

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

RODNEY LUIS VISSOCI JUNIOR

**CONFIABILIDADE EM EQUIPAMENTOS ROTATIVOS BASEADO EM
MONITORAMENTO DE CONDIÇÃO:
aumento da confiabilidade de equipamentos rotativos em empresas
de papel e celulose**

MONOGRAFIA DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA

2016

RODNEY LUIS VISSOCI JUNIOR

**CONFIABILIDADE EM EQUIPAMENTOS ROTATIVOS BASEADO EM
MONITORAMENTO DE CONDIÇÃO:
aumento da confiabilidade de equipamentos rotativos em empresas
de papel e celulose**

Monografia de Conclusão de Curso de Especialização em Engenharia da Confiabilidade do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica, apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Especialista em Engenharia da Confiabilidade, pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Marcelo Rodrigues, Prof. Dr

CURITIBA

2016

FOLHA DESTINADA À INCLUSÃO DA FICHA CATALOGRÁFICA



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



TERMO DE APROVAÇÃO

CONFIABILIDADE EM EQUIPAMENTOS ROTATIVOS BASEADO EM MONITORAMENTO DE CONDIÇÃO: aumento da confiabilidade de equipamentos rotativos em empresas de papel e celulose

por

Rodney Luis Vissoci Junior

Este trabalho de conclusão de curso foi apresentado em 23 de maio de 2016, como requisito parcial para obtenção do título de Especialista em Engenharia da Confiabilidade, outorgado pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná. O aluno 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

AGRADECIMENTOS

Dedico os meus sinceros agradecimentos:

- aos meus pais Rodney e Rosangela que jamais mediram esforços para que eu pudesse estudar da melhor forma possível;
- ao meu irmão Alex, pela amizade, confiança e amor divididos.
- a minha esposa, Cristiane Taborda, por abrir mão de momentos junto comigo, por todo incentivo, amor e cumplicidade;
- ao Professor Marcelo Rodrigues que orientou este trabalho;
- aos professores do curso de Especialização em Engenharia de Confiabilidade da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

RESUMO

Vissoi Junior, Rodney Luis da. **Confiabilidade em Equipamentos Rotativos Baseado em Monitoramento de Condição**. 2016. XX folhas. Monografia (Especialização em Engenharia da Confiabilidade) – Departamento Acadêmico de Eletrotécnica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2015.

Esta monografia apresenta uma abordagem teórica e aplicada sobre a questão de confiabilidade de equipamentos rotativos industriais, realizando o estudo de confiabilidade através de intervalos de falha e com dados adquirido por monitoramento de condição, análise de vibração. Compara os resultados alcançados. Traz como resultado aumento da confiabilidade destes equipamentos.

Palavras-chave: Confiabilidade. Gestão de Ativos. Análise de Vibração. Manutenção Preditiva.

ABSTRACT

Vissoi Junior, Rodney Luis da. **Reliability in Rotating Equipment Based on Condition Monitoring.** 2016. XX f. Monografia (Especialização em Engenharia da Confiabilidade) – Departamento Acadêmico de Eletrotécnica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2015.

It presents a theoretical approach and applied on the issue of reliability of industrial rotating equipment, making the study of reliability through failure intervals and with data acquired by condition monitoring, vibration analysis. Compare the results. Brings as a result increase the reliability of this equipment.

Keywords: Reliability. Asset Management. Vibration Analysis. Predictive Maintenance.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - 1ª Prensa Inferior, rolamento 23244 CCK/W33 C3.....	23
Figura 2 - 2ª Prensa Inferior, 24168 ECACK30 W33 C3.....	23
Figura 3 - Foto Motor acionamento do exaustor tiragem caldeira.....	24
Figura 4 - Foto do exaustor tiragem caldeira.....	24
Figura 5 - Componentes de um mancal de rolamento.....	25
Figura 6 - Componentes de um rolamento.....	26
Figura 7 - Tipos de mancais de rolamento classificados em função dos seus elementos rolantes.....	27
Figura 8 - Designação e normalização de rolamentos.....	28
Figura 9 - Designação e normalização de rolamentos.....	28
Figura 10 - Falha localizada na pista interna de um mancal de esferas.....	30
Figura 11 - Falha na pista interna de um mancal de cilindros devido à erosão.....	31
Figura 12 - Ciclo de vida útil de um ativo.....	31
Figura 13 - Movimento harmônico simples.....	34
Figura 14 - Movimento Harmônico Simples: Projeção de um Ponto.....	35
Figura 15 - Exemplo forma de onda.....	37
Figura 16 - Exemplo espectro de vibração.....	37
Figura 17 - Transformada rápida de Fourier.....	38
Figura 18 - Forma de onda de deslocamento.....	40
Figura 19 - Norma ISO 10816-1.....	44
Figura 20 - Falha em relação aos parâmetros de desempenho.....	48
Figura 21 - Lógica de seleção de funções significantes.....	50
Figura 22 - Lógica de classificação das consequências da falha.....	51
Figura 23 - Diagramas lógicos para seleção das tarefas de manutenção das classes ESA e EEO.....	53
Figura 24 - Diagramas lógicos para seleção das tarefas de manutenção das classes OEO e OSA.....	54
Figura 25 - a) Histograma de frequência de uma amostra aleatória. b) Histograma de frequência de outra amostra da mesma população.....	57
Figura 26 - Função de densidade de probabilidade.....	57
Figura 27 - Distribuição de probabilidade contínua.....	58

Figura 28 - Distribuição de probabilidade contínua em um intervalo de tempo.....	58
Figura 29 - Função de densidade de probabilidade da distribuição de Weibull.....	61
Figura 30 - Função densidade acumulada de falhas da distribuição de Weibull.....	61
Figura 31 - Variação dos valores β em função do tempo da distribuição de Weibull.....	62
Figura 32 - Fases da curva da banheira.....	62
Figura 33 - Curva de Tendência e Espectro de Aceleração.....	68
Figura 34 - Curva de Tendência e Espectro de Aceleração.....	69
Figura 35 - Espectro de Aceleração.....	69
Figura 36 - Curva de Tendência.....	70
Figura 37 - Curva de Tendência.....	70
Figura 38 - Espectro de Aceleração.....	71
Figura 39 - Curva de Tendência.....	71
Figura 40 - Curva de Tendência.....	72
Figura 41 - Espectro de Aceleração.....	72
Figura 42 - Curva de Tendência.....	73
Figura 43 - Curva Confiabilidade pelo Tempo.....	75
Figura 44 - Curva pdf.....	75
Figura 45 - Curva Confiabilidade pelo Tempo.....	77
Figura 46 - Curva pdf.....	77
Figura 47 - Curva Confiabilidade pelo Tempo.....	79
Figura 48 - Curva pdf.....	80
Figura 49 - Curva Confiabilidade pelo Tempo.....	81
Figura 50 - Curva pdf.....	82
Figura 51 - Curva Confiabilidade pelo Tempo.....	83
Figura 52 - Curva pdf.....	84
Figura 53 - Curva Confiabilidade pelo Tempo.....	85
Figura 54 - Curva pdf.....	86

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Parâmetros para classificação dos fatores do NPR.....	47
Quadro 2 - Expressões da distribuição Weibull.....	60
Quadro 3 - Parâmetros da função Weibull.....	60
Quadro 4 - Relatório Implementação Distribuição Weibull.....	74
Quadro 5 - Confiabilidade 12 e 24 meses.....	74
Quadro 6 - Relatório Implementação Distribuição Exponencial.....	76
Quadro 7 - Confiabilidade 12 e 24 meses.....	76
Quadro 8 - Relatório Implementação Distribuição Exponencial.....	78
Quadro 9 - Confiabilidade 12 e 24 meses.....	79
Quadro 10 - Relatório Implementação Distribuição Gumbel.....	80
Quadro 11 - Confiabilidade 12 e 24 meses.....	81
Quadro 12 - Relatório Implementação Distribuição Gumbel.....	82
Quadro 13 - Confiabilidade 12 e 24 meses.....	83
Quadro 14 - Relatório Implementação Distribuição Exponencial.....	84
Quadro 15 - Confiabilidade 12 e 24 meses.....	85
Quadro 16 - Confiabilidade 12 e 24 meses.....	87

LISTA DE SIGLAS

TPM - Manutenção Produtiva Total, TPM (do inglês Total Productive Maintenance) e
MCC - Metodologia da Manutenção Centrada em Confiabilidade, MCC ou RCM, do
inglês (Realibility Centered Maintanance).

RPM - Rotações por minuto.

FFT - Fast Fourier Transform (Transformada Rápida de Fourier)

CPM - Ciclos por minuto.

FMEA - Análise dos Modos de Falha e seus Efeitos

FMECA - Análise dos Modos de Falha e seus Efeitos e sua Criticidade

NPR - Número de Prioridade de Risco.

RMS - Root Mean Square (Média quadrática).

OEO - Oculto, Econômico, Operacional

OSA - Oculto, Segurança, Ambiente

ESA - Evidente, Segurança, Ambiente

EEO - Evidente, Econômico, Operacional

FDP - Função de densidade de probabilidades

PDF - Probability Density Function

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
1.1 Tema	14
1.2 Problemas e Premissas	15
1.3 Objetivos	15
1.3.1 Objetivo Geral	15
1.3.2 Objetivos Específicos	16
1.4 Justificativa	16
1.5 Procedimentos Metodológicos	17
2. CONCEITOS DE MANUTENÇÃO	18
2.1. Introdução a Manutenção	18
2.2. Histórico da Manutenção	18
2.3. Tipos de Manutenção	20
2.3.1. Manutenção Corretiva	20
2.3.2. Manutenção Preventiva	20
2.3.3. Manutenção Preditiva	21
2.3.4. Manutenção Detectiva	22
2.3.5. Engenharia de Manutenção	23
2.3.6. Manutenção Centrada na Confiabilidade	23
2.4 Equipamentos em Estudo	24
2.4.1 Monitoramento	27
2.4.3 Mancais de Rolamento	27
3. Referencial Teórico	33
3.1. Gestão de Ativos	33
3.2. Análise de Vibração	35
3.2.1 Tipos de Movimento	35
3.2.2 Movimento Periódico	35
3.2.3 Movimento Harmônico	36
3.2.4 Movimento Randômico Aleatório	37
3.2.5 Vibração em Máquinas	37
3.2.6 Domínio do Tempo	38
3.2.7 Domínio da Frequência	40
3.2.8 Frequência e Período	41
3.2.9 Amplitude e Frequência	41
3.2.10 Tipos de Medição de Vibração	42
3.2.11 Frequência de Rotação	43
3.2.12 Falha em Rolamentos	44
3.2.13 Níveis de Alarme de Vibração	46
3.3 Manutenção Centrada em Confiabilidade	47

3.3.1	Metodologia MCC.....	47
3.3.2	Metodologia FMEA.....	48
3.3.3	Funções e Padrões de Desempenho.....	50
3.3.4	Modos de Falha.....	50
3.3.5	Efeitos da Falha.....	51
3.3.6	Efeitos da Falha.....	52
3.3.7	Seleção das Tarefas de Manutenção.....	54
3.3.8	Engenharia da Confiabilidade.....	56
3.3.9	Distribuições.....	58
4.	Aplicação Confiabilidade por Análise de Vibração.....	66
4.1	Seleção do Sistema de Coleta de Informações.....	66
4.2	Histórico de Vibração.....	68
4.2.1	Exaustor Tiragem Caldeira.....	68
4.2.2	Mancal 1ª Prensa Inferior.....	70
4.2.3	Mancal 2ª Prensa Inferior.....	72
4.3	Aplicação da Confiabilidade.....	73
4.3.1	Confiabilidade Exaustor.....	74
4.3.2	Confiabilidade 1ª Prensa Inferior.....	78
4.3.3	Confiabilidade 2ª Prensa Inferior.....	83
5.	Conclusões.....	87
6.	REFERÊNCIAS.....	89

1. INTRODUÇÃO

A situação econômica atual evidencia a necessidade de mudança cultural em relação à manutenção industrial brasileira. Por muitos ainda vista como custo, despesa e gasto. Quando na verdade a manutenção é uma ferramenta estratégica para a gestão e o sucesso da organização.

As atuais políticas de gestão resultam em estoques cada vez menores, processos mais enxutos e sistemas dimensionados praticamente no limite de sua capacidade operacional, que fazem da manutenção uma ferramenta fundamental na garantia da disponibilidade e confiabilidade das empresas. Esses fatores refletem a necessidade de um planejamento de manutenção eficiente, com atividades que se adaptem ao processo de produção, estabelecidas em função da prioridade desse processo, atendendo a prazos, metas e a um melhor custo-benefício.

Tsang (2002) afirma que o desenvolvimento de técnicas e métodos de manutenção deve fazer frente à:

- estratégias atuais de operação,
- expectativas de preservação ambientais e de segurança por parte da sociedade,
- mudanças tecnológicas crescentes e,
- mudanças organizacionais.

Existem várias metodologias, políticas e métodos que auxiliam na gestão das atividades e custos relacionados à manutenção dos sistemas, entre as mais utilizadas estão: a Manutenção Produtiva Total, TPM (do inglês Total Productive Maintenance) e a metodologia da Manutenção Centrada em Confiabilidade, MCC ou RCM, do inglês (Reliability Centered Maintenance).

1.1 Tema

A pesquisa está relacionada ao tema gestão da manutenção, especificamente no desenvolvimento de um modelo para diagnóstico e prevenção de falhas em sistemas industriais, através da confiabilidade baseado em monitoramento de condição por análise de vibração.

Políticas tradicionais de manutenção disseminam a crença de que todas as falhas são ruins e devem ser evitadas, contudo, uma análise mais detalhada confronta essa afirmação sob dois aspectos:

- muitas vezes, do ponto de vista técnico, não é viável evitar uma falha;
- mesmo que todas as falhas pudessem ser evitadas qual seria o custo dessa ação?

Esta pesquisa justifica-se pela necessidade de abordar a implantação do monitoramento de condição tendo como critério de criticidade a confiabilidade.

1.2 Problemas e Premissas

Atualmente a vida útil dos equipamentos é depreciada em função do tempo de uso e não pela condição operacional. Isto é válido quando todas as condições previstas pelo fabricante de cada componente do equipamento são atendidas na condição operacional, porém dificilmente é o que acontece no chão de fábrica.

Desta forma faz-se necessário atuar de forma preventiva nestes equipamentos, de forma que se tenha maior aproveitamento operacional.

Através do monitoramento de condição, é possível precisar a condição em que o equipamento se encontra até mesmo observar que tipo de falha esta em evolução. Porém existe a dificuldade de verificar qual a severidade e quanto tempo haverá remanescente para este equipamento em função deste diagnóstico.

Neste contexto, dado a importância financeira, operacional e de manutenção, é proposto o seguinte problema na pesquisa: a confiabilidade calculada através dos valores de vibração são mais precisos que se observados somente pelo tempo entre falhas? Com esta informação podemos ser mais precisos na criticidade de uma falha identificada por manutenção preditiva?

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Geral

Apresentar um comparativo de confiabilidade de equipamentos rotativos, com o intuito de aumentar a confiabilidade do diagnóstico de análise de vibração, tendo como retorno redução de custos de manutenção, auxiliando na Gestão de Ativos.

1.3.2 Objetivos Específicos

- apresentar um estudo bibliográfico atualizado do tema Manutenção Preditiva e Confiabilidade;
- conceituar a manutenção, seus métodos, planejamento e ações com foco orientado para Manutenção Preditiva;
- descrever e analisar a aplicação de um modelo proposto de implantação da manutenção preditiva por confiabilidade;
- avaliar os resultados da implantação como ferramenta de apoio a manutenção preditiva.

1.4 Justificativa

No âmbito da manutenção deve-se considerar algumas variáveis para a tomada de decisão, sobre quando e como intervir no equipamento, tais como custo de manutenção, tempo de manutenção, quantidade de produção por hora e custo por hora da máquina parada.

Através do monitoramento de condição o diagnóstico da falha é realizado antes da mesma ocorrer, desta forma pode ser programada a manutenção no equipamento para um momento mais oportuno, reduzindo o tempo de parada para manutenção, porém ocorrem outros ganhos através desta informação, como redução dos sobressalentes, menor tempo de reparo e menor custo de reparo.

Com o custo e a complexidade cada vez maiores ao longo da vida útil dos equipamentos (LAFRAIA, 2001), a importância da confiabilidade, como um parâmetro de eficiência, está influenciando na tomada de decisão ao que tange a saúde financeira de empresas (COSTA, 2013) e deve ser cada vez mais fruto de pesquisa e desenvolvimento de ferramentas de análise de dados. Os benefícios com a aplicação da confiabilidade são inumeráveis, porém cita-se os seguintes como os mais significativos (LAFRAIA, 2001):

- Menores custos de manutenção/operação/apoio;
- Menores perdas por lucros cessantes;
- Menores possibilidades de acidentes;
- Cumprimento da legislação ambiental;

- Continuidade operacional.

A implantação de um sistema de manutenção por condição (preditivo) tem o retorno no investimento na primeira detecção de falha que provoque parada ou perda de produção.

1.5 Procedimentos Metodológicos

O trabalho é apresentado e estruturado nos seguintes capítulos:

No capítulo 1 são realizados os comentários iniciais, apresentação e justificativa do tema, exposição dos objetivos, métodos de pesquisa e estrutura do trabalho.

No capítulo 2 é realizada a fundamentação teórica para desenvolvimento do trabalho, descrevendo a Manutenção Industrial, apresentando seu contexto histórico e evolução dos seus métodos e técnicas, onde são conceituados os diferentes métodos de manutenção, em função das técnicas e políticas empregadas.

No capítulo 3 será realizado o referencial teórico, os conceitos e definições empregados na Engenharia da Confiabilidade, descrição das ferramentas utilizadas e aplicadas neste trabalho.

No capítulo 4 é apresentada a proposta de diagnóstico por monitoramento de condição utilizando como critérios de criticidade a confiabilidade. Em seguida apresenta-se o estudo de caso da aplicação do modelo e da metodologia no diagnóstico de falhas em rolos de máquinas de papel e celulose.

No capítulo 5 são apresentadas as conclusões do trabalho e sugestões de melhorias para trabalhos futuros.

2. CONCEITOS DE MANUTENÇÃO

2.1. Introdução a Manutenção

Entre as grandes empresas é nítida a preocupação em ser o benchmark, ou seja, ser a empresa referencia no mundo. Em consequência, a área de Manutenção dessas empresas deve também procurar a excelência, pois não há empresa excelente sem que seus diversos segmentos não o sejam. Apoiados nessa necessidade, a manutenção nas grandes empresas deve buscar a melhoria de modo constante, utilizando as melhores praticas conhecidas, Comitti (2004).

Um sistema de manutenção eficiente deve visar o aproveitamento total das instalações, a disponibilidade plena do equipamento, isto e, Quebra Zero, para garantia da competitividade e do sucesso da empresa.

Todo e qualquer tipo de equipamento, do mais simples ao mais sofisticado, apresenta durante seu período de vida útil problemas causados por defeitos de fabricação, por manuseio incorreto e ate mesmo por manutenção deficiente. Mesmo sendo problemas pequenos, se não forem sanados no momento correto podem ter consequências gravíssimas, gerando prejuízos muito além do previsto.

Geralmente as maquinas necessitam de manutenção. Quando esta manutenção não e feita de forma planejada e correta, mais cedo ou mais tarde, levam a parada das maquinas. Resta saber se essa parada será inesperada ou programada, ou seja, Manutenção Corretiva Não Planejada ou Manutenção Corretiva Planejada. Dentro deste enfoque, a equipe de manutenção deve fazer de tudo para que não ocorram as paradas inesperadas.

Com as paradas não programadas tem-se, por exemplo, problemas como a introdução de falhas oriunda de uma intervenção inadequada e defeitos que se propagaram de um componente para o outro dentro da maquina. Isto faz com que as paradas sejam mais prolongadas do que em uma Manutenção Corretiva Planejada. Como consequência este fato trará prejuízos para a produção e, obviamente, aumentara os custos da manutenção, o que poderia ser evitado com paradas programadas.

2.2. Histórico da Manutenção

No fim do século XIX, com o surgimento da mecanização das indústrias, surgiu a necessidade dos primeiros reparos. Até 1914 a manutenção tinha importância secundária e as indústrias praticamente não possuíam equipamentos e equipes para execução deste tipo de serviços com o mesmo efetivo da produção. Com o advento da Primeira Guerra Mundial as fábricas passaram a ter que manter uma produção mínima e, conseqüentemente, sentiu-se a necessidade de criar equipes que pudessem corrigir as falhas das máquinas no menor tempo possível. Assim, surgiu um órgão subordinado à produção, cujo objetivo básico era de execução de manutenção, hoje conhecida como Manutenção Corretiva.

Esta situação se manteve até a década de 30 quando, em função da Segunda Guerra Mundial e da necessidade de aumento de rapidez de produção, fez com que a alta administração industrial se preocupasse, não só de corrigir falhas, mas também de evitar seu aparecimento. Isso levou os técnicos de manutenção a desenvolverem processos de prevenção de falhas que, juntamente com a correção, completavam o quadro geral de manutenção, formando uma estrutura de manutenção tão importante quanto à de produção.

De 1940 a 1966, com desenvolvimento da aviação comercial, acarretou a expansão dos critérios de Manutenção Preventiva, uma vez que não era admissível executar Manutenções Corretivas na maioria dos equipamentos, através de execução da Manutenção Preventiva, segundo métodos técnico-científicos.

O custo da manutenção também começou a se elevar muito em comparação com outros custos operacionais. Esse fato fez aumentar os sistemas de planejamento e controle da manutenção que, hoje, são parte integrante da manutenção moderna. Conseqüentemente, com a quantidade de capital investido em itens físicos mais o nítido aumento do custo relativo a esses equipamentos, levaram as pessoas a buscar métodos para aumentar a vida útil dos equipamentos.

A partir de 1966, até a época atual, com a expansão da indústria e a difusão dos computadores, a Engenharia de Manutenção passou a desenvolver processos mais sofisticados de controle e análise, utilizando fórmulas matemáticas mais complexas visando pré-determinar os períodos mais econômicos de execução de Manutenção Preventiva, Nascif (2000).

Estes critérios, conhecidos como controle preditivos de manutenção ainda estão em desenvolvimento e são aplicados, conjunta ou separadamente, através de análises de sintomas e processos estatísticos.

2.3. Tipos de Manutenção

Ainda é comum certa confusão quanto à nomenclatura utilizada para definir os tipos de manutenção. Os nomes podem até variar, mas o conceito deve estar bem compreendido. A conceituação, conforme mostrado a seguir, permite a escolha do tipo mais conveniente para um determinado equipamento, instalação ou sistema, Comitti (2004).

2.3.1. Manutenção Corretiva

Trata-se da atuação para correção da falha ou do desempenho menor que o esperado. Corretiva vem da palavra “corrigir”. A Manutenção Corretiva pode ser dividida em duas classes: Corretiva Não Planejada e Corretiva Planejada.

Manutenção Corretiva Não Planejada corrige a falha de maneira aleatória, ou seja, e a correção da falha ou desempenho menor que o esperado após a ocorrência do fato. Esse tipo de manutenção implica em altos custos, pois causa perdas de produção e a extensão dos danos aos equipamentos é maior. Quando só existe corretiva, a manutenção é comandada pelos equipamentos, o que torna a manutenção reativa.

Manutenção Corretiva Planejada é a correção que se faz em função de um acompanhamento preditivo, detective ou até pela decisão gerencial de se operar até a falha. Esse tipo de manutenção é planejado. Tudo que é planejado representa economia, mais segurança e agilidade.

2.3.2. Manutenção Preventiva

Trata-se da atuação realizada para deduzir ou evitar falha ou queda no desempenho, obedecendo a um planejamento baseado em intervalos definidos de tempo, também chamado de preventiva sistemática. Preventiva vem da palavra “prevenir”.

Um dos segredos de uma boa prevenção está na determinação dos intervalos de tempo. Como, na dúvida, tem-se a tendência de ser mais conservador, os intervalos normalmente são menores que o necessário, o que implica em paradas e troca de peças desnecessárias.

A Manutenção Preventiva tem grande aplicação em instalações/equipamentos cuja falha pode provocar catástrofes ou riscos ao meio ambiente, sistemas complexos e/ou de operação contínua ou ainda em locais onde não é possível fazer inspeção preditiva e ou detective.

2.3.3. Manutenção Preditiva

Papic et al. (2009) observam que grande parte dos componentes ou sistemas apresentam uma espécie de sintoma antes da ocorrência de uma falha e que a leitura desses sintomas podem determinar o estado de operação da máquina ou mesmo a necessidade de manutenção. Marçal (2000) acrescenta que em decorrência da monitoração e análise desses sintomas, prediz-se o estado de funcionamento futuro, podendo-se programar uma ação presente.

A manutenção preditiva consiste em toda a ação de acompanhamento ou monitoramento das condições de um sistema, seus parâmetros operacionais e sua eventual degradação, sendo realizada através de medições ou inspeções que não interfiram na operação do sistema (FILHO, 2008; MARÇAL, 2000).

Raposo (2004) apresenta a manutenção preditiva sobre dois enfoques distintos. No primeiro ela é descrita como uma modalidade dentro de uma política de manutenção preventiva, onde a degradação do sistema é desconhecida e a supervisão dos parâmetros é realizada de forma contínua, caracterizando uma preventiva de acompanhamento. No segundo enfoque as técnicas preditivas são vistas como uma evolução da manutenção preventiva sistemática, sendo englobadas como uma forma manutenção.

Um plano de manutenção preditiva traz como vantagens o máximo aproveitamento da vida útil dos componentes, o mínimo de intervenção nos sistemas, redução de reparos de emergências e não planejados e por fim a programação antecipada de ações da manutenção. Contudo as desvantagens desse método de manutenção são as necessidades de um acompanhamento e inspeções periódicas, por meio de instrumentos específicos, acarretando um aumento dos custos e indispensabilidade de especialização técnica da equipe de manutenção (FILHO, 2008; RAPOSO, 2004).

Marçal (2000) define como critério de seleção para aplicação de técnicas preditivas a relevância do sistema ou equipamento no processo produtivo, através

de parâmetros como: criticidade de uma falha do sistema, tempo de operação, sistemas ou componentes sobressalentes, característica das falhas, possibilidade de monitoramento e custos de inspeção.

Trata-se de um conjunto de atividades de acompanhamento das variáveis ou parâmetros que indicam a desempenho ou desempenho dos equipamentos, de modo sistemático, visando definir a necessidade ou não de intervenção. Preditiva vem da palavra “predizer”.

Permite que os equipamentos operem por mais tempo e a intervenção ocorra com base em dados e informações. Quando a intervenção (fruto do acompanhamento preditivo) é realizada, estará ocorrendo uma Manutenção Corretiva Planejada.

A prática da Manutenção Preditiva reduzirá significativamente o número de manutenções corretivas e preventivas. A seguir tem-se os principais benefícios da Manutenção Preditiva.

- Eliminação das trocas de componentes e das intervenções preventivas desnecessárias.
- Diminuição dos custos e prazos das intervenções, através do conhecimento antecipado dos defeitos a serem corrigidos.
- Aumento da segurança operacional e disponibilidade dos equipamentos, com redução dos riscos de acidentes e interrupções inesperadas de produção.
- Redução das quebras de equipamentos em operação, que provocam danos secundários em muitos componentes.

De uma maneira geral, a aplicação de programas de Manutenção Preditiva em indústrias de processo resulta em reduções da ordem de 2/3 nos prejuízos com paradas inesperadas de produção e 1/3 nos gastos com a manutenção, Brito (2002).

2.3.4. Manutenção Detectiva

Trata-se da atuação efetuada em sistemas de proteção ou comando buscando detectar falhas ocultas ou não perceptíveis ao pessoal de operação e manutenção. Detective vem da palavra “detectar”.

Um exemplo clássico é o circuito que comanda a entrada de um gerador em um hospital. Se houver falta de energia e o circuito tiver uma falha, o gerador não entra

em funcionamento. Por isso, este circuito é testado/acionado de tempos em tempos, para verificar sua funcionalidade.

A medida que aumenta a utilidade de instrumentação de comando, controle e automação nas indústrias, maior é a necessidade de Manutenção Detective para garantir a confiabilidade dos sistemas e da planta.

2.3.5. Engenharia de Manutenção

Engenharia de Manutenção é um conjunto de atividades que permite aumentar a confiabilidade e a disponibilidade. É deixar de ficar concertando, convivendo com problemas crônicos, para melhorar padrões e sistemáticas, desenvolvendo a manutenibilidade, dando feedback ao projeto e interferindo tecnicamente nas compras.

Normalmente, quem pratica a manutenção corretiva não planejada, não terá tempo para praticar a Engenharia de Manutenção. Mas, possivelmente, terá tempo para continuar corrigindo a falha de maneira aleatória e convivendo com os resultados negativos. É necessário mudar, incorporar a Manutenção Preventiva, a Manutenção Preditiva e praticar a Engenharia de Manutenção, que nada mais é que agir proativamente na busca da causa raiz dos problemas.

Como exemplo de Engenharia de Manutenção, pode-se citar a seguinte situação: O que é mais interessante? Lubrificar um mancal com graxa mineral comum, e trocar seu rolamento de 15 em 15 dias, ou usar uma graxa sintética, mais cara e trocar a cada três meses? O que é melhor e de menor custo, trocar um determinado rolamento 24 vezes por ano, ou apenas 4? Segundo Nascif (2000), o menor custo sempre será a menor manutenção.

2.3.6. Manutenção Centrada na Confiabilidade

A Manutenção Centrada na Confiabilidade (MCC) é definida por Seixas (2002) como método para desenvolver e selecionar projetos alternativos de manutenção, baseados em critérios econômicos, de segurança e operacionais. Manutenção Centralizada em Confiabilidade utiliza perspectiva do sistema para análise das funções do sistema, das falhas das funções e da prevenção das falhas.

A MCC (ou RCM - Reliability-Centred Maintenance) iniciou sua aplicação no setor aeronáutico, quando foi desenvolvido um avião de grande porte. A partir de então, diversas aplicações foram conduzidas em diversos setores, tais como: Área marítima, conversão de energia solar, terminais de grão, minas de carvão, geração e distribuição de energia e, no Brasil, agora em ferrovias.

Segundo Seixas (2002), a manutenção tradicional é desempenhada em um sistema, ou conjunto de componentes, do mesmo modo, sem considerar as diferenças das funções entre componentes, dentro de um mesmo sistema. A manutenção tradicional foi desenvolvida com pouca ou nenhuma consideração para “como cada item do equipamento contribui para o sucesso global”.

De acordo com Moubray (1997) quando implantado de forma correta, a MCC reduzirá de 40% a 70% a rotina de tarefas de manutenção, com uma série de vantagens e benefícios na segurança, logística, operação e administração das organizações. Para Backlund (2003) a MCC acrescenta também benefícios intangíveis, que geralmente são ignorados por apresentarem um impacto financeiro insignificante (BACKLUND, 2003).

Já na MCC a frequência e as atividades de manutenção são desenvolvidas observando “como cada item contribui para manter a função do sistema”.

A MCC fornece um mecanismo para que as pessoas decidam que manutenção necessita ser desempenhada e também que manutenção não necessita ser feita. E para que o sistema forneça eficácia, Seixas (2002) ainda conclui que o método RCM tem muitas variantes e cada uma deve ser utilizada considerando os princípios básicos do método. O método não é a cura de todos os males ou uma bola mágica para desenvolver todos os problemas industriais. O sucesso de cada aplicação depende, sobretudo de apoio gerencial, da criatividade da equipe na utilização do método e do grau de cooperação do pessoal a instalação envolvidos com os sistemas.

A escolha de cada um dos tipos de manutenção dependerá exclusivamente da natureza, do serviço de cada equipamento e de suas características construtivas.

2.4 Equipamentos em Estudo.

O tema abordado neste trabalho foi aplicado em indústria de papel e celulose, em mancais de rolamentos de baixa rotação e rotação intermediária.

Para os rolamentos em baixa rotação, foi realizado acompanhamento em dois conjuntos de mancais de Prensa.

A 1ª Prensa Inferior com os rolamentos 23244 CCK/W33 C3 operando em rotação aproximada de 220 rpm.

A 2ª Prensa Inferior com os rolamentos 24168 ECACK30 W33 C3 operando em rotação aproximada de 125 rpm.



Figura 1 - 1ª Prensa Inferior, rolamento 23244 CCK/W33 C3.

Autor, 2013



Figura 2 - 2ª Prensa Inferior, 24168 ECACK30 W33 C3.

Autor, 2013

Para os rolamentos em rotação intermediária, foi realizado acompanhamento em um exaustor de caldeira com rotação aproximada de 1100 rpm, com os rolamentos dos mancais 22222C C3.



Figura 3 – Foto Motor acionamento do exaustor tiragem caldeira.
Autor, 2013



Figura 4 – Foto do exaustor tiragem caldeira.

Autor, 2013

2.4.1 Monitoramento.

São realizados monitoramentos sistemáticos dos equipamentos em estudo, via análise de vibração a mais de 24 meses.

Este monitoramento foi iniciado com cadência mensal e nos últimos seis meses passou a ser monitorado semanalmente os mancais da prensa e quinzenalmente o exaustor da caldeira.

São monitorados os parâmetros de velocidade, aceleração e envelope, nas direções vertical, horizontal e axial.

2.4.3 Mancais de Rolamento.

Mancais de rolamento possuem aplicações domésticas e industriais amplamente difundidas na atualidade. Esses têm por meta suportar uma carga, em geral caracterizada por um eixo, permitindo seu movimento rotacional em relação à estrutura da máquina rotativa. Segundo N.TANDON e A. CHOUDHURY [2,3], o funcionamento apropriado de tais dispositivos depende, em grande parte, de um contato suave entre seus componentes. Em aplicações industriais, mancais de rolamento são classificados como componentes mecânicos críticos, uma vez que as ocorrências de falhas nesses dispositivos constituem a principal causa de colapso de máquinas rotativas.

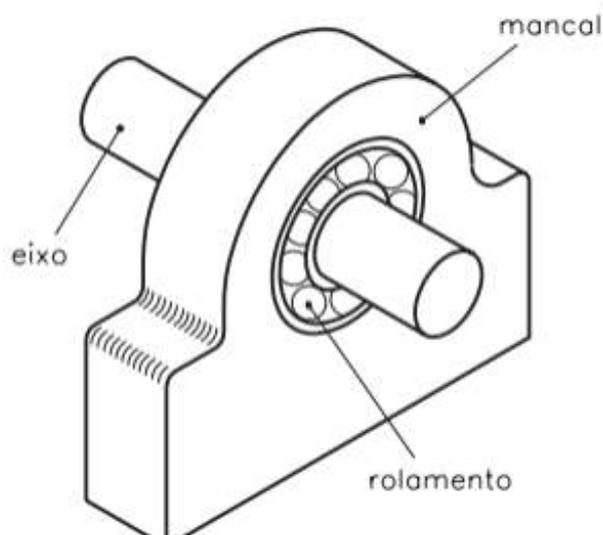


Figura 5 – Componentes de um mancal de rolamento. (Fonte: Google Images).

O rolamento é a peça do mancal empregada com a finalidade de suportar carregamentos e permitir movimento relativo entre duas partes (normalmente eixo e máquina). Vale ressaltar que o emprego desse dispositivo permite o trabalho do eixo sem acarretar o seu desgaste devido a seu movimento relativo. Os principais componentes de um rolamento são: pista externa, gaiola, elementos rolantes e pista interna. Esses estão mostrados na Figura 6.

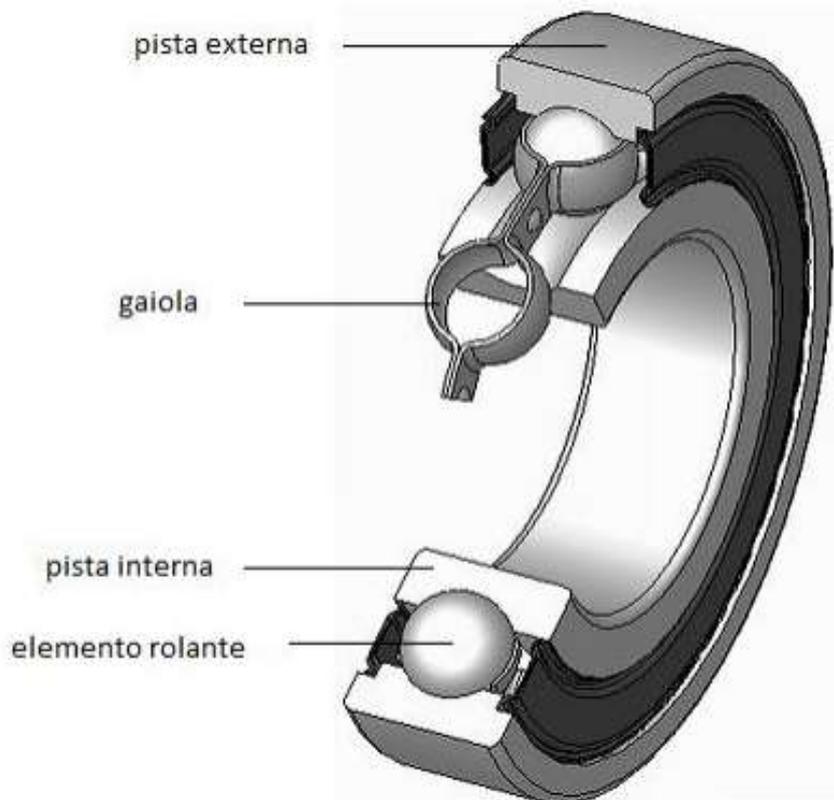


Figura 6 – Componentes de um rolamento. (Fonte: Google Images).

Os elementos rolantes se deslocam ao longo das pistas, com pouca resistência e deslizamento, mantidos separados pela gaiola, a fim de mantê-los adequadamente distanciados para promover uma distribuição de cargas homogênea entre os mesmos.

A Figura 7 apresenta os principais tipos de mancais de rolamento existentes classificados em função dos seus elementos rolantes.



Figura 7 – Tipos de mancais de rolamento classificados em função dos seus elementos rolantes: (A) Esferas, (B) Cilindros, (C) Agulhas, (D) Troncos de Cone. (Fonte: Google Images)

Mancais de Esferas (Figura 7 – A) possuem pequena área de contato entre as pistas interna e externa, o que faz com que a rotação seja suave. Porém, isso limita sua capacidade de suportar grandes esforços. São modelos tipicamente baratos, empregados em discos rígidos, polias, caixas de transmissão e eixos de motores.

Mancais de cilindros (Figura 7 – B) suportam maiores cargas que os rolamentos de esferas, mas perdem a capacidade de suportar cargas se os trilhos estiverem desalinhados. São empregados em transmissões, máquinas de vibração e em rodas de veículos ferroviários.

Mancais de agulhas (Figura 7 – C) são os mais compactos dos modelos de mancais de rolamento disponíveis. Possuem grande área de contato com a superfície dos trilhos, mas tendem a sofrer fadiga precoce. São tipicamente empregados em bombas, compressores e transmissões.

Mancais de troncos de cone (Figura 7 – D) suportam grandes cargas radiais e axiais. São comumente utilizados com velocidades moderadas, em aplicações que requerem alta durabilidade. São empregados em sistemas de eixos, caixas de transmissão e rodas de automóveis.

Embora os mancais de rolamento tendam a gastar-se com o tempo, em alguns casos é possível fazê-los durar mais que os outros componentes da máquina, desde que tomados os devidos cuidados. Resfriamento, limpeza, lubrificação adequada e utilização apenas nos limites de carregamento de projeto são medidas que ajudam a retardar a formação de defeitos nos componentes do mancal.

Os rolamentos são designados e normalizados por letras e números conforme imagens abaixo:

➤ Rolamento de esferas (4 caracteres)

Cod	Designação
1...	Rol. de esferas - tamanho normal
2...	Rol. de esferas - tamanho grande
3...	Esferas de contato oblíquo - 2 carreiras
4...	Esferas de contato radial - 2 carreiras
6...	Esferas de contato radial - 1 carreira
7...	Esferas de contato oblíquo - 1 carreira

6 3 0 8 ZZ C3S

➤ Rolamentos de rolos e axiais (5 caracteres)

Cod	Designação
2...	Rolamentos axial autocompensador de rolos
3...	Rolamentos de rolos cônicos
5...	Rolamentos axiais de esferas
N...	Rolamentos de rolos cilíndricos

- Designação do rolamento normalizado
- 2º caracter da referência: código do diâmetro
- Define as medidas externas do rolamento (diâmetro externo e largura).

6 3 0 8 ZZ C3S

- Designação do rolamento normalizado
- últimos 2 números da referência: código do furo
- Ex: para 20 mm < d < 100 mm
Número do eixo (2 números) = d/5

6 3 0 8 ZZ C3

Eixo = 40 mm
(= 8 X 5 mm)

Figura 8 – Designação e normalização de rolamentos.

Autor, 2014

- Designação do rolamento normalizado
- Símbolos complementares relativos para:

- ➔ A presença de blindagem
- ➔ A precisão de tolerâncias
- ➔ As folgas radiais internas
- ➔ O valor do ângulo de contato
- ➔ Das execuções particulares

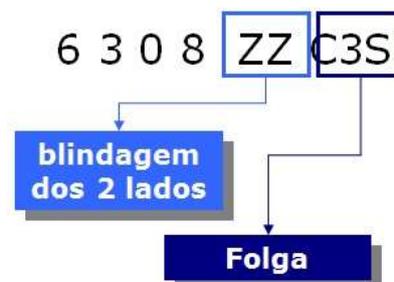


Figura 8 – Designação e normalização de rolamentos
Autor, 2014

■ Quadro resumo das aptidões dos rolamentos

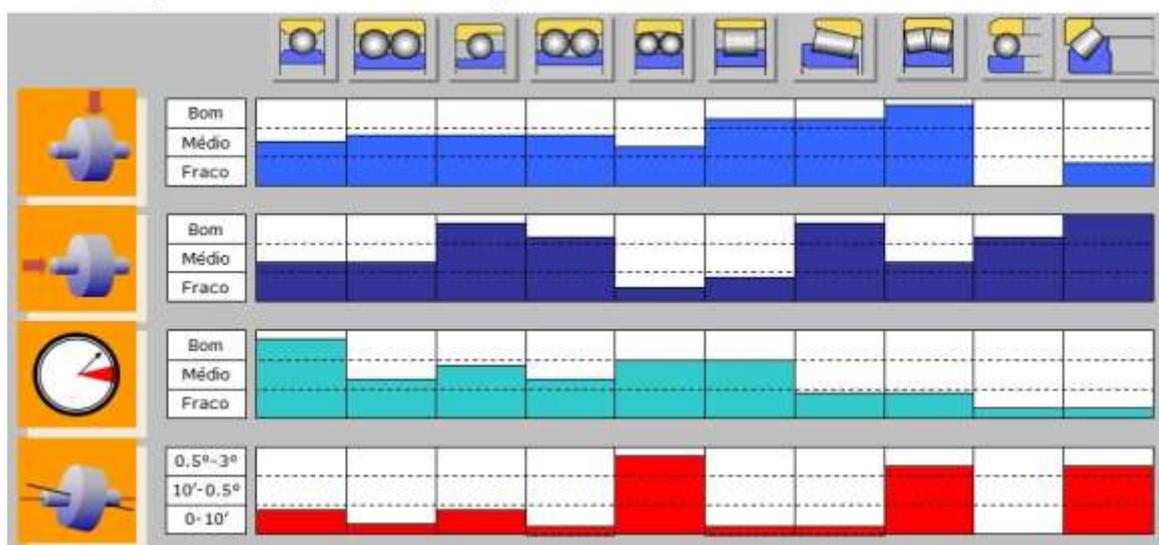


Figura 9 – Designação e normalização de rolamentos.
Autor, 2014

Segundo N.TANDON e A. CHOUDHURY[2,3], a presença de um defeito altera significativamente os níveis de vibração em um mancal. Logo, é necessário ter conhecimento dos tipos de defeitos e como esses são classificados. Defeitos em mancais podem ser divididos em locais ou distribuídos. Defeitos distribuídos podem ser exemplificados por rugosidades superficiais, ondulações, desalinhamento entre as pistas rolantes e elementos rolantes de tamanhos diferentes, montados de forma

incorreta. Esses são causados por erros nos processos de fabricação, instalação inadequada ou desgaste das partes.

De acordo com os autores supracitados, defeitos localizados são exemplificados por trincas, corrosões, lascas ou estilhaços nas superfícies em rotação. O modo de falha predominante em mancais de rolamentos é a fragmentação das pistas, causada a partir da geração de uma trinca por fadiga sob a superfície, a qual se propaga até a superfície do material, até que um pedaço deste se quebra, liberando uma lasca. A trinca por fadiga pode ser causada por um excesso de carga sobre o rolamento ou pela colisão devido ao carregamento durante a operação ou instalação. Outro tipo de falha é a erosão elétrica, causada pela abertura de arco no interior do rolamento durante sua operação. Além desses, podem-se destacar algumas causas comuns para ocorrência de falhas: seleção incorreta, defeito de fabricação, montagem incorreta e lubrificação inadequada.

Sempre que um defeito local em um elemento interage com outro elemento em contato, mudanças abruptas no contato dessa interface resultam na geração de pulsos de duração muito curta. Tais pulsos produzem vibrações e ruídos que podem ser monitorados a fim de detectar-se a presença de defeitos no rolamento. Os defeitos costumam evoluir de forma lenta, de modo que os mancais emitem sinais com bastante antecedência à falha final. As Figuras 10 e 11 exemplificam dois tipos de falhas localizadas.

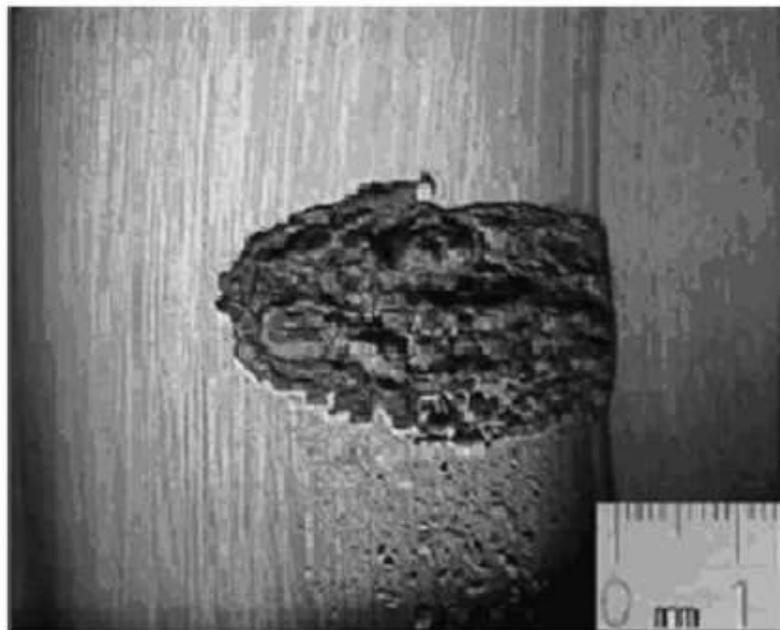


Figura 10 - Falha localizada na pista interna de um mancal de esferas (SAWALHI et al., 2007).

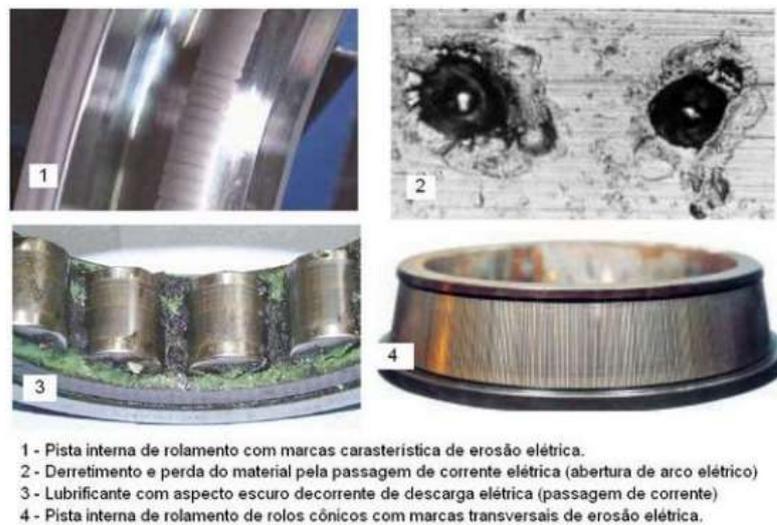


Figura 11 - Falha na pista interna de um mancal de cilindros devido à erosão (SAWALHI et al., 2007).

3. Referencial Teórico

3.1. Gestão de Ativos

A gestão de ativos tem como principal objetivo garantir que as decisões quanto aos seus ativos sejam as melhores possível etapas desde o primeiro plano de compra dos equipamentos até a hora da disposição dos mesmos, ou seja, durante toda a vida útil desse item. Segundo [Hardwick John, 2012] as etapas que a gestão deve acionar são:



Figura 12 – Ciclo de vida útil de um ativo.

Cada empresa possui sua política de aquisição de equipamentos e um plano para seu descarte, essas etapas tem sua importância no processo de coordenação de ativos, porém são mais facilmente implantadas e alteradas de acordo com a estratégia principal da empresa, uma vez que são geralmente decisões tomadas pela alta gerência.

De acordo com o ex-presidente (2013) da Abramam (Associação brasileira de manutenção), João Lafraia, as etapas de operação e manutenção, são consideradas os pontos chaves na gestão de ativos em uma companhia. Como a manutenção e o uso dos equipamentos em uma fábrica engloba um grande número de recursos humanos, é necessário entender que o sucesso desses itens está diretamente ligado à cultura e ao comportamento dos mesmos.

A gestão de ativos tem como principal objetivo garantir que as decisões quanto aos seus ativos sejam as melhores possíveis e para tal é necessário atuar e controlar todas as etapas desde o primeiro plano de compra do equipamentos até a hora da disposição do, ou seja, durante toda a vida útil desse item. Segundo [Hardwick John, 2012] as etapas que a gestão deve acionar são:

Segundo NASCIF (2012), na Gestão de Ativos o gerenciamento pelas diretrizes é realizado pelo sistema de gestão que se baseia no estabelecimento de um plano estratégico que prevê ações de curto, médio e longo prazo, promovendo verificar a visão e direcionar os rumos de uma organização para o sucesso do negócio. Segundo Nascif a figura 4 apresenta fluxo principal do modelo de gestão de ativos. Esse conjunto de ações pondera principalmente por resultados duradouros, utilização do melhor custo garantindo a disponibilidade dos ativos para a produção, previsibilidade de problemas com a estabilização da rotina e implantação de melhorias aumentando a competitividade. A Engenharia de Manutenção “é o conjunto de atividades que permite que a confiabilidade seja aumentada e a disponibilidade garantida” (XAVIER, 2003). Ou seja, é deixar de ficar consertando, mas melhorar padrões e 26 sistemáticas, desenvolvendo a manutenibilidade, dar realimentação ao projeto e interferir tecnicamente nas compras. Quem só faz a manutenção corretiva continua “apagando incêndio” e alcançando péssimos resultados. Desta forma, a organização que utilizar a manutenção corretiva, mas incorporando a preventiva e a preditiva, rapidamente estará executando a Engenharia de Manutenção. Para Nascif (2012) a missão da manutenção é o conjunto de atividades que venham a garantir a disponibilidade e a confiabilidade dos ativos a fim de

atender a um programa de produção ou prestação de serviços com segurança, preservação ao meio ambiente e com custos adequados. Para KARDEC (2001), a Engenharia de Manutenção é uma mudança cultural necessária em qualquer Manutenção que busque a melhoria dos resultados. Segundo ele a Engenharia de Manutenção significa, dentre outras:

- Praticar a análise de falhas de modo a eliminar as causas de mau desempenho (atuar na causa básica);
- Atuar efetivamente em materiais e sobressalentes;
- Desenvolver procedimentos de trabalho (juntamente com a execução);
- Treinar o pessoal nos Padrões;
- Participar dos projetos de obras novas e melhorias.

3.2. Análise de Vibração

A vibração da máquina está relacionada à movimentação para frente e para trás de seus componentes em reação às forças internas e externas. As forças internas são produzidas no interior da máquina, tais como desbalanceamentos e desalinhamentos. As forças externas são produzidas a partir da influência de máquinas próximas por meio da vibração do solo, tubulação e até mesmo do ar.

3.2.1 Tipos de Movimento

O movimento físico do equipamento pode ser harmônico, periódico e ou randômico. Todo movimento harmônico e periódico, porém nem todo movimento periódico é harmônico.

3.2.2 Movimento Periódico

É um movimento oscilatório que pode repetir-se regularmente, como no pêndulo de um relógio, ou apresentar irregularidade considerável, como em terremotos. Quando o movimento se repete a intervalos regulares de tempo e denominado movimento periódico.

3.2.3 Movimento Harmônico

É a forma mais simples de movimento periódico. Uma massa suspensa por uma mola, quando deslocada de sua posição de equilíbrio, irá oscilar em torno desse ponto de equilíbrio com um movimento Harmônico Simples. Se for construído um gráfico que relaciona a distância da massa a posição de equilíbrio e o tempo, a curva obtida será semelhante a da Figura 13. Esse movimento pode ser expresso pela equação:

$$x = A \cdot \text{sen} \frac{2 \cdot \pi \cdot t}{T} \quad (1)$$

Movimento Harmônico Simples pode ser representado como a projeção numa linha reta de um ponto que se move numa circunferência a velocidade constante, conforme mostrado na Figura 14. A velocidade angular da linha ω e o deslocamento x são expressos pela equação 2. A velocidade angular ω é dada pela equação 3, onde T é o período e f a frequência.

$$x = A \cdot \text{sen} \omega t \quad (2)$$

$$\omega = 2 \pi / T \text{ ou } \omega = 2 \pi f \quad (3)$$

Como mostrado na equação 3, a velocidade angular é expressa em radianos por segundo, uma vez que em um período, ou ciclo, a partícula em oscilação percorre uma circunferência completa, ou 2π radianos, e o período é expresso em segundos.

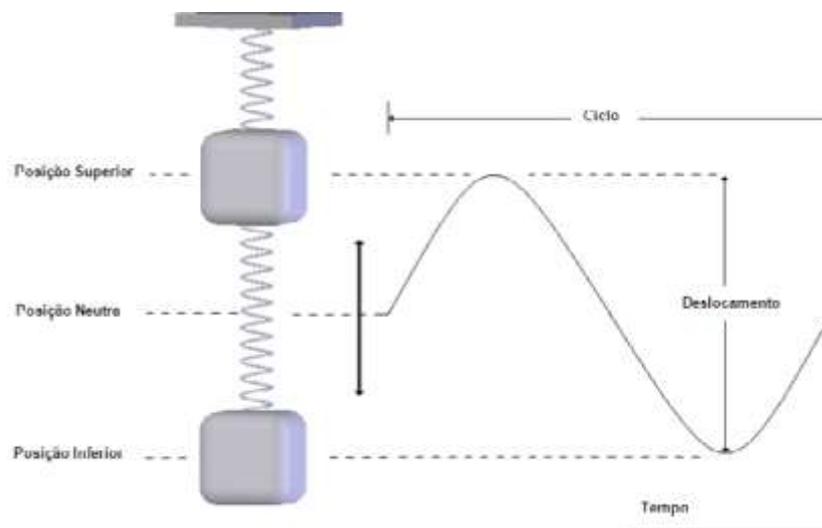


Figura 13 - Movimento harmônico simples.

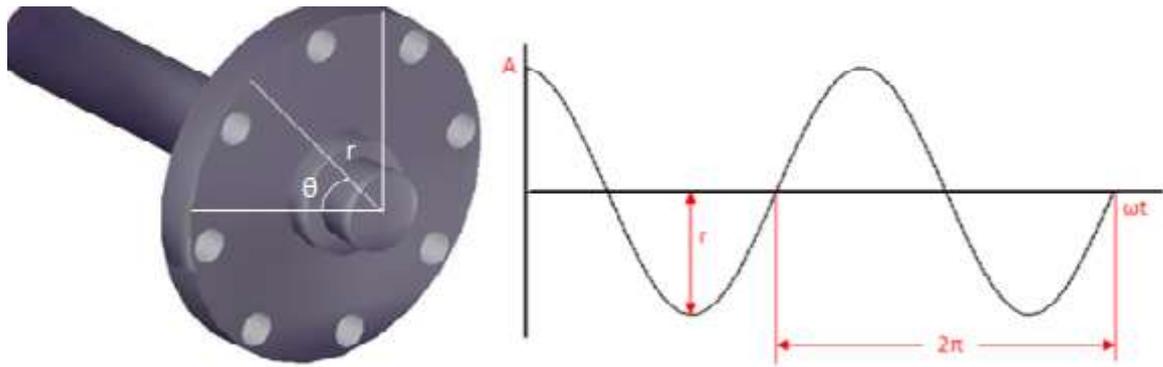


Figura 14 - Movimento Harmônico Simples: Projeção de um Ponto.

3.2.4 Movimento Randômico Aleatório

É o movimento que ocorre de uma maneira aleatória e contém todas as frequências em uma banda específica de frequência, podendo também ser chamado de ruído. Movimento randômico é cada movimento que não é repetido, por exemplo, turbulências na tubulação ou o fenômeno de cavitação em uma bomba hidráulica.

Os Movimentos Randômicos são impossíveis ou muito grosseiros para representá-los por funções matemáticas. Geralmente são estudados por suas propriedades médias ou estatísticas.

3.2.5 Vibração em Máquinas

Nenhuma máquina pode ser representada de modo exato por um sistema massa-mola. Na realidade, uma máquina se compõe de vários sistemas massa-mola interagindo entre si. Entretanto, os princípios básicos do sistema massa-mola ainda têm aplicação.

Na Figura 13, o peso ou massa pode representar um componente da máquina que está se movendo sob a ação de uma força. A mola pode representar as restrições nas quais a massa se move. A mola pode ser considerada uma força restauradora que de acordo com os movimentos da massa gera uma força para compensá-los. Esta interação entre movimento e força é que causa a vibração.

Vibração é movimento de um corpo sobre um ponto de referência, causado por uma força mecânica indesejável. A vibração é uma resposta mensurável às forças que agem sobre a máquina e pode ser representada pela equação 4.

$$\text{Resposta (Amplitude de Vibração)} \propto \frac{\text{Força Dinâmica}}{\text{Resistência Dinâmica}} \quad (4)$$

Em máquinas rotativas, as forças aplicadas ao eixo se transmitem através dos mancais. Quando o eixo gira, ele é empurrado contra o mancal. O mancal tenta forçar o eixo a voltar a sua posição neutra. Quando maior o desvio ou defeito, como desbalanceamento, maior é a força aplicada e mais alta será o nível de vibração. As vibrações são respostas às forças de excitação.

Medindo as vibrações pode-se avaliar indiretamente a intensidade das forças e a severidade dos defeitos, como um processo de causa e efeito.

Levando em consideração a ideia de que todas as máquinas vibram, um nível de vibração dentro dos limites aceitáveis, segundo normas técnicas, indica que o equipamento está funcionando corretamente.

Quando a vibração começa a aumentar, a máquina está caminhando para uma possível falha. A existência de um nível alto de vibração nem sempre indica que há um problema na máquina.

Nem toda vibração é destrutiva, mas é necessário identificar e corrigir aquelas vibrações indesejáveis, que resultarão em falhas na máquina. Estas vibrações são sintomas de forças que podem causar desgaste em mancais, problemas estruturais ou ruídos.

3.2.6 Domínio do Tempo

A forma de onda e a representação do sinal no Domínio do Tempo. Ela mostra o que está acontecendo a cada instante no tempo.

O exame da forma de onda pode revelar detalhes importantes das vibrações que não são visíveis nos espectros de frequência. Sua principal aplicação é identificar a ocorrência de eventos de curta duração, como impactos, e determinar a sua taxa de repetição.

Na Figura 15, tem-se a forma de onda de um rolamento com falhas pontuais externas, mostrando o sinal variando no tempo.

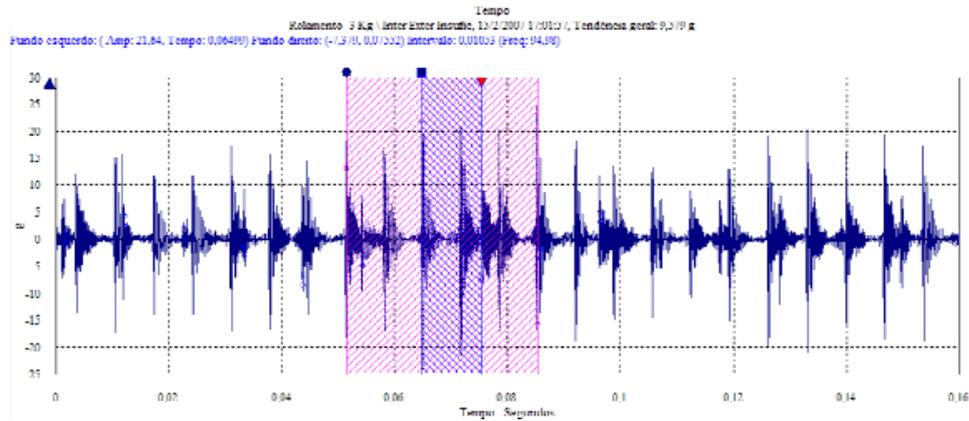


Figura 15 – Forma de onda.
Do Autor (2015)

Analisar a própria forma de onda no tempo pode ser muito complexo, trabalhoso e às vezes inviável, quando existem muitas componentes do sinal.

A exibição no Domínio da Frequência é uma das técnicas mais eficazes para o monitoramento de condição de máquinas.

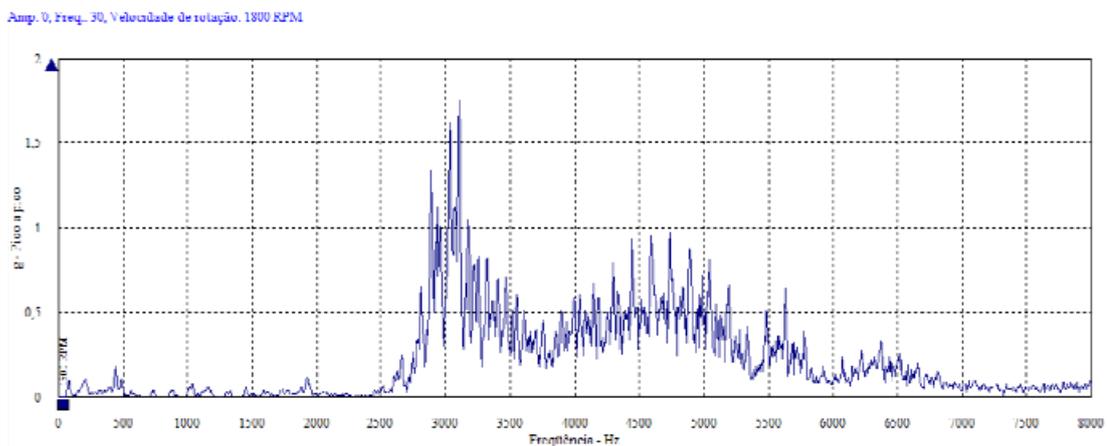


Figura 16 – Exemplo espectro de vibração.
Do Autor (2015)

Os coletores portáteis de dado-analisadores utilizam a Transformada Rápida de Fourier ou FFT (Fast Fourier Transform). A FFT transforma os dados no domínio do tempo em dados no domínio da frequência.

3.2.7 Domínio da Frequência

Com o advento da **Transformada Rápida de Fourier** (Fast Fourier Transform - FFT), o trabalho de obtenção de bandas espectrais tornou-se mais eficiente. Sua finalidade consiste em permitir a mudança em um sinal obtido no domínio do tempo para o domínio da frequência. Isso se faz necessário uma vez que, em geral, os gráficos obtidos no domínio do tempo contêm um excesso de informação, já que são influenciados por diferentes amplitudes que se repetem em diferentes períodos de tempo. Ocorre então, a superposição de diferentes amplitudes oriundas de ressonâncias excitadas nos componentes do mancal, tornando o sinal excessivamente complexo. Com a mudança de domínio, é possível filtrar o sinal evitando essa repetição e superposição das amplitudes. A Figura 17, abaixo, mostra um desenho esquemático representativo de tal mudança.

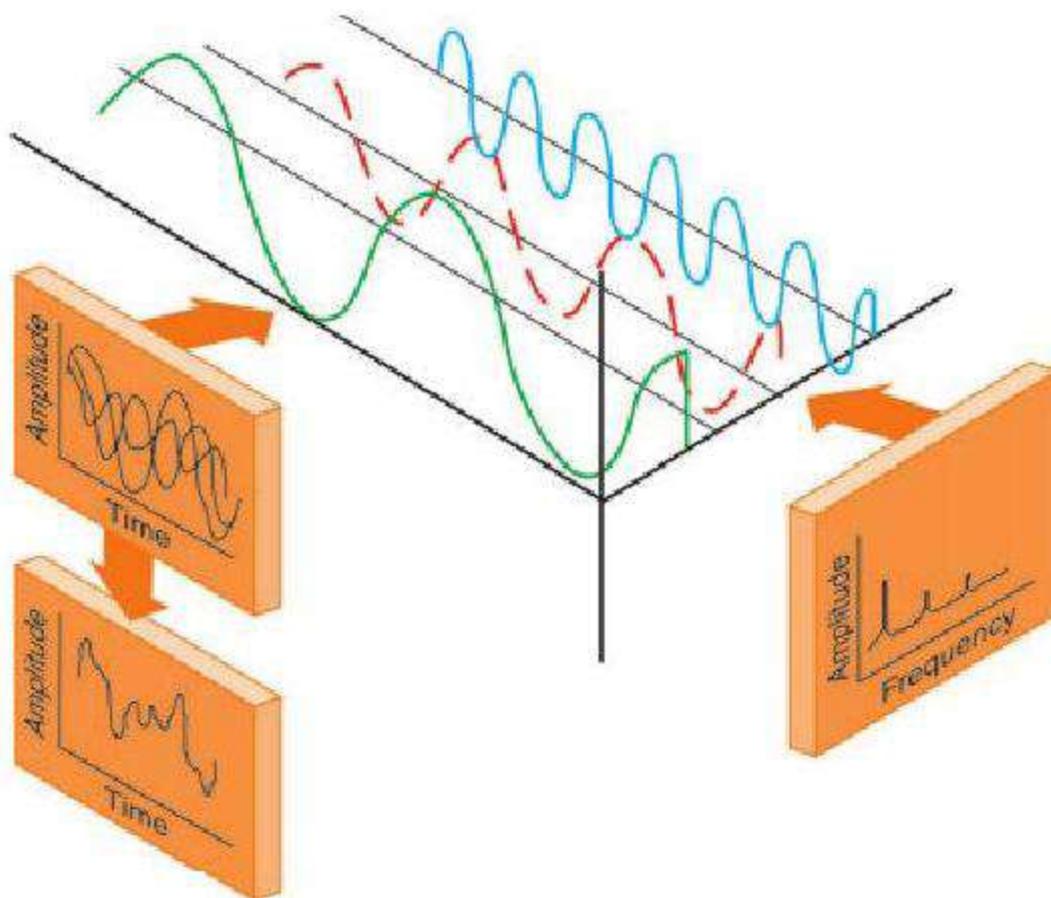


Figura 17 – Transformada rápida de Fourier

3.2.8 Frequência e Período

A maioria das análises de vibração é realizada usando-se o espectro de frequência. Para um motor desbalanceado, é muito mais fácil pensar no rotor em termos de rotações, ou ciclos por minuto ou por segundo (frequência), do que em termos de tempo necessário para a realização de uma rotação (período).

O relacionamento entre a frequência e o tempo é bastante simples. A seguir tem-se a relação entre eles.

- A frequência (rotações por segundo) = $1 / \text{período (em segundos)}$.
- O período (em segundos) = $1 / \text{frequência (rotações por segundo)}$.

A unidade de frequência mais comum utilizada no monitoramento da condição e na análise de máquinas giratórias é a de ciclos por minuto (CPM). Isto devido à relação existente entre essa unidade e a rotação do eixo. Um motor desbalanceado, que funciona a 1850 RPM, produzirá uma força vibratória na sua velocidade giratória de 1850 CPM.

A análise acústica e a análise estrutural usualmente apresentam a frequência em ciclos por segundo, ou Hertz. Qualquer uma das unidades de frequência pode ser utilizada. Para evitar confusão, após adotar uma delas, a mesma deverá ser sempre usada.

A relação entre CPM e Hertz é simples. Para fazer a conversão de Hertz para CPM ou RPM, multiplique o valor por 60. Para fazer a conversão de CPM para Hertz, divida o valor por 60 (segundos por minuto).

3.2.9 Amplitude e Frequência

Quando se analisa a vibração de um equipamento, através de análise espectral, busca encontrar dois componentes dos sinais de vibração, a amplitude e a frequência. A frequência fornece a fonte de vibração do equipamento e a amplitude a sua severidade.

A amplitude e a magnitude do sinal da vibração. A amplitude do sinal de vibração indica a gravidade da falha. Quanto maior for a amplitude, maior será o problema. A amplitude dependerá do tipo de máquina e sempre estará relacionada ao nível de vibração de uma máquina sem defeitos.

A frequência e o número de vezes em que ocorre o ciclo de vibração do sinal em um determinado espaço de tempo. A frequência na qual a vibração ocorre indica o tipo de falha. As falhas mecânicas geralmente produzem frequências determinísticas. Por se estabelecer a frequência em que uma vibração ocorre, pode-se determinar precisamente a causa e a fonte de tal vibração.

É importante reiterar a relação “causa e efeito”. Se, por exemplo, for identificada a falha em um dado rolamento através da identificação de suas frequências determinísticas de falhas, na maioria das vezes, não significa que o rolamento em si é a fonte do problema.

Geralmente, existe outro problema mecânico causando os danos no rolamento. Ao se detectar esse defeito, o analista deve automaticamente investigar outros sintomas de falhas na máquina, tais como o desalinhamento ou desbalanceamento.

3.2.10 Tipos de Medição de Vibração

As três unidades básicas de medição de vibração são: o deslocamento, a velocidade e a aceleração.

O deslocamento refere-se à mudança, em termos de distância ou posição, de um objeto em relação a um ponto referencial. Neste caso, a posição neutra de uma massa. A magnitude do deslocamento é chamada amplitude. Quando maior for a amplitude do sinal da vibração, mais severa será a vibração.

O deslocamento representa uma distância. É a forma de medição indicada para vibrações em máquinas de baixa frequência, geralmente menores que 10 Hz (600 RPM). O deslocamento é normalmente medido em micrão e como um valor pico a pico (P-P), Figura 18.

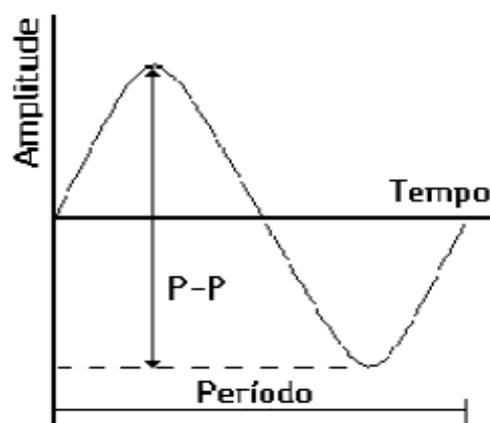


Figura 18 – Forma de onda de deslocamento.

Exemplificando, em um eixo de um mancal de escorregamento o deslocamento refere-se a distancia total de movimento de um eixo dentro da folga do mancal ou ainda, a distancia total do limite inferior para o limite superior.

A velocidade e a taxa de mudança de deslocamento. A medida em velocidade e excelente de problemas de vibração em maquinas de velocidade media, como por exemplo, desbalanceamento, desalinhamento, folgas mecânicas e defeitos em rolamento, em situações de falhas avançadas.

A velocidade mede a rapidez com que vibração gerada se desloca. E amplamente usada para medição de vibrações para propósitos gerais em maquinas que funcionam numa faixa de frequência intermediaria entre 10 Hz a 1500 Hz (600 a 90.000 RPM). Para se determinar a severidade da vibração, normalmente mede-se a velocidade mais alta, ou o “pico”, dado em mm/seg ou pol/seg.

A aceleração, medida em G's, mm/seg² ou pol/seg², e a forma de medição indicada para analises em altas frequências, em torno de 5000 Hz (300.000 RPM), como em redutores de alta velocidade e em rolamentos. A aceleração e normalmente medida em unidades de pico ou RMS, dependendo dos padrões que estejam sendo utilizados.

3.2.11 Frequência de Rotação

Quando se analisa um sinal de vibração obtido em um mancal qualquer, é necessário que se conheça a rotação do eixo apoiado sobre este mancal, a fim de identificar no espectro os sinais consequentes da rotação. Um sinal de vibração na

frequência de rotação da máquina é o sinal mais certo de se obter, uma vez que o mesmo é causado pelo movimento de giro do eixo. Sendo assim, usa-se esse sinal como referência para orientação na análise do espectro, considerando todos os outros sinais em relação a ele (Fupai, 2000).

Em se tratando de motores elétricos, têm-se a velocidade de rotação padrão conforme o número de polos. Essas rotações são:

- a) 8 polos = 900 rpm;
- b) 6 polos = 1200 rpm;
- c) 4 polos = 1800 rpm;
- d) 2 polos = 3600 rpm.

Como os espectros são analisados no domínio da frequência, é necessário que se faça a conversão da rotação de rpm para Hertz ou rps. Isso se faz dividindo a rotação em rpm por 60. Então, tem-se:

- a) 900 rpm = 15 Hz;
- b) 1200 rpm = 20 Hz;
- c) 1800 rpm = 30 Hz;
- d) 3600 rpm = 60 Hz.

Deve-se considerar que devido ao escorregamento causado pela inércia de massa dos rotores, a velocidade de rotação é sempre um pouco abaixo dos valores padrão, o que não impede, no entanto, de identificar facilmente a frequência fundamental de rotação da máquina em seu espectro (Fupai, 2000).

3.2.12 Falha em Rolamentos

Os rolamentos são os elementos de máquinas mais comuns na indústria. Muitas vezes eles são os componentes de maior precisão do equipamento. São poucos os rolamentos que atingem a sua vida de projeto, em função de uma variedade de fatores, principalmente, segundo Almeida (1990):

- a) lubrificação inadequada;
- b) contaminação por partículas estranhas;
- c) armazenagem imprópria;
- d) umidade;
- e) vibração externa;
- f) erro de aplicação;
- g) montagem imprópria.

Os mancais de rolamento são os elementos de máquinas mais estudados e pesquisados em relação à vibração, pois dificilmente encontram-se equipamentos em que estes elementos não estejam presentes (Almeida, 1990).

As quatro frequências características dos rolamentos, são, segundo Almeida (1990):

- a) frequência de defeito da pista externa;
- b) frequência de defeito da pista interna;
- c) frequência de defeito da gaiola;
- d) frequência de defeito dos elementos rolantes.

Os desgastes em rolamentos progridem em quatro estágios. Primeiramente os defeitos aparecem em frequências altas, isto é, entre 20 e 60 KHz. No segundo estágio, os defeitos excitam frequências naturais dos componentes do rolamento, entre 500 Hz a 2 KHz, em função dos impactos gerados pela passagem dos elementos rolantes. Com o aumento do desgaste, surgem harmônicas das frequências discretas e bandas laterais com espaçamento de uma vez a rotação da máquina. No último estágio, quando os defeitos são severos, fortes impactos excitam frequências naturais, em função da passagem dos elementos rolantes pela pista, principalmente pela zona de carga (Fupai, 2001).

Rolamentos com defeitos em suas pistas e elementos rolantes, normalmente causam vibrações em altas frequências, que não são múltiplos da rotação do eixo. Isto ocorre em função das forças dinâmicas excitando o rolamento defeituoso

proporcionando vibrações. Por exemplo, uma esfera defeituosa passará pelas pistas interna e externa em uma sucessão de impactos, com o dobro da frequência de rotação da esfera, onde sua frequência de vibração será maior que a do eixo. A amplitude da vibração dependerá da gravidade do defeito no rolamento. No caso dos defeitos na gaiola do rolamento, estes geram vibrações com frequências mais baixas que a frequência de rotação do eixo (Fupai, 2001).

3.2.13 Níveis de Alarme de Vibração

As vibrações podem ser normais no equipamento, ou seja, o equipamento pode estar recebendo vibrações inerentes ao seu funcionamento, não representando nenhum motivo de alarme. Para isso, é necessário que as vibrações mantenham-se dentro de limites aceitáveis. Quando se tem um histórico de medições em um equipamento e observa-se a estabilidade dos sinais em seu espectro, tem-se uma condição operacional normal do equipamento e seu espectro é a sua assinatura espectral (Fupai, 2000).

O aumento dos níveis normais de vibração em um equipamento é o primeiro sinal de alguma falha. Em função disto, é necessário um monitoramento constante para detectar qualquer alteração no comportamento do equipamento (Fupai, 2000).

Para definição dos níveis de alarmes globais de vibração, dos exaustores de fornos de fábrica de cimento e segundo a configuração definida, tem-se como referência a norma ISO 10816-1.

VIBRATION SEVERITY PER ISO 10816					
Machine		Class I small machines	Class II medium machines	Class III large rigid foundation	Class IV large soft foundation
in/s	mm/s				
Vibration Velocity Vrms	0.01	0.28			
	0.02	0.45			
	0.03	0.71	good		
	0.04	1.12			
	0.07	1.80			
	0.11	2.80	satisfactory		
	0.18	4.50			
	0.28	7.10	unsatisfactory		
	0.44	11.2			
	0.70	18.0			
	0.71	28.0	unacceptable		
	1.10	45.0			

Figura 19 – Norma ISO 10816-1.

3.3 Manutenção Centrada em Confiabilidade

A Manutenção Centrada em Confiabilidade (MCC) pode ser definida como “um processo usado para determinar o que deve ser feito, para assegurar que qualquer ativo físico, continue a fazer o que seus usuários querem que ele faça no seu contexto operacional” (MOUBRAY, 2000, p. 7). Pode-se dizer que a Manutenção Centrada em Confiabilidade, é uma metodologia utilizada para definição das tarefas de manutenção mais adequadas para um equipamento, onde seu objetivo principal é assegurar que o equipamento continue desempenhando suas funções desejadas.

3.3.1 Metodologia MCC

A metodologia de implantação da MCC tem a aplicação fundamental de sete questionamentos realizados em uma ordem sequencial, cujas respostas corretas, irão fornecer dados como: planos de manutenção eficazes e oportunidades de melhorias. As setes questões clássicas da MCC, são, segundo Moubray (2000), Nascif (2001) e Kardec (2001):

- a) quais as funções e os padrões de desempenho associados ao equipamento em seu contexto operacional ?
- b) de que forma o equipamento falha ao cumprir suas funções ?
- c) o que causa cada falha funcional ?
- d) o que acontece quando ocorre cada falha ?
- e) de que forma cada falha importa ou quais são as consequências da falha?
- f) o que pode ser feito para prevenir cada falha ?
- g) o que deve ser feito se não for encontrada uma tarefa para prevenir a falha ?

O processo de implantação da MCC deve garantir que todas as perguntas sejam respondidas satisfatoriamente e na sequência apresentada.

De um modo geral, a aplicação da MCC é realizada por intermédio do desenvolvimento das etapas, que inclui a delimitação do sistema, definições das

funções e padrões de desempenho, identificação das falhas funcionais, aplicação da Análise dos Modos de Falha e seus Efeitos (FMEA), classificação das consequências das falhas e seleção das tarefas de manutenção.

3.3.2 Metodologia FMEA

A Análise dos Modos de Falha e seus Efeitos (FMEA) é uma das principais ferramentas utilizadas no desenvolvimento de uma análise da MCC. Segundo a norma SAE J1739 (2002), FMEA é um conjunto de atividades sistemáticas que objetiva:

- a) identificar e avaliar as falhas potenciais de um processo e os efeitos das falhas;
- b) definir as ações que possam eliminar ou reduzir a probabilidade de uma falha ocorrer;
- c) documentar o processo.

Segundo a norma ABNT (1994), FMEA é um método qualitativo de análise de confiabilidade, que envolve o estudo dos modos de falha que podem existir para cada item e a determinação dos efeitos de cada modo de falha. No entanto, pode-se ter na análise de um determinado item, a necessidade da avaliação da importância do modo de falha na questão operacional. Nestes casos uma variação da metodologia FMEA pode ser utilizada por intermédio da Análise dos Modos de Falha e seus Efeitos e sua Criticidade (FMECA). Esta metodologia se diferencia da primeira pelo motivo de apropriar a cada modo de falha, um índice de criticidade que servirá de orientação para priorização das ações a serem tomadas para prevenção ou mitigação das falhas (RIGONI, 2009). O índice de prioridade da FMECA chama-se: Número de Prioridade de Risco (NPR) e é obtido pelo produto dos fatores de Severidade (S), Ocorrência (O) e Detecção (D), logo:

$$\mathbf{NPR = Severidade \times Ocorrência \times Detecção}$$

Quanto maior for o valor do NPR, maior será a criticidade do modo de falha em relação ao processo de manutenção. Os fatores que fazem parte do NPR resultam

da classificação comparativa dos modos de falha e segundo Rigoni (2009), Kardec (2001) e Nascif (2001) levam em consideração os seguintes conceitos:

a) severidade: reflete o grau de gravidade dos efeitos da falha. A faixa de valores varia de 1 a 10, onde 10 representa a maior gravidade;

b) ocorrência: reflete a probabilidade de ocorrência do modo de falha. A faixa de valores varia de 1 a 10, onde 10 representa a maior probabilidade de ocorrência;

c) detecção: reflete a dificuldade em se identificar as causas do modo de falha a tempo de prevenir uma falha funcional. A faixa de valores varia de 1 a 10, onde 10 representa a maior dificuldade de detectar as causas do modo de falha.

Tem-se no quadro 1, parâmetros utilizados para classificação dos fatores do NPR, ou seja, dados para estimar os índices de severidade, ocorrência e detecção, bem como o índice de risco.

Componente do NPR	Classificação	Peso
Severidade (S)	Apenas perceptível	1
	Pouca importância	2 a 3
	Moderadamente grave	4 a 6
	Grave	7 a 8
	Extremamente Grave	9 a 10
Componente do NPR	Classificação	Peso
Ocorrência (O)	Improvável	1
	Muito Pequena	2 a 3
	Pequena	4 a 6
	Média	7 a 8
	Alta	9 a 10
Componente do NPR	Classificação	Peso
Detecção (D)	Alta	1
	Moderada	2 a 5
	Pequena	6 a 8
	Muito pequena	9
	Improvável	10
NPR	Classificação	Peso
Índice de Risco (NPR)	Baixo	1 a 50
	Médio	50 a 100
	Alto	100 a 200
	Muito alto	200 a 1000

Quadro 1 – Parâmetros para classificação dos fatores do NPR

Fonte: Kardec e Nascif (2001)

3.3.3 Funções e Padrões de Desempenho

A primeira etapa do processo da MCC é a definição da função e dos parâmetros de desempenho do equipamento. O equipamento quando adquirido e colocado em operação, espera-se que o mesmo execute uma determinada função ou conjunto de funções desejadas. Deste modo, ao se implantar um processo de MCC em um equipamento, o objetivo deve ser a conservação da capacidade do equipamento em realizar suas funções esperadas. Em boa parte dos casos, o equipamento apresentará mais de uma função, sendo necessário a classificação em primárias e secundárias (MOUBRAY, 2000).

Dentro do conceito de função, é importante a especificação dos parâmetros de desempenho, que farão parte da função, pois indicam o nível de aceitabilidade da função exercida pelo equipamento. Tem-se na figura 20, a indicação de um valor padrão de desempenho e uma faixa de operação, onde a falha é caracterizada quando o desempenho ultrapassa os limites estabelecidos.

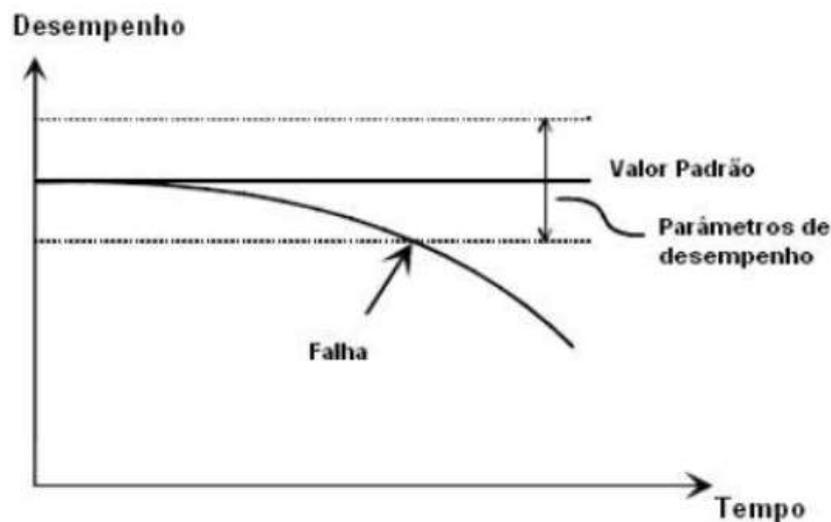


Figura 20 - Falha em relação aos parâmetros de desempenho.

Fonte: Moubroy (2000).

A participação efetiva dos usuários nas atividades de definição das funções e dos parâmetros de desempenho é de extrema importância, pois representam excelentes fontes de informação nesta questão. “A definição de uma função deve consistir de um verbo, um objeto e um padrão de desempenho” (MOUBRAY, 2000).

3.3.4 Modos de Falha

Modo de falha pode ser um evento que causa uma falha funcional ou um possível estado de falha de um item, para dada função requerida. O modo de falha retrata um evento que provoca a transição do estado normal para o estado de falha em um equipamento, estando normalmente ligado a um componente do equipamento em questão. O modo de falha é a forma de registro do mecanismo de falha, isto é, descrevem como as falhas funcionais acontecem. Desta forma, o modo de falha deve ser observado como um fator mais importante dentro do processo de manutenção, onde mostra parâmetros sobre a forma mais adequada de prevenção da falha funcional (SIQUEIRA, 2005).

É importante separar os conceitos referentes a modo de falha e causa da falha. O primeiro descreve o que está errado na funcionalidade do item e a causa tem um papel explicativo do por que da falha ter acontecido. A manutenção deve focar na atuação das causas das falhas, com o objetivo de evitar reincidência do modo de falha (SIQUEIRA, 2005).

Para uma adequada política de gerenciamento de falha, é importante que os modos de falha, sejam definidos de forma detalhada (MOUBRAY, 2000).

3.3.5 Efeitos da Falha

Efeito de uma falha pode ser compreendido como a descrição do que acontece quando ocorre um modo de falha. O efeito da falha indica o que poderia acontecer em consequência a um evento de modo de falha, em relação à parada de produção, risco a segurança, danos ao meio ambiente e impactos financeiros. A clara definição deste conceito mostra o objetivo desta etapa da análise da MCC, em avaliar os impactos dos modos de falha nas funções do equipamento e no desempenho para o processo produtivo (MOUBRAY, 2000).

Segundo Moubray (2000), a descrição dos efeitos de uma falha, deve conter informações suficientes para avaliar os seguintes aspectos:

- a) evidência da falha, isto é, como é percebido o efeito;
- b) impacto na segurança e no meio ambiente, isto é, como a falha pode afetar a segurança das pessoas ou causar danos ao meio ambiente;
- c) impacto operacional, isto é, como a falha afeta a produção;

d) impacto econômico, isto é, perdas financeiras em decorrência da falha;

e) forma de reparo, isto é, ações necessárias para restaurar a função do sistema após a falha.

A classificação dos modos de falha em grau de prioridade encerra a parte de avaliação dos efeitos da falha. Tem-se para cada modo de falha, o índice conhecido por Número de Prioridade de Risco (NPR).

3.3.6 Efeitos da Falha

Nesta fase tem-se a classificação dos efeitos da falha, onde o objetivo é priorizar o tratamento das falhas funcionais, com atenção para o processo de manutenção na prevenção dos modos de falha.

As consequências da falha são mais importantes do que as suas características técnicas, onde o processo de manutenção tende a evitar ou reduzir as consequências da falha, ao invés de prevenir as próprias falhas (MOUBRAY, 2000).

A classificação dos modos de falha é por intermédio de duas ações: a primeira em determinar se a falha funcional tem efeito significativo para o processo e a segunda classificar seus modos de falha, levando em consideração os impactos nos aspectos de segurança, meio ambiente, operação e economia do processo produtivo. As ações são realizadas por intermédio da utilização de uma lógica estruturada, em que se aplica um grupo de questões objetivas. As respostas determinam a direção do fluxo da análise e conseqüentemente a classificação da função e das consequências dos modos de falha (RIGONI, 2009).

Tem-se na figura 21, a lógica de seleção de funções significantes.

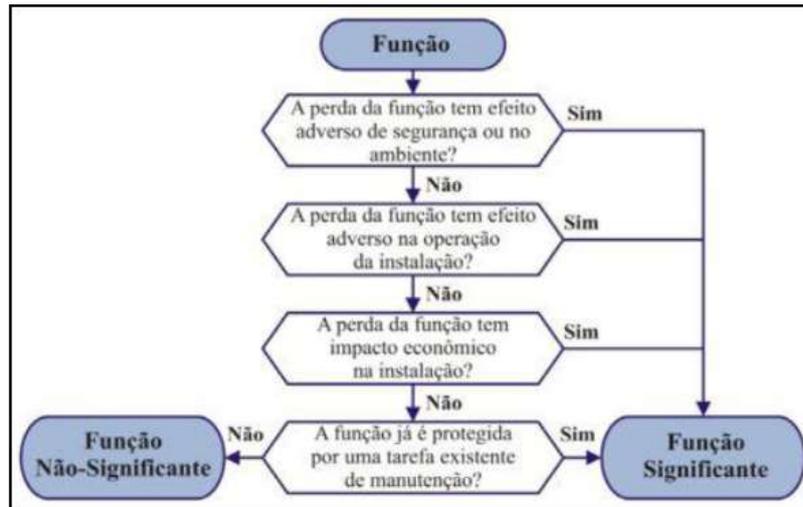


Figura 21 – Lógica de seleção de funções significantes

Fonte: Rigoni (2009).

Segundo Moubray (2000), as funções significantes, deverão ter seus respectivos modos de falha classificados em função das consequências das falhas, são elas:

- a) falha evidente ou oculta, isto é, modos de falha evidentes que são perceptíveis em condições normais de operação e modos de falha ocultos que não são perceptíveis;
 - b) consequências de segurança e meio ambiente, isto é, falhas que podem causar ferimentos ou morte a alguma pessoa e danos ao meio ambiente;
- Tem-se na figura 22, a lógica de classificação das consequências da falha.

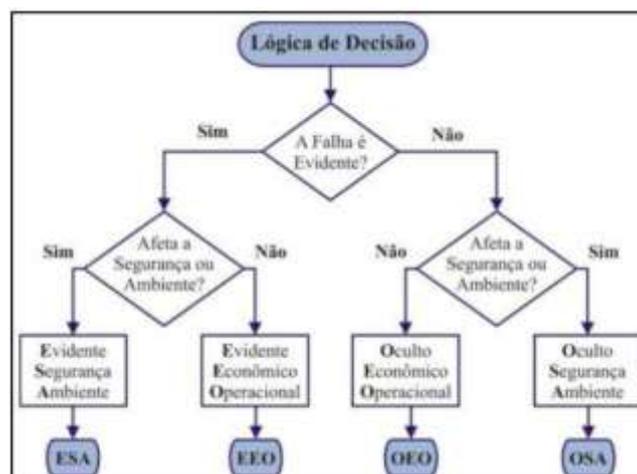


Figura 22 – Lógica de classificação das consequências da falha.

Fonte: Rigoni (2009).

3.3.7 Seleção das Tarefas de Manutenção

O objetivo desta etapa é determinar as tarefas de manutenção mais apropriadas para um equipamento, visando evitar a ocorrência de falhas funcionais ou reduzir suas consequências. A metodologia da MCC estabelece uma lógica de decisão estruturada, considerando a aplicabilidade técnica e efetividade de cada tarefa. O processo busca definir a melhor escolha, focando a redução de custos e operação do processo, tendo como alvo o atendimento pleno das questões de segurança pessoal e meio ambiente (SIQUEIRA, 2005).

A Manutenção Centrada em Confiabilidade estabelece quatro diagramas lógicos para seleção das tarefas de manutenção. Cada um destes diagramas está associado a uma classificação de consequência do modo de falha. Tem-se nas figuras 23 e 24, os diagramas lógicos para seleção das tarefas de manutenção, conforme a classificação das consequências da falha.

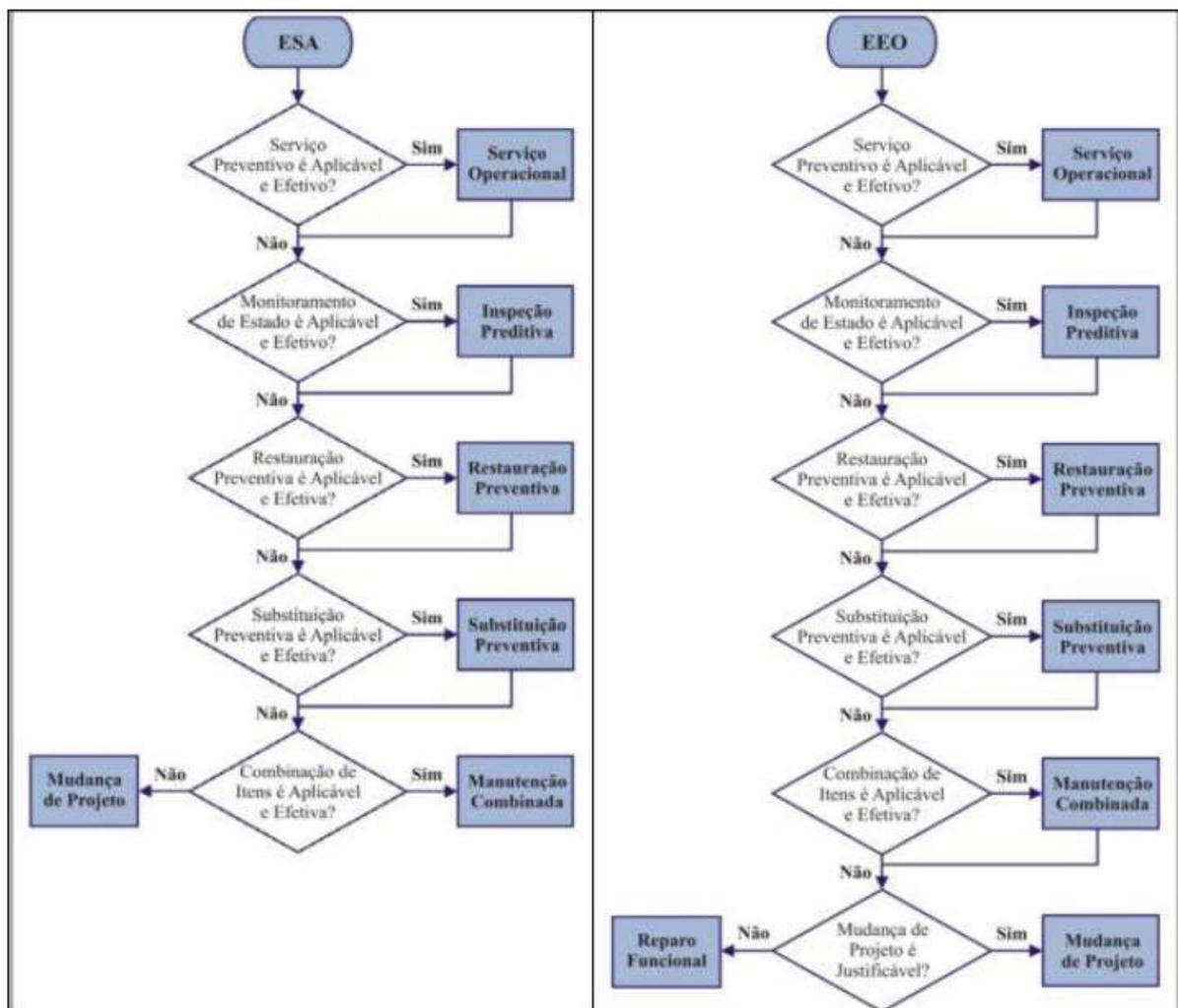


Figura 23 – Diagramas lógicos para seleção das tarefas de manutenção das classes ESA e EEO.

Fonte: Rigoni (2009).

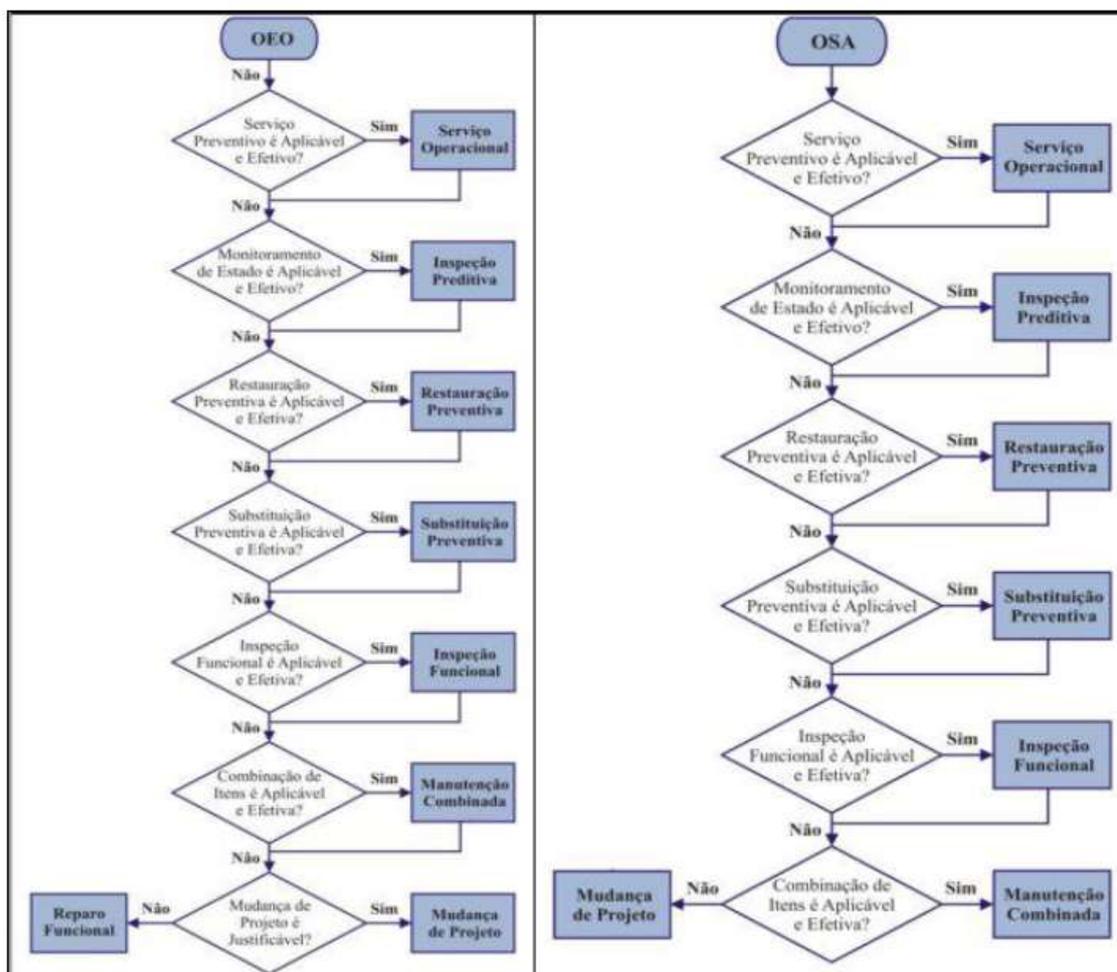


Figura 24 – Diagramas lógicos para seleção das tarefas de manutenção das classes OEO e OSA

Fonte: Rigoni (2009).

A Manutenção Centrada em Confiabilidade orienta que a seleção das tarefas de manutenção, inicie pela análise da aplicabilidade técnica e efetividade de quatro tipos de atividades definidas de tarefas proativas. São elas: serviço operacional, inspeção preditiva, restauração preventiva e substituição preventiva. Para os modos de falha classificados como ocultos, é adicionado a avaliação da tarefa de inspeção funcional, ou seja, detectiva. Preferencialmente deve-se selecionar uma única tarefa, capaz de prevenir o estado de falha funcional ou reduzir suas consequências. Caso

necessite aplicar uma combinação de tarefas, atentar para o menor custo efetivo (SIQUEIRA, 2005).

Caso nenhuma tarefa proativa seja possível, a lógica de decisão da MCC permite a aplicação de duas tarefas *default*, que são: mudança de projeto e reparo funcional. Situações em que o modo de falha tem consequências com impactos significativos na segurança ou no meio ambiente, não é permitido a tarefa de reparo funcional, ou seja, correção após a falha. Para estes casos é realizada uma mudança de projeto que elimine os riscos a segurança ou ao meio ambiente (SIQUEIRA, 2005).

Para os casos em que o modo de falha tem consequências com impactos significativos apenas na operação ou economia do processo produtivo, a MCC orienta que seja feita uma avaliação viável economicamente, entre as opções de mudança de projeto e reparo funcional. A decisão da escolha entre as duas dependerá do menor custo efetivo dentro de um intervalo de tempo avaliado (SIQUEIRA, 2005).

3.3.8 Engenharia da Confiabilidade

O uso de técnicas de Engenharia da Confiabilidade fornece ferramentas teóricas e práticas que permitam especificar, projetar, testar e demonstrar a probabilidade e a capacidade, segundo a qual, componentes, produtos e sistemas desempenharão suas funções, por períodos determinados de tempo, em ambientes específicos e sem apresentar falhas.

Com o custo e a complexidade cada vez maiores dos muitos sistemas industriais e de defesa, a importância da confiabilidade como um parâmetro de eficiência, tornou-se evidente (LAFRAIA, 2001).

Benefícios com a aplicação da Confiabilidade:

- Menos paradas não programadas;
- Menos custos de manutenção/operação;
- Menos possibilidades de acidentes.

Confiabilidade é um atributo importante para produtos e sistemas e permeia todo o ciclo de vida. É multidisciplinar e engloba especialidades e especialistas em

engenharia, estatística, matemática, computação, física, química, entre outras. Há autores que denominam de Engenharia de Confiabilidade. Sua aplicação está estruturada em técnicas de análise e de síntese, entre as quais: análise da árvore de falha (FTA), análise do modo e do efeito da falha (FMEA), análise do modo de falha, do efeito e da criticidade (FMECA), análise da causa raiz (RCA - *Root Cause Analysis*), análise da causa de falha de modo comum e de técnicas associadas ao atributo da qualidade (DIAS, 2005). A característica fundamental utilizada é o tempo médio entre falhas. O tempo é entendido como sendo o tempo relevante acumulado de ensaio, obtido pela somatória dos tempos relevantes de todos os itens de ensaio (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1994). É a avaliação probabilística do risco/falha de um sistema ou produto que caracteriza o aspecto fundamental da Análise de confiabilidade (LAFRAIA, 2001).

O primeiro termo a ser caracterizado é a falha. A falha é o término de um item de cumprir com a sua função. Ou seja, quando um item falha ele fica inoperante, porém deve ficar claro que “falha” é um evento e não um estado (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1994).

Outro termo que normalmente é confundido com falha é defeito. O conceito de defeito é o desvio de qualquer característica de um item em relação aos seus requisitos. Porém, o defeito não afeta, necessariamente, a capacidade de um item de cumprir com a sua função (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1994).

A manutenção é a combinação de todas as ações técnicas que se destinam a fazer com que um determinado item possa realizar a sua função. A manutenção inclui as ações de supervisão (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1994)

Já, o termo confiabilidade refere-se à capacidade de um item cumprir sua função sob determinadas condições durante um intervalo de tempo definido (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1994).

A manutenibilidade é a probabilidade de que um item que tenha falhado possa ter sua condição operacional restabelecida dentro de um período de tempo específico, quando a ação de manutenção é executada de acordo com um planejamento estabelecido (MILASCH, 1993), é característica definida previamente nas fases de projeto e instalação do item. A manutenibilidade é a probabilidade de que um equipamento ou sistema que se encontra em falha no instante inicial de

observação ser repostado em perfeito estado de funcionamento dentro de um intervalo de tempo, corresponde a uma função de probabilidade identificada por uma cadeia de Markov (BILLINTON & ALLAN, 1992). Cadeia de Markov é um caso particular de um processo estocástico com estados discretos (o parâmetro, em geral o tempo, pode ser discreto ou contínuo) e que apresenta a propriedade Markoviana, chamada assim em homenagem ao matemático Andrei Andreyevich Markov (BILLINTON & ALLAN, 1992).

Para estudos de confiabilidade, é necessário determinar uma distribuição de probabilidade que tenha uma boa convergência com os dados disponíveis. É verificado se os dados convergem para as seguintes tipos de curva: Normal, lognormal, Weibull, Exponencial ou Gamma. A distribuição normal pode descrever tempos até falhas causadas por várias causas distintas, a lognormal, quando a falha se atenua durante o tempo, tal como em corrosão; a Weibull, quando várias causas atuando ao mesmo tempo e a primeira causa que leva a falha propicia a análise das outras (sistemas série); a exponencial, quando a falha ocorre por motivos aleatórios; e finalmente a Gamma, quando existem várias causas mas a última que ocorre dispara a falha (sistemas paralelos) (RAUSAND e HOYLAND, 2004).

3.3.9 Distribuições

Analisando o histórico de manutenção dos equipamentos percebemos que, mesmo os equipamentos de um mesmo modelo e fabricante, as falhas não ocorrem ao mesmo tempo. Normalmente as falhas obedecem a uma distribuição de probabilidade.

A determinação da distribuição de probabilidade que rege o comportamento operacional de um equipamento, até que o mesmo venha a falhar, pode ser determinado através da análise de sua vida útil, seja em ensaios acelerados ou análise de dados de sua vida operacional.

As distribuições de probabilidade que possibilitam esse estudo podem ser agrupadas em dois tipos básicos: discretas e contínuas.

As discretas são aquelas associadas às variáveis aleatórias que somente podem assumir valores discretos. As contínuas são aquelas que podem assumir inúmeros valores em um intervalo real e são medidos em uma escala contínua.

O trabalho está analisando dados contínuos e, com isso, aborda as características desse tipo de distribuição de probabilidade.

Em estatística, a função densidade de probabilidade ou simplesmente função de densidade é uma função utilizada para representar a distribuição de probabilidade caso a variável aleatória seja contínua (COSTA, 2012).

Se traçarmos os valores obtidos, em uma medição qualquer, um histograma de uma determinada amostra chegaremos a curvas como mostradas na figura 25, na medida em que aumentamos o número de amostras e diminuirmos o intervalo de medição encontraremos curvas diferentes. Se traçarmos um único diagrama mostrando a combinação de várias amostras, mas agora com intervalos de medição pequenos obteremos uma distribuição de confiabilidade, com isso, o histograma tende a uma curva que descreverá a função de densidade de probabilidades (FDP) ou, simplesmente, a distribuição dos valores conforme figura 25.

Quanto menor for o intervalo de classe maior a proximidade com uma função de densidade de probabilidades dos dados relacionados. (COSTA, 2012).

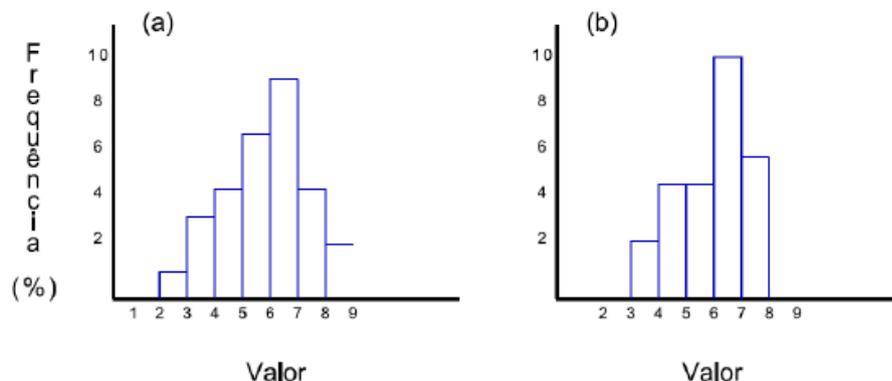


Figura 25 – a) Histograma de frequência de uma amostra aleatória. b) Histograma de frequência de outra amostra da mesma população.

Fonte: Adaptado de Khater (2009, p. 31)

Um histograma é uma representação gráfica da distribuição de frequências de uma massa de medições, normalmente um gráfico de barras verticais. É uma das Sete Ferramentas da Qualidade (COSTA, 2012).

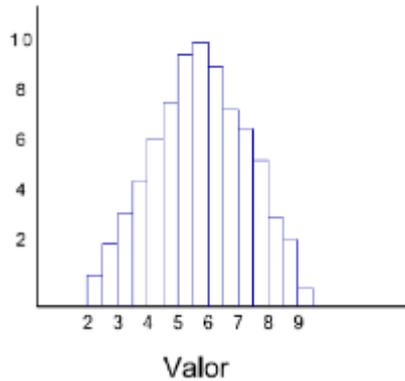


Figura 26 – Função de densidade de probabilidade.

Fonte: Adaptado de Khater (2009, p. 31)

A figura 27 mostra uma distribuição de probabilidades contínua, onde $f(x)$ é a densidade de probabilidade de ocorrência e x a variável relacionada.

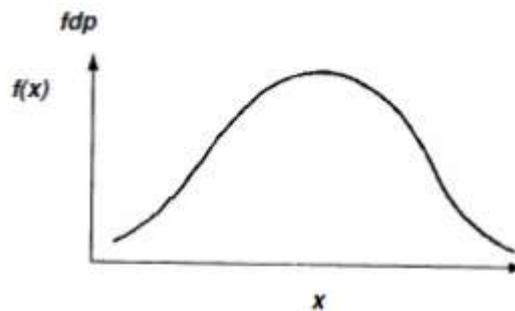


Figura 27 – Distribuição de probabilidade contínua.

Fonte: Adaptado de Khater (2009, p. 31)

A área sobre a curva é igual a 1, pois descreve a probabilidade de todos os valores de x , ou seja:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} f(x)dx = 1$$

A probabilidade de um valor ocorrer entre um intervalo de tempo é o equivalente a área compreendida nesse intervalo, ou seja.

$$P(x_1 < x < x_2) = \int_{x_1}^{x_2} f(x)dx$$

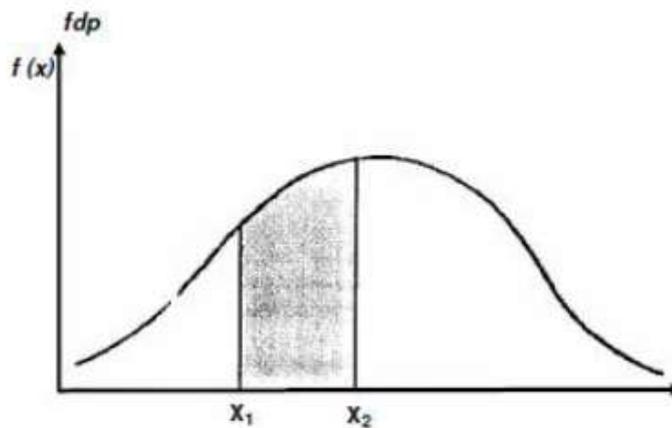


Figura 28 – Distribuição de probabilidade contínua em um intervalo de tempo.

Fonte: Adaptado de Khater (2009, p. 32)

Os dados coletados dos equipamentos em estudo devem se adaptar a algum modelo formulado por estatísticos, matemáticos e engenheiros para modelar matematicamente ou representar certo comportamento populacional. Existem diversas distribuições, cada uma com uma função em relação ao tempo pré-definida.

As variáveis aleatórias contínuas podem ser de grande utilidade na abordagem de problemas práticos. Os principais modelos probabilísticos para variáveis aleatórias contínuas são as Distribuições: Uniforme, Normal, Gama, Exponencial, Weibull, Qui-Quadrado, t de Student, F de Fisher e Aproximação da Distribuição Binomial pela Normal (GUIMARÃES, 2012). Estes modelos também são denominados funções densidades de probabilidades, e podem envolver mais de um parâmetro.

O trabalho aborda apenas a Distribuição de Weibull, pois os dados analisados aderem a esse tipo de distribuição por se tratar de uma distribuição versátil por ser composta por três parâmetros (α , β e γ). Como esta distribuição pode ser amplamente utilizada, ela pode ser descrita de várias maneiras distintas, cada uma delas mais apropriada para um tipo específico de estudo (LAFRAIA, 2001).

A distribuição de Weibull recebe este nome, pois foi primeiramente descrita por Ernest Hjalmar Wallodi Weibull, engenheiro e matemático sueco que no ano de 1939 apresentou um modelo sobre fadiga de materiais (LAFRAIA, 2001). Porém, somente em 1951 esta distribuição, usada no estudo de confiabilidade, descrita no artigo *A Statistical Distribution Function of Wide Applicability*, Weibull de 1951.

Esta distribuição é amplamente empregada no estudo de confiabilidade, pois ela não possui uma forma definida, ou seja, pode ser usada no estudo de diversos casos em que existam dados experimentais (PIAZZA, 2000).

A função distribuição de Weibull possui três parâmetros para determinar a probabilidade de falha, confiabilidade e taxa instantânea (função de risco). O quadro 2 mostra as diversas expressões e o significado dos seus parâmetros (KHATER, 2009).

Significado	Parâmetro	Expressão
Distribuição de falhas	$f(t)$	$\frac{\beta (t - t_0)^{\beta-1}}{\eta^\beta} \exp \left[- \left(\frac{t - t_0}{\eta} \right)^\beta \right]$ para $t \geq t_0$ 0 para $t < t_0$
Probabilidade acumulada de falhas	$F(t)$	$1 - \exp \left[- \left(\frac{t - t_0}{\eta} \right)^\beta \right]$
Confiabilidade	$C(t)$	$\exp \left[- \left(\frac{t - t_0}{\eta} \right)^\beta \right]$
Taxa de falha	$\lambda(t)$	$\frac{\beta (t - t_0)^{\beta-1}}{\eta \left(\frac{t - t_0}{\eta} \right)^\beta}$
Parâmetros de escala	η	
Parâmetro de forma	β	
Vida inicial	t_0 ou γ	
Tempo para a falha	t	

Quadro 2 – Expressões da distribuição Weibull

Fonte: Adaptado de Khater (2009, p. 32)

Valores particulares dos parâmetros da função de Weibull transformam expressões de outras distribuições usualmente utilizadas para descrever os modos de falhas, conforme pode se observar na Quadro 3.

Significado	$t_{\theta} = 0$	$t_{\theta} = 0 \text{ e } \beta = 1$
Distribuição de falhas	$f(t) = \frac{\beta}{\eta^{\beta}} (t)^{\beta-1} \exp \left[-\left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta} \right]$	$f(t) = \frac{1}{\eta} \exp \left(-\frac{t}{\eta} \right)$
Probabilidade acumulada de falhas	$F(t) = 1 - \exp \left[-\left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta} \right]$	$F(t) = 1 - \exp \left(-\frac{t}{\eta} \right)$
Confiabilidade	$C(t) = \exp \left[-\left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta} \right]$	$C(t) = \exp \left(-\frac{t}{\eta} \right)$
Taxa de falha	$\lambda(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1}$	$\lambda = \frac{1}{\eta}$
Tempo médio entre falhas	$TMEF = \frac{1}{\lambda}$	η

Quadro 3 – Parâmetros da função Weibull

Fonte: Adaptado de Khater (2009, p. 40)

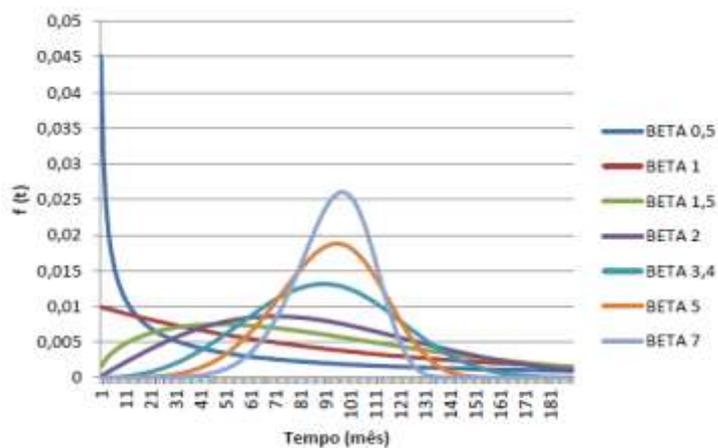


Figura 29 – Função de densidade de probabilidade da distribuição de Weibull

Fonte: Adaptado de Khater (2009, p. 40)

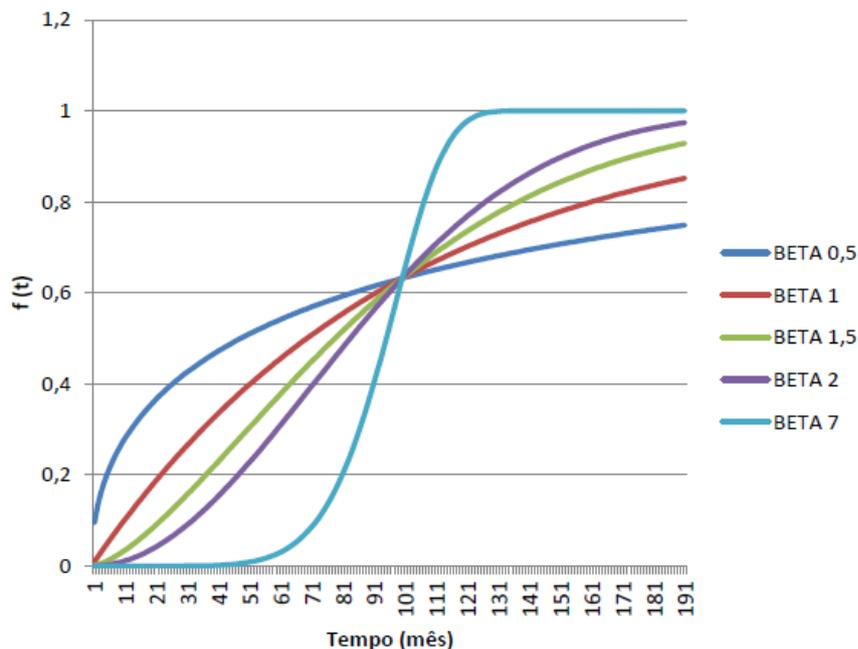


Figura 30 – Função densidade acumulada de falhas da distribuição de Weibull
 Fonte: Adaptado de Khater (2009, p. 41)

O aspecto mais importante é o efeito de β na distribuição Weibull. Analisando a figura 31, a distribuição de Weibull com o $\beta < 1$ apresenta taxa de falha que diminui com tempo (falha infantil ou prematura). Para a distribuição com o β próximo ou igual a 1 é caracterizada pela taxa de falha razoavelmente constante (vida útil ou de falhas aleatórias) e, finalmente, para distribuições de Weibull com o $\beta > 1$ a característica é o aumento da taxa de falha com o passar do tempo (falhas de desgaste).

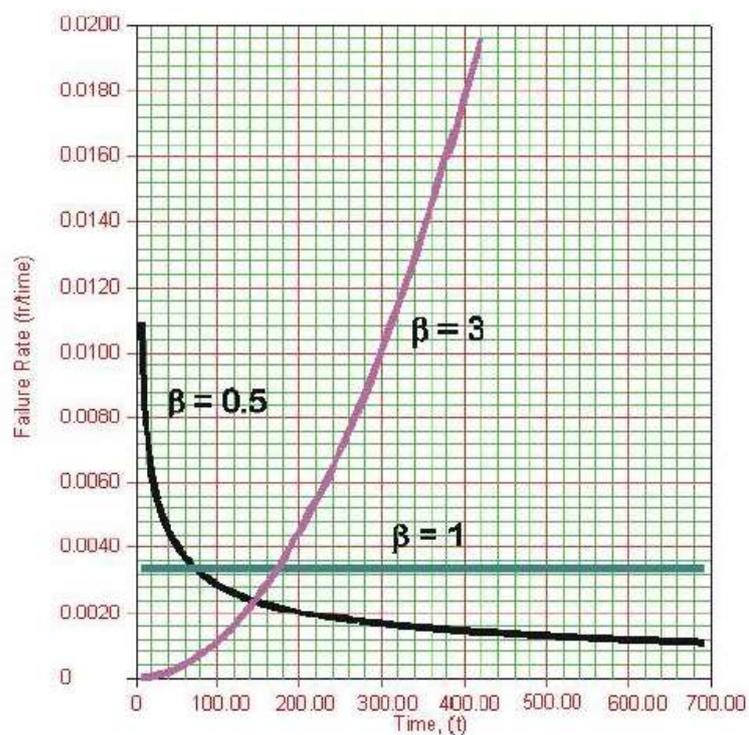


Figura 31 – Variação dos valores β em função do tempo da distribuição de Weibull

Fonte: Adaptado de Costa (2013, p. 8)

Estes valores de β abrangem as três fases da "clássica curva da banheira", ou seja, uma distribuição Weibull mista com a uma subpopulação de $\beta < 1$, uma subpopulação de $\beta = 1$ e uma outra com o $\beta > 1$.

A figura 32 mostra a relação entre o valor de β e as fases da curva da banheira.

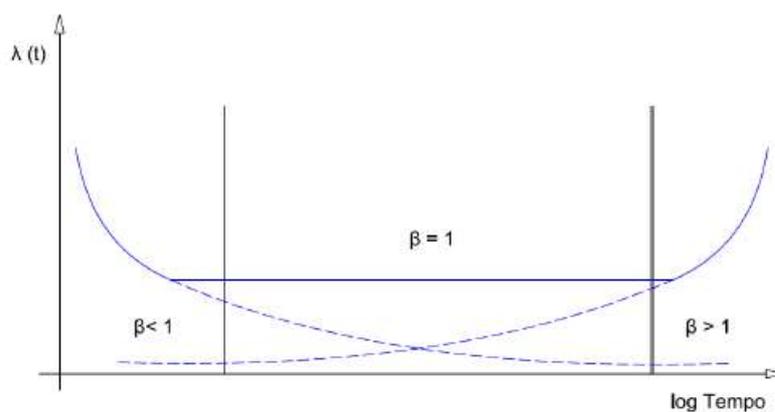


Figura 32 – Fases da curva da banheira

Fonte: Adaptado de Khater (2009, p. 43)

4. Aplicação Confiabilidade por Análise de Vibração

Este capítulo apresenta a aplicação da Confiabilidade por acompanhamento preditivo por análise de vibração, utilizando o referencial teórico apresentado no capítulo 2 e 3 deste trabalho, para os mancais de baixa rotação em prensas de máquina de papel e exaustor de tiragem de caldeira.

4.1 Seleção do Sistema de Coleta de Informações.

O objetivo desta etapa é identificar e documentar os equipamentos submetidos ao estudo de análise de confiabilidade, bem como coletar e armazenar todas as informações técnicas do equipamento selecionado.

Os critérios que foram levados em consideração, para escolha dos equipamