa de falha é a chance de um componente ou sistema falhar na próxima e menor unidade de tempo, dado que o item funcionou até então. A função taxa de falha $\lambda(t)$ é bastante útil para descrever a distribuição de vida de produtos, uma vez que ela descreve a forma em que a taxa de falha muda com o tempo.

Muitos equipamentos possuem a função taxa de falha $\lambda(t)$ como mostrado no padrão conhecido como a Curva da Banheira, apresentado na Figura 4. Note, entretanto, que a figura apresentada representa um formato idealizado da função (RELIASOFT, Life Data Analysis Reference).

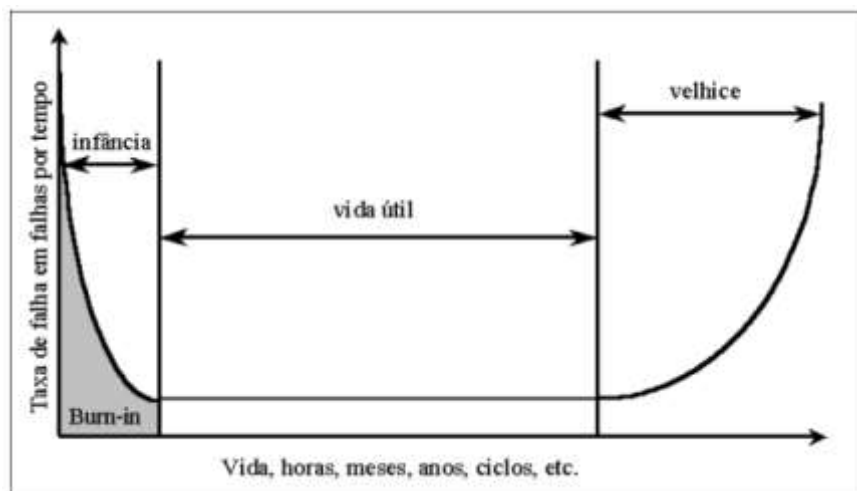


Figura 4 - Curva da Banheira idealizada.

Fonte: MATOS, 2010

Existem diversas considerações sobre as taxas de falha, podendo estas ser crescentes, decrescentes, constantes, em forma de “banheira” ou nenhum destes citados. São classificadas como taxa de falha crescente os dados ligados ao desgaste e velhice de um componente, enquanto que uma

taxa de falha decrescente é associada aos dados de uma grande quantidade de falhas no início do uso do produto (mortalidade infantil). A curva da banheira é caracterizada por um comportamento que se inicia com um alto índice de falha, seguida de desgaste por uso (mortalidade infantil seguida de desgaste).

No que diz respeito as falhas em si, existem três tipos básicos:

I - Falhas Precoces - Infância: Podem ser totalmente depuradas através de um rigoroso controle na fabricação e mediante testes antes do envio do produto ao consumidor. Acontecem devido ao uso demasiadamente intenso, as anormalidades de fabricação ou um projeto defeituoso. A classificação da taxa de falhas associada a este tipo de falha é decrescente;

II – Falhas por Desgaste - Velhice: Acontecem devido ao envelhecimento do equipamento ou desgaste natural durante uso (pela perda ou degeneração de características importantes). Em alguns casos pode-se reduzir ou eliminar as falhas por desgaste mediante um sistema de manutenção preventiva. A taxa de falhas associada a este tipo de falha é classificada como crescente.

III- Falhas Casuais - Vida útil: São falhas que acontecem ao acaso, em intervalos de tempos inesperados. Não é fácil a eliminação deste tipo de falha; porém, em alguns casos, existem técnicas que nos permitem fazer um acompanhamento adequado de componentes. A taxa de falhas associada a este tipo de falha é classificada como constante (MATOS, 2010).

2.3 ANÁLISE DE DADOS DE VIDA (LDA)

A Análise de Dados de Vida compreende os conceitos estatísticos fundamentais para se analisar e calcular as medidas da Engenharia da Confiabilidade. Como a maioria dos eventos não são determinísticos e sim eventos que ocorrem de maneira probabilística, necessitamos utilizar ferramentas matemáticas e estatísticas para modelar este comportamento e assim pode tomar decisões precisas em relação a estes eventos probabilísticos.

Existem duas diferentes abordagens para construir modelos matemáticos, as quais são descritas como:

- Modelagem Baseada na Teoria – Aqui a modelagem é baseada em teorias estabelecidas (da física, biologia e ciências sociais) relevantes para o problema. Esse tipo de modelo também é conhecido como *modelo baseado em física ou modelo White-box*, com os mecanismos subjacentes formando o ponto de partida para construção do modelo.
- Modelagem Empírica – Aqui, os dados disponíveis formam a base para a construção do modelo e não requer um entendimento do mecanismo subjacente envolvido. Como tal, estes modelos são usados quando existe entendimento insuficiente para usar a abordagem anterior. Este tipo de modelo é também chamado *modelo dado dependente ou modelo Black-box*.

A modelagem empírica, que requer um bom entendimento de (i) a metodologia necessária para construir o modelo (ii) propriedades dos diferentes modelos e (iii) ferramentas e técnicas para determinar se um modelo particular é apropriado para modelar um certo grupo de dados. O processo de modelagem empírica envolve os seguintes passos (MURTHY, 2003):

Passo 1: Coleta dos dados;

Passo 2: Análise Preliminar dos Dados;

Passo 3: Seleção do modelo;

Passo 4: Estimção dos Parâmetros.

Uma vez calculado os parâmetros para ajustar uma distribuição de vida a um dado grupo de dados em particular, pode-se obter uma variedade de gráficos e resultados calculados, incluindo:

- **A confiabilidade num dado tempo:** A probabilidade de que a unidade irá operar sem falhar até um determinado ponto no tempo. Por exemplo, existe 88% de chance de que a unidade irá operar 3 anos sem falha.

- **A probabilidade de falha num dado tempo:** A probabilidade de que a unidade tenha falhado até um determinado ponto no tempo. Por exemplo, existe 12% de chance de que a unidade tenha falhado após 3 anos de operação (probabilidade de falha) e 88% de chance de que ela irá operar sem falha (confiabilidade).
- **Vida Média:** O tempo médio esperado de operação antes da falha das unidades da população. Esta métrica geralmente é conhecida como "mean time to failure" (MTTF).
- **Taxa de falha:** O número de falhas por unidade de tempo que pode ser esperado ocorrer para a unidade (RELIASOFT, Life Data Analysis Reference).

2.4 CLASSIFICAÇÃO DOS DADOS DE VIDA

Modelos estatísticos se baseiam extensivamente nos dados para fazer previsões. Em análises de dados de vida, os modelos são distribuições estatísticas e os dados requeridos são os tempos até a falha. A qualidade de qualquer previsão é diretamente proporcional a qualidade, acuracidade e integridade dos dados fornecidos. Bons dados, juntamente com a escolha do modelo apropriado, geralmente resultam em boas previsões. Dados insuficientes ou ruins irão quase sempre resultar em previsões ruins.

Na metodologia de Análise de Dados de Vida queremos usar todos os dados disponíveis. Entretanto, estes dados algumas vezes estão incompletos ou incluem incertezas, por exemplo, de quando a falha ocorreu. Portanto, dados de vida podem ser separados em dois tipos: dados completos, i.e. dados onde toda informação está disponível, e dados censurados, i.e. dados onde alguma informação é desconhecida (RELIASOFT, Life Data Analysis Reference).

2.4.1 Dados Completos

Dado completo significa que o valor do tempo até a falha de cada unidade da amostra é conhecido. Por exemplo, se cinco unidades são testadas

e todas falharam (e seus tempos até a falha forma registrados) teremos então a informação completa para o tempo até a falha na amostra (RELIASOFT, Life Data Analysis Reference).



Figura 5 - Exemplo de dados completos.
Fonte: RELIASOFT (Life Data Analysis Reference)

2.4.2 Dados Censurados

Em muitos casos, nem todas as unidades de uma amostra podem ter falhado ou os tempos até a falha de todas as unidades não são conhecidos. Estes tipos de dados geralmente são chamados de dados censurados.

Existem três tipos possíveis de dados censurados: censurado à direita (também chamado de suspensão), censurado em intervalo ou censurado à esquerda (RELIASOFT, Life Data Analysis Reference).

- **Dado Censurado à direita (suspensão):** No caso de dados de vida, este grupo de dados é composto pelas unidades que não falharam. Por exemplo, se testarmos cinco unidades e apenas três falharam até o final do teste, teremos dados censurados à direita (ou dados suspensos) para as duas unidades que não falharam.

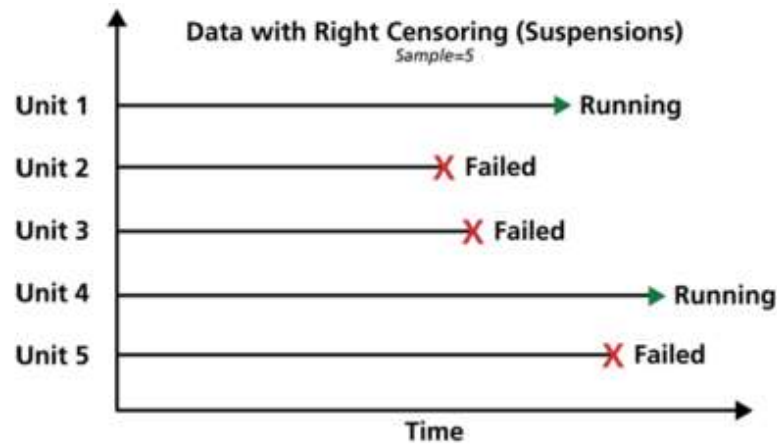


Figura 6 – Exemplo de dados censurados à direita.
Fonte: RELIASOFT (Life Data Analysis Reference)

- Dado Censurado em Intervalo:** O segundo tipo de censura é comumente chamado de dado censurado em intervalo. Dado censurado em intervalo reflete a incerteza no tempo exato em que as unidades falharam dentro de um intervalo. Estes tipos de dado frequentemente são originados de testes ou situações onde os objetos de interesse não são constantemente monitorados. Por exemplo, se estamos testando cinco unidades e inspecionando a cada 100 horas, apenas saberemos se uma unidade falhou ou não entre as inspeções.

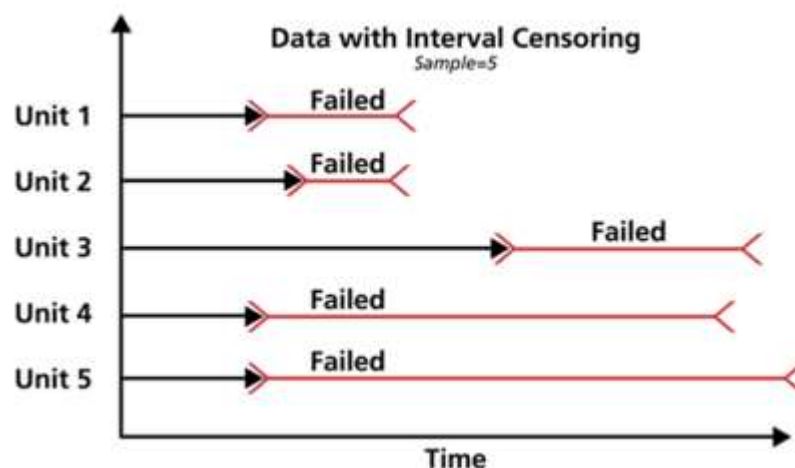


Figura 7 - Exemplo de dados censurados em intervalo.
Fonte: RELIASOFT (Life Data Analysis Reference)

- Dado Censurado à Esquerda:** O terceiro tipo de dado censurado é similar ao censurado em intervalo e é chamado dado censurado à esquerda. No dado censurado à esquerda, sabe-se apenas que a falha

ocorreu antes de certo tempo. Por exemplo, sabe-se que certa unidade falhou antes de 100 horas, mas não exatamente quando. Em outras palavras ela pode ter falhado em qualquer tempo entre 0 e 100 horas. Isto é idêntico ao dado censurado em intervalo no qual o tempo inicial para o intervalo é zero.

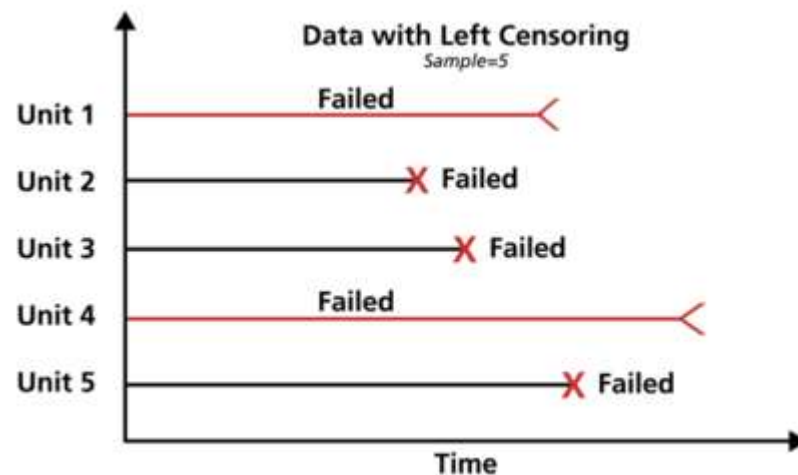


Figura 8 - Exemplo de dados censurados à esquerda.
Fonte: RELIASOFT (Life Data Analysis Reference)

2.5 DISTRIBUIÇÕES DE DADOS DE VIDA

Da probabilidade e estatística, dada uma variável aleatória contínua X , denota-se:

- A função densidade de probabilidade, *pdf* (*probability density function*), como $f(x)$;
- A função distribuição cumulativa, *cdf* (*cumulative distribution function*), como $F(x)$.

Uma distribuição de probabilidade é completamente descrita pela sua *pdf*. Todas as outras funções tais como confiabilidade, taxa de falha, tempo médio, etc. podem ser determinadas diretamente da *pdf* ou $f(x)$.

Muitas funções de distribuição de probabilidades padrão, tais como distribuição Normal, Exponencial, etc. têm sido usadas como base para modelar dados exibindo significativa variabilidade. Modelos mais complexos

podem ser criados com distribuições derivadas de distribuições padrão, tal como a distribuição Lognormal. Uma distribuição de significância particular é a distribuição de Weibull, nomeada após o Professor *Waloddi Weibull* promover a utilidade deste modelo de dados de características amplamente diferentes (MURTHY, 2003).

Algumas distribuições tendem a representar melhor dados de vida e são comumente chamadas de distribuições de vida. Existem muitas distribuições de vida diferentes que podem ser usadas para modelar dados de confiabilidade. Nos itens 3.5.1 a 3.5.4 serão descritas as distribuições mais comumente usadas e mais largamente aplicáveis distribuições para análise de dados de vida.

2.5.1 Distribuição de Weibull

A distribuição de Weibull é uma distribuição de confiabilidade geralmente utilizada para modelar resistência de materiais, tempos para a falha de componentes eletrônicos e mecânicos, equipamentos ou sistemas. No caso mais geral, a Weibull de 3 parâmetros é definida por:

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t-\gamma}{\eta} \right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta} \right)^{\beta}} ; \quad \text{Equação 1 - Weibull 3P}$$

onde:

- β = Parâmetro de forma;
- η = Parâmetro de escala;
- γ = Parâmetro de localização.

Se o parâmetro de localização, γ , é assumido como zero, a distribuição então se torna a Weibull de 2 parâmetros, definida por:

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta} \right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t}{\eta} \right)^{\beta}} ; \quad \text{Equação 2 - Weibull 2P}$$

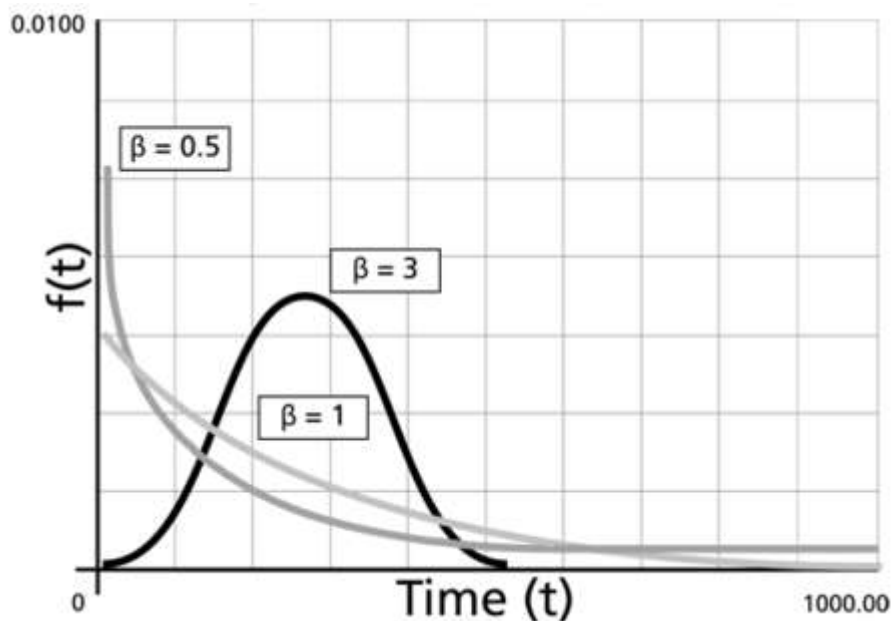


Figura 9 – Distribuições de Weibull para diferentes valores de β .
 Fonte: RELIASOFT (Life Data Analysis Reference)

Valores do parâmetro β não são facilmente modificados porque são movidos pela física da falha. O valor de β tem um efeito marcante na taxa de falha da distribuição de Weibull e podem ser feitas inferências sobre a característica de falha da população apenas considerando se o valor de β é menor, igual ou maior do que 1 (RELIASOFT, Life Data Analysis Reference).

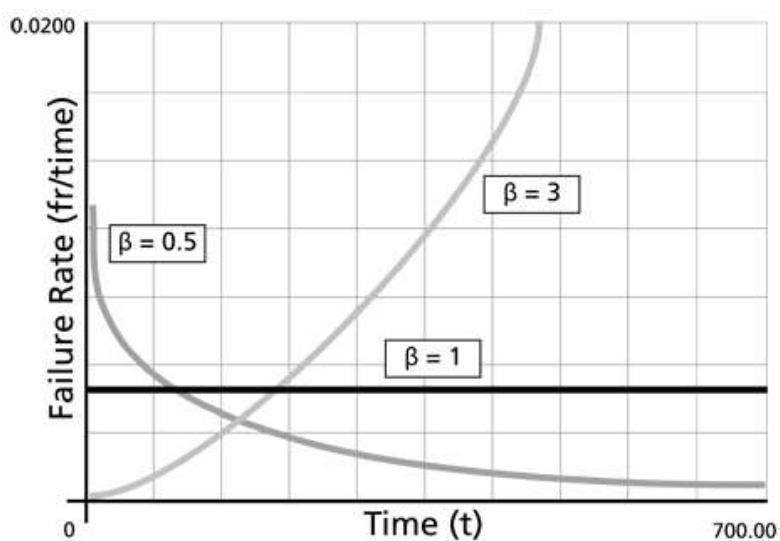


Figura 10 - Taxa de falha de Weibull para $0 < \beta < 1$, $\beta = 1$ e $\beta > 1$.
 Fonte: RELIASOFT (Life Data Analysis Reference)

Já os valores de “ η ” são medidas de durabilidade, podendo ser modificados pelo uso de diferentes materiais, layouts, etc. Nesse sentido, caso não apresente defeitos ou falhas prematuras, as falhas predominantes do componente, que, como abordado anteriormente, estão associadas ao desgaste do mesmo, tendem a ocorrer nas proximidades de sua vida característica; ou seja, nos casos em que ocorrem falhas predominantes, as mesmas tendem a concentrar-se nas proximidades do parâmetro de escala.

2.5.2 Distribuição Exponencial

A distribuição exponencial é uma distribuição geralmente utilizada para componentes ou sistemas exibindo uma taxa de falhas constante e é definida na sua forma mais geral por (RELIASOFT, Life Data Analysis Reference):

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda(t-\gamma)}; \quad \text{Equação 3 – Exponencial 2P}$$

Se o parâmetro de localização, γ , é assumido como zero, a distribuição se torna a exponencial de um parâmetro, definida por:

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t}; \quad \text{Equação 4 - Exponencial 1P}$$

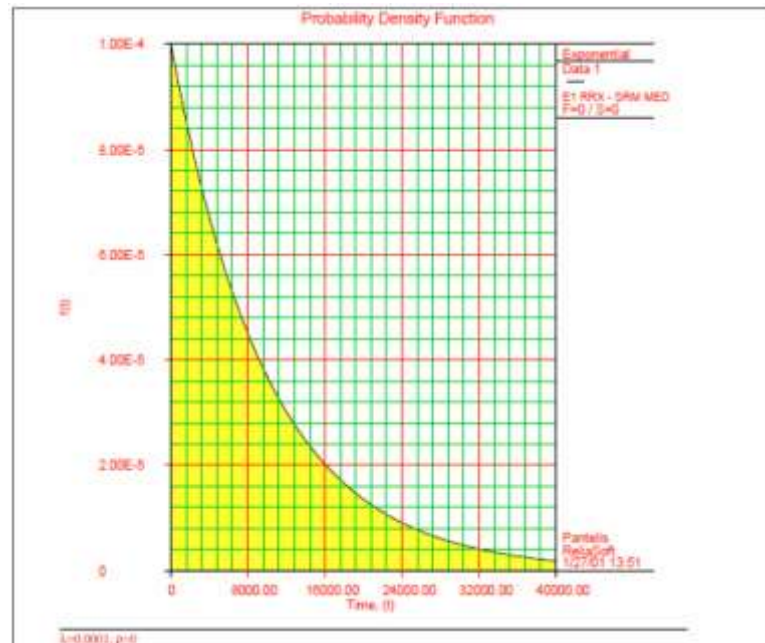


Figura 11 - Distribuição Exponencial
Fonte: MATOS, 2010

2.5.3 Distribuição Normal

A distribuição Normal é uma distribuição de confiabilidade geralmente utilizada para modelar tempos até a falha de componentes eletrônicos e mecânicos simples, equipamentos ou sistemas (RELIASOFT, Life Data Analysis Reference).

A *pdf* da distribuição normal é dada por:

$$f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)^2}; \quad \text{Equação 5 - Normal}$$

$$f(t) \geq 0, -\infty < t < \infty, \sigma > 0;$$

onde:

μ = Média dos tempos até a falha;
 σ = Desvio padrão dos tempos até a falha.

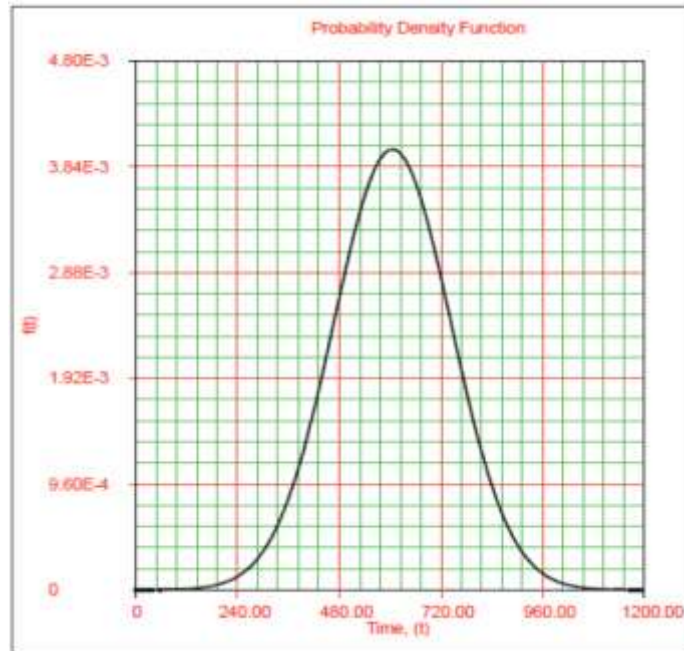


Figura 12 - Distribuição Normal
Fonte: MATOS, 2010

2.5.4 Distribuição Lognormal

A distribuição Lognormal é uma distribuição de confiabilidade geralmente utilizada para modelar ciclos até a falha em fadiga, resistência de materiais e carregamentos variáveis em projetos probabilísticos.

Quando os logaritmos naturais dos tempos até a falha são normalmente distribuídos, então os dados seguem uma distribuição Lognormal (RELIASOFT, Life Data Analysis Reference).

A *pdf* da distribuição Lognormal é dada por:

$$f(t) = \frac{1}{t\sigma_{T'}\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{T'-\mu'}{\sigma_{T'}}\right)^2}; \quad \text{Equação 6 – Lognormal}$$

$$f(t) \geq 0; \quad t > 0; \quad \sigma_{T'} > 0;$$

$$T' = \ln(t);$$

onde:

μ' = Média do logaritmo natural dos tempos até a falha;

$\sigma_{T'}$ = Desvio padrão do logaritmo natural dos tempos até a falha.

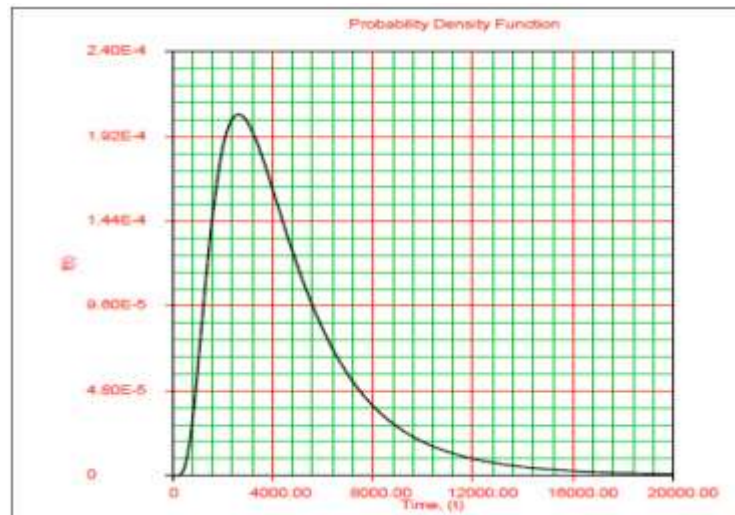


Figura 13 – Distribuição Lognormal
Fonte: MATOS, 2010

2.6 LIMITES DE CONFIANÇA

Como os resultados das análises de dados de vida são estimados baseados em tempos de vidas observados de uma amostra de unidades, existe incerteza nos resultados devido ao tamanho limitado da amostra. “Limites de Confiança”, também chamado de “Intervalos de Confiança”, são usados para quantificar esta incerteza devido ao erro de amostragem pela expressão da confiança de que um intervalo específico contém a quantidade de interesse (RELIASOFT, Life Data Analysis Reference).

Os limites de confiança podem ser expressos como bilaterais ou unilaterais.

2.6.1 Limite de Confiança Bilateral

Limites bilaterais são usados para indicar que a quantidade de interesse está contida dentro dos limites com uma confiança específica.

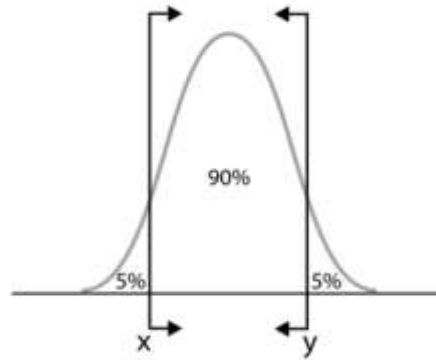


Figura 14 – Limite de confiança bilateral
Fonte: RELIASOFT (Life Data Analysis Reference)

Quando usamos limites de confiança bilaterais estamos olhando num intervalo fechado onde é provável que caia uma certa percentagem da população. Isto é, determinamos os valores, ou limites, entre os quais cai uma percentagem específica da população. Por exemplo, quando tratando com limite de confiança bilateral de 90% (X,Y), estamos dizendo que 90% da população se encontra entre X e Y com 5% menor do que X e 5% maior do que Y (RELIASOFT, Life Data Analysis Reference).

2.6.2 Limite de Confiança Unilateral

Limites unilaterais são usados para indicar que a quantidade de interesse está acima do limite inferior ou abaixo do limite superior com uma confiança específica.

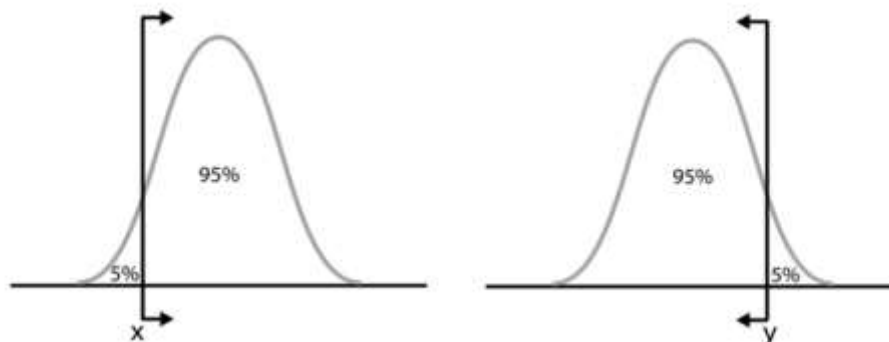


Figura 15 – Limite de Confiança unilateral inferior e superior
Fonte: RELIASOFT (Life Data Analysis Reference)

Limites de confiança unilateral define o ponto onde uma certa percentagem da população é maior ou menor do que um ponto definido. Isto

significa que existem dois tipos de limites unilaterais: superior e inferior. Um limite unilateral superior define um ponto que certa percentagem da população é menor do que ela. Reciprocamente, um limite unilateral inferior define um ponto que uma especificada percentagem da população é maior do que ela (RELIASOFT, Life Data Analysis Reference).

O tipo apropriado de limite de confiança depende da aplicação para o qual será utilizado. Por exemplo, o analista irá usar limite unilateral inferior em confiabilidade, um limite unilateral superior para percentual de falhas sob garantia e bilateral nos parâmetros da distribuição.

2.7 TEMPO ÓTIMO DE SUBSTITUIÇÃO PREVENTIVA

Manutenção preventiva é a prática de substituir componentes antes que eles falhem, com o objetivo de promover a operação contínua do sistema. A programação da manutenção preventiva é baseada na observação do comportamento passado do sistema, no conhecimento dos mecanismos de desgaste dos componentes e na avaliação da criticidade dos componentes para a operação contínua do sistema. O custo sempre é um fator a ser considerado na programação da manutenção preventiva, pois se trata de um recurso escasso, principalmente nos momentos de crise, que deve ser otimizado sempre que possível. Em muitas circunstâncias, é financeiramente mais efetivo substituir partes ou componentes que não tenham falhado em intervalos predeterminados em vez de esperar pela falha do sistema, a qual pode resultar em uma interrupção da operação.

A manutenção preventiva é uma escolha lógica se, e apenas se, as seguintes condições são satisfeitas (RELIASOFT, System Analysis Reference):

Condição #1: O componente em questão tem um aumento na taxa de falha. Em outras palavras, a taxa de falha do componente aumenta com o tempo, implicando em desgaste².

Condição #2: O custo global da manutenção preventiva deve ser menor do que o custo global da manutenção corretiva.

² Manutenção preventiva de um componente que assume uma distribuição exponencial (que implica numa taxa de falha constante) não faz sentido.

Adicionalmente, baseado na razão de custos (preventiva e corretiva), pode-se encontrar um tempo ótimo para a manutenção preventiva do componente.

Assim, o objetivo de um bom programa de manutenção preventiva é minimizar os custos globais e atender a uma meta de confiabilidade. Para alcançar isto deve ser determinado um intervalo apropriado de manutenção programada. Uma maneira para fazer isto é usar o modelo de substituição no tempo ótimo.

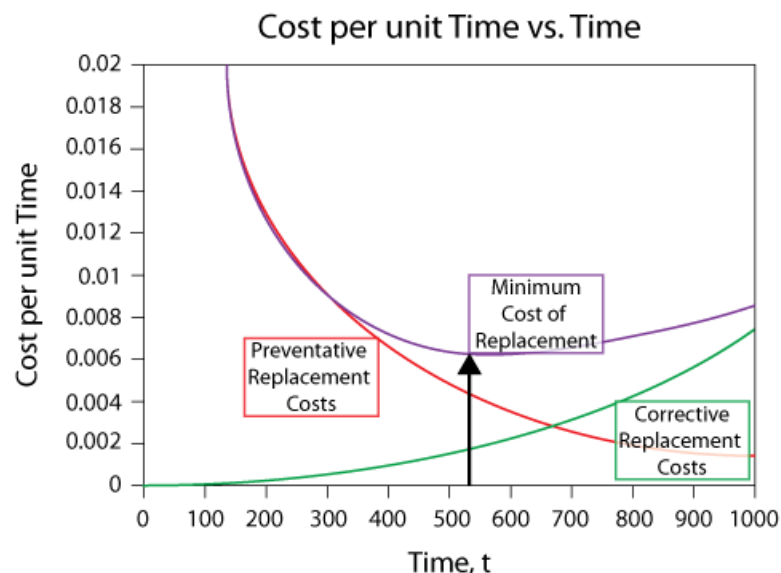


Figura 16 – Curvas de custos por unidade de tempo para substituição preventiva e corretiva

Fonte: RELIASOFT (System Analysis Reference)

Na figura 15 pode ser visto que os custos de manutenção corretiva aumentam com o intervalo de substituição. Em outras palavras, um maior intervalo de manutenção preventiva levará a maiores custos de manutenção corretiva. Obviamente, quanto mais tempo deixamos o equipamento operar sua taxa de falha aumenta a um ponto que é a falha é mais provável, requerendo mais ações corretivas. O oposto é verdade para os custos de substituição preventiva, ou seja, quanto mais se espera para realizar a manutenção preventiva menores são os custos. Se combinamos os dois custos, pode-se ver que existe um ponto ótimo que minimiza o custo. Em outras palavras, deve-se obter um balanço entre o risco/custo associados com uma falha enquanto

maximiza-se o tempo entre manutenções preventivas (RELIASOFT, System Analysis Reference).

Para determinar tempo ótimo da substituição preventiva é necessário um modelo matemático que descreva os riscos e custos associados. No desenvolvimento do modelo é assumido que:

- (a) Se a unidade falha antes do tempo t , irá ocorrer uma ação corretiva;
- (b) Se ele não falha no tempo t , irá ocorrer uma manutenção preventiva.

Em outras palavras, ou a unidade é substituída por falha ou preventivamente após o tempo de operação t , seja qual for o que ocorrer primeiro. Portanto, o tempo ótimo para substituição pode ser encontrado minimizando o custo por unidade de tempo, $CPUT(t)$, dado por:

$$CPUT(t) = \frac{\text{Custo total de substituição esperado por ciclo}}{\text{Duração esperada do ciclo}}$$

que matematicamente se traduz como:

$$CPUT(t) = \frac{C_p * R(t) + C_c * [1 - R(t)]}{\int_0^t R(s) ds} ; \quad \text{Equação 7 - Custo por Unidade de}$$

Tempo

onde:

$R(t)$ = Confiabilidade no tempo t ;

C_p = Custo de Manutenção Preventiva por Intervenção;

C_c = Custo de Manutenção Corretiva por Intervenção.

3 ANÁLISE DE CONFIABILIDADE APLICADA

Este capítulo contempla o desenvolvimento da Análise de Confiabilidade Aplicada, com a coleta e análise dos dados de vida, bem como, a obtenção da curva de vida dos mancais propulsores.

3.1 COLETA DOS DADOS

Durante a análise de dados de vida, deve-se ter bastante cautela na qualificação dos dados, e ter certeza de que a amostra não é tendenciosa. A primeira suposição que deve ser satisfeita é a de que os dados, ou a amostra sejam representativos da população.

Para a coleta dos dados foi utilizado o CMMS (Computerized Maintenance Management System) da empresa SAP EPR Módulo PM.

Apenas os dados de falha e reparo registrados a partir de 2010 apresentavam a consistência necessária para serem utilizados numa análise de engenharia de confiabilidade e, por isso, o período para coleta de dados análise foi definido de 01/01/2010 a 31/12/2015.

Para este período foram levantados dados de falhas de 177 Unidades de Bombeio, onde verificou-se que apenas para um determinado tipo de Unidade de Bombeio apresentou dados de falhas suficientes para uma avaliação estatística.

Esta Unidade será referenciada neste trabalho como L/456 (Fabricante/ Tamanho API), somando um total de 57 Unidades de Bombeio. Para estas Unidades foram identificados um total de 80 dados, sendo 8 completos e 72 suspensões.

3.2 ANÁLISE DOS DADOS

Os dados de falha e reparo das Unidade de Bombeio L/456 foram organizados numa planilha, identificando todos eventos de troca do mancal propulsor com a data da troca e o modo de falha.

Após a consolidação dos dados do SAP na planilha, foi realizada uma análise e validação dos dados com o engenheiro de manutenção do ativo

responsável pela manutenção destes equipamentos, visando garantir a consistência dos dados.

Para as Unidades de Bombeio L/456, observou-se os seguintes pontos:

- 32 equipamentos não tiveram troca dos mancais no período analisado;
- 12 trocas de mancais (análise de contaminação da graxa) devido a desgaste;
- Nenhuma troca devido a falha catastrófica do mancal;
- 12 trocas de mancais propulsores devido a preventiva de 2 anos.

Somente as trocas de mancais propulsores devido ao modo de falha **desgaste** foram consideradas como falha neste trabalho. Estas falhas poderiam ser devido a uma falha catastrófica ou devido a identificação do fim de vida através da avaliação da contaminação da graxa por limalha.

A avaliação da contaminação da graxa consiste na classificação da mesma em três níveis de contaminação por limalha C1, C2 e C3, conforme descrito abaixo e mostrado na figura 3:

Graxa Limalha C1 - Graxa com presença de pouca ou nenhuma limalha na amostra;

Graxa Limalha C2 - Graxa com presença de limalha moderada, distribuída em pontos espalhados na amostra;

Graxa Limalha C3 - Graxa com presença acentuada de limalha, distribuída por toda a amostra e com forte alteração da tonalidade da amostra.



Fotografia 3 – Referências para classificação da contaminação da graxa em C1, C2 e C3

Fonte: Autoria própria

Foi estabelecido que quando observada contaminação C2 na graxa do mancal propulsor, este deve ter programada a sua substituição. Quando observada a contaminação C3, a Unidade de Bombeio deve permanecer parada até a troca dos mancais.

Os dados completos de tempos até a falha observados no período para as unidades L/456 são apresentados na tabela 02.

Equipamentos	Início	Fim	F ou S	Tempo até a Falha (Dias)	Modo de Falha
1003012	02/02/2010	28/04/2014	F	1546	Desgaste
1024043	07/03/2010	27/09/2012	F	935	Desgaste
1024043	07/03/2010	25/03/2014	F	1479	Desgaste
1024052	01/05/2011	30/04/2014	F	1095	Desgaste
1032702	13/01/2011	20/03/2014	F	1162	Desgaste
1045559	10/06/2010	10/07/2014	F	1491	Desgaste
1048425	31/03/2011	28/05/2014	F	1154	Desgaste
1214755	16/09/2011	02/04/2015	F	1294	Desgaste

Tabela 1 – Dados completos de tempos até a falha da amostra
Fonte: Autoria própria

Além destes oito dados completos de tempos até a falha também fazem parte do grupo de dados da amostra outros 72 dados censurados.

Os dados censurados correspondem a três situações:

- O componente foi substituído antes da falha, por exemplo: substituição preventiva;
- Quando não se sabe a data de início da operação do componente ou;
- A análise é interrompida antes do componente falhar.

3.3 ANÁLISE DA VIDA CARACTERÍSTICA

Para obter os parâmetros de confiabilidade dos mancais propulsores foi necessário ajustar uma distribuição de vida que represente os dados consolidados. Na obtenção dos dados, como descrito na seção anterior, os dados coletados contêm tempos até a falha e suspensões.

Os dados são compostos por 8 falhas e 72 suspensões, onde a distribuição selecionada por melhor representar estes dados é uma distribuição de probabilidade Weibull 2 parâmetros.

O gráfico apresentado na Figura 17 mostra os dados de falha e a função ajustada pela distribuição de Weibull 2 Parâmetros (azul) e as linhas que representam os limites de confiança superior e inferior (vermelho).

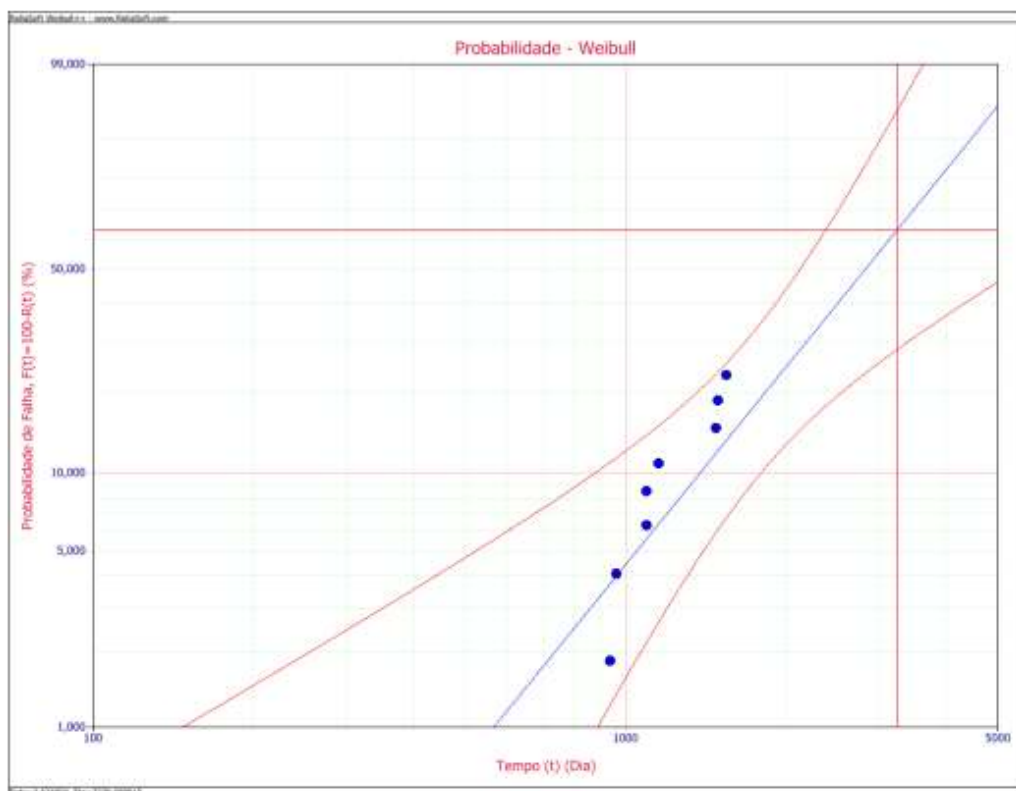


Figura 17 – Probabilidades de Falha (Limite de Confiança Bilateral de 95%).

Fonte: Autoria própria

A distribuição ajustada possui os parâmetros β igual a 2,6348 e η igual a 3238. Conforme item 2.5.1, o parâmetro β tem um efeito marcante na taxa de falha da distribuição de Weibull e podem ser feitas inferências sobre a característica de falha da população apenas considerando se o valor de β é menor, igual ou maior do que 1. Neste caso, onde o β é maior do que 1, pode-se afirmar que a característica deste modo de falha é por velhice – desgaste.

O parâmetro de escala (η) está associado à vida característica do componente e representa o tempo transcorrido desde o início da atividade até o momento da falha. Ele é definido pelo intervalo de tempo no qual ocorrem 63,2% das falhas, onde no caso dos mancais propulsores é igual a 3.238 dias, conforme mostrado na figura 18.



Figura 18 – Gráfico da Probabilidade de Falha versus tempo.
Fonte: Autoria própria

Analisando-se o gráfico da função densidade de probabilidade (pdf), Figura 19, percebe-se que grande parte da densidade de falhas concentra-se ao redor de um determinado tempo de vida. Nesse caso, $t=2700$ dias, e é justamente esse comportamento que caracteriza as falhas relacionadas ao desgaste natural do componente.

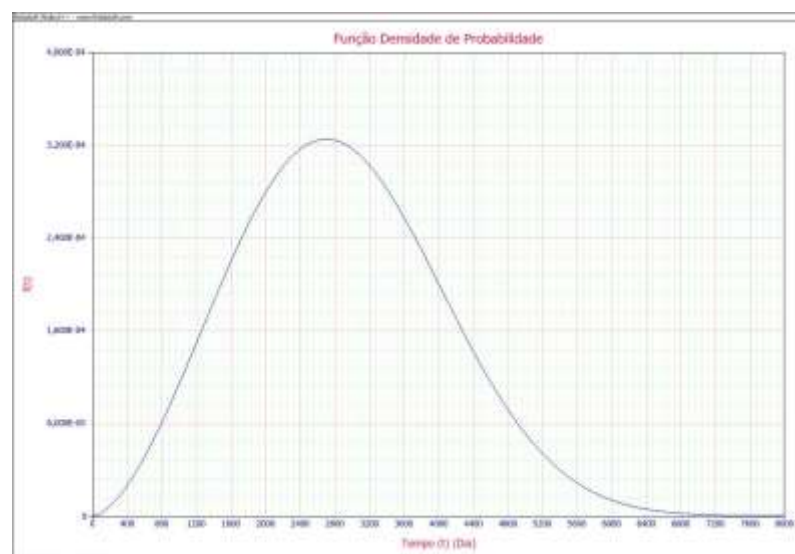


Figura 19 – Gráfico da Função Densidade de Probabilidades (pdf) versus Tempo.
Fonte: Autoria própria

Uma vez obtidos os parâmetros da distribuição, pode-se também obter outras informações sobre a vida do componente, tais como:

- Com a política atual de substituição a cada dois anos dos mancais propulsores a probabilidade de ocorrer uma falha antes da substituição preventiva é de 1,9%, com limite superior de 7,7% utilizando o limite de confiança de 95%.
- A Vida Média obtida para os mancais propulsores é de 2877 dias (7,88 Anos), com limite inferior de 1981 dias (5,42 anos) utilizando o limite de confiança de 95%.

Para se avaliar a mudança na probabilidade de falha com o tempo de operação, a Tabela 2 mostra as probabilidades de falha associadas aos tempos de operação de 1 a 4 anos, determinadas com limite de confiança superior e inferior.

Tempo de Operação	1 Ano	2 Anos	3 Anos	4 Anos
Limite Superior	0,0315	0,0777	0,1389	0,2263
Probabilidade de Falha Média	0,0032	0,0196	0,0558	0,1154
Limite Inferior	0,0003	0,0048	0,0218	0,0569

Tabela 2 – Probabilidades de Falha de Mancais Propulsores (Limite de Confiança de 95%)

Fonte: Autoria própria

4 TEMPO ÓTIMO DE SUBSTITUIÇÃO PREVENTIVA

O objetivo deste capítulo é verificar se a substituição preventiva é uma estratégia válida e, caso afirmativo, determinar qual seria o tempo de substituição preventiva para o mancal propulsor que resulta na melhor relação risco x custo.

A manutenção preventiva tem como preceito básico a substituição/reparo na eminência da falha, assim, as curvas de confiabilidade e da taxa de falha trazem informações importantes que devem subsidiar a tomada de decisão sobre “o momento de se reparar”.

Conforme visto no item 2.7, para que a substituição preventiva dos mancais propulsores seja uma alternativa lógica deveriam ser satisfeitas duas condições:

- Condição #1: O componente em questão tem um aumento na taxa de falha. Em outras palavras, a taxa de falha do componente aumenta com o tempo, implicando em desgaste.
- Condição #2: O custo global da manutenção preventiva deve ser menor do que o custo global da manutenção corretiva.

A condição #1 é satisfeita uma vez que a curva da taxa de falha obtida da distribuição ajustada é crescente, conforme apresentado na figura 20.

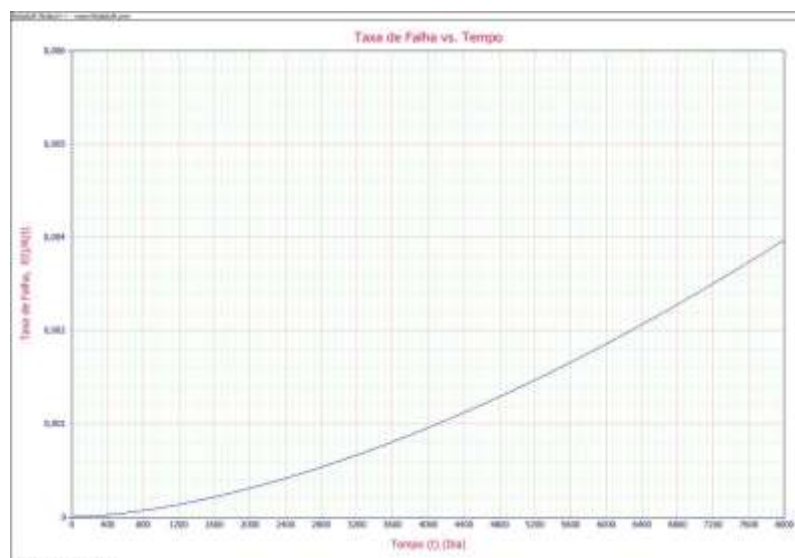


Figura 20 – Gráfico da Taxa de Falha versus Tempo
Fonte: Autoria própria

Para determinação do tempo ótimo de substituição do mancal propulsor, além da curva de vida característica do componente é necessário estabelecer os custos globais da manutenção preventiva e os custos globais da manutenção corretiva, conforme a Equação 7.

Neste trabalho o custo global (serviços de apoio, mão de obra, materiais e lucro cessante) de cada intervenção para substituição preventiva dos mancais propulsores será usado como referência, ou seja, será considerado como 1. Com isso, o custo global da manutenção corretiva (serviços de apoio, mão de obra, materiais, serviços de oficina e lucro cessante) obtido é 6,86 vezes o custo da manutenção preventiva, confirmando também o atendimento da condição #2.

Com o atendimento das condições #1 e #2 confirmamos a estratégia de substituição preventiva dos mancais propulsores como válida.

Inserindo os valores da manutenção preventiva, manutenção corretiva e função de confiabilidade na equação do Custo por Unidade de Tempo (CUPT) obtém-se a curva dada na Figura 20, onde o ponto de mínimo da curva corresponde ao tempo ótimo de substituição dos mancais propulsores com relação ao custo.

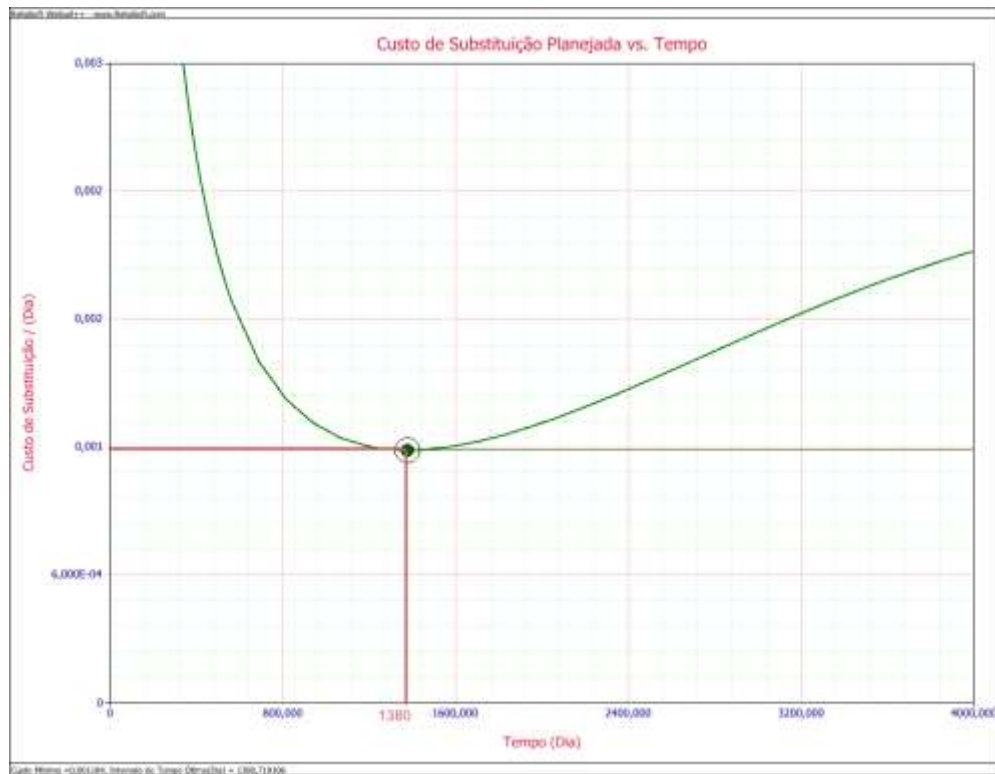


Figura 21 – Tempo ótimo para substituição preventiva com relação a custo
Fonte: Autoria própria

O tempo ótimo para substituição preventiva dos mancais propulsores pode ser obtido encontrando-se o ponto mínimo da curva de CPUT, que neste trabalho foi encontrado como igual a 1380 dias ou 3,83 anos.

4.1 COMPARAÇÃO DOS CUSTOS DE MANUTENÇÃO

O gráfico apresentado na Figura 22 mostra os custos por unidade de tempo considerando a substituição com 2 anos (720 dias), 3 anos (1080 dias) e 4 anos (1440 dias).

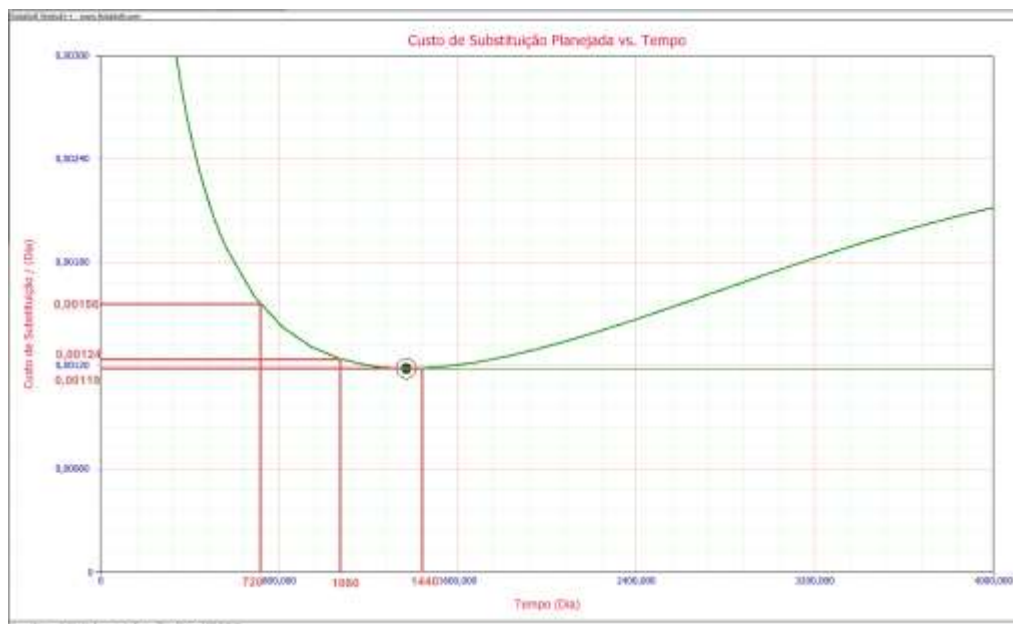


Figura 22 – Comparação entre os custos para substituição em 2, 3 e 4 anos
Fonte: Autoria própria

Com estes valores pode-se estimar os custos totais (preventiva e corretiva) para os períodos de substituição dos mancais de 2, 3 e 4 anos. Na tabela 3 foi adotado o custo estimado para a troca com 2 anos como referência (100%) e obtidos os custos para a troca com 3 anos e 4 anos como um percentual do custo obtido para a substituição com 2 anos. Ou seja, o custo total estimado com a substituição do mancal propulsor com 3 anos é igual a 80% do valor obtido para a substituição com 2 anos e o custo total estimado para a substituição do mancal propulsor com 4 anos é igual a 76% do valor obtido para a substituição com 2 anos.

Periodicidade	Custo Total Estimado	Economia Anual Estimada	Probabilidade de Falha
2 Anos	100%		1,96%
3 Anos	80%	20,4%	5,58%
4 Anos	76%	23,8%	11,94%

Tabela 3 - Avaliação da Economia Anual e Risco Estimado
Fonte: Autoria própria

A adoção de uma periodicidade de substituição do mancal a cada 3 anos tem um custo estimado em 20,4% menor do que a utilização da estratégia atual de substituir o mancal propulsor a cada 2 anos, sendo que, a adoção da

substituição a cada 4 anos resultará num custo estimado 23,8% menor do que a estratégia de substituição a cada 2 anos.

Além do aspecto custo também é necessário a avaliação do aumento na probabilidade de falha como consequência da extensão no prazo para troca preventiva dos mancais propulsores. Conforme visto no item 3.4, a probabilidade de falha passaria de 1,96% para a troca com 2 anos para 5,58% para a troca a cada 3 anos e para 11,94% para a troca a cada 4 anos.

Vale observar que, nas Unidades de Bombeio Mecânico analisadas não foi observado nenhum caso substituição do mancal propulsor devido à falha sem que a mesma tenha sido originada da avaliação da contaminação da graxa. Portanto, essa probabilidade de falha se refere a probabilidade de a contaminação da graxa estar acima dos limites aceitáveis.

5 CONCLUSÃO

As informações de campo são, sem nenhuma dúvida, as melhores fontes de retorno sobre o desempenho dos equipamentos. Com o registro correto das informações de manutenção dos equipamentos é possível realizar análises para otimização da estratégia de manutenção, visando a redução dos custos de manutenção, mantendo o risco dentro de padrões aceitáveis pela organização.

Muitas vezes são tomadas decisões como a de inserir uma substituição preventiva periódica de um componente/equipamento, logo após a ocorrência de uma falha que teve consequências relevantes (econômicas, ambientais ou de segurança), sem uma análise quantitativa que revele a verdadeira eficácia e custo/benefício da ação e qual seria a periodicidade ideal para realizar a substituição. Estas decisões não devem ser tomadas em reação a condições adversas ou como forma de resposta para atender os anseios da gerência.

Assim, foi desenvolvido este trabalho para avaliação quantitativa dos custos e riscos envolvidos na substituição preventiva dos mancais propulsores de unidades de bombeio mecânico, fornecendo informações como subsídios para tomada de decisões.

Como resultado mostrou-se que a periodicidade de substituição atual de 2 anos não é a que resulta na melhor relação risco/custo para o Ativo, considerando os aspectos de manutenção (preventiva e corretiva) e confiabilidade.

Com relação ao custo, a estratégia de manutenção utilizando o monitoramento da contaminação da graxa por limalha a cada 6 meses e a substituição preventiva dos mancais propulsores a cada 4 anos parece ser a que contribuirá para a maior lucratividade para ativo, entretanto, a probabilidade de falha passaria para 11,96%.

Levando em consideração o balanço entre fatores de custo e risco, a estratégia de substituição dos mancais a cada 3 anos parece ser mais adequada devido a uma redução significativa no custo, em torno de 20% menor do que a estratégia atual de substituição a cada 2 anos, com uma probabilidade de falha em torno de 5 %, que é 6,4% menor do que a troca a cada 4 anos.

Os principais ganhos da aplicação deste processo de análise foram à obtenção de respostas sobre os custos e riscos da substituição preventiva, possibilitando a revisão da estratégia de manutenção atual tendo como base uma análise quantitativa dos custos globais e probabilidades de falha para diferentes periodicidades de troca preventiva dos mancais propulsores.

Durante a realização deste trabalho as maiores dificuldades foram relacionadas a obtenção e validação dos dados de vida. A qualidade dos registros das manutenções, por vezes, dificultou o entendimento da ação realizada e a rastreabilidade das informações.

Devido aos dados de falha disponíveis, os resultados deste trabalho foram baseados nos dados de apenas um fabricante e tamanho de Unidade de Bombeio Mecânico. Como sugestão para trabalhos futuros esta análise poderia ser realizada em outros fabricante e tamanhos de Unidades de Bombeio Mecânico, verificando se o comportamento com relação a falha do mancal propulsor é similar e as conclusões obtidas neste trabalho podem ser estendidas para outras configurações.

REFERÊNCIAS

JARDINE, Andrew K. S., **Maintenance, Replacement and Reliability**, Pitman Publishing, 1973.

MATOS, Z. Paulo Zaleski e ZOTTI, M. Daianne, Monografia, **Análise de Confiabilidade Aplicada à Indústria para Estimação de Falhas e Provisionamento de Custos**. 2010, Universidade Federal do Paraná.

MURTHY, D. N. P., **Weibull Models** / D. N. Prabhakar Murthy, Min Xie, Renyan Jiang, 2003.

NASCIMENTO, A. Marcus, KARBAGE, S. Elias, COSTA, O. Rutácio. **Manutenção e Operação em Unidade de Bombeio Mecânico**, 2009.

RELIASOFT CORPORATION. **System Analysis Reference**, Reliasoft Publishing, 1999-2003.

RELIASOFT CORPORATION. **Life Data Analysis Reference**, Reliasoft Publishing, 1999-2003.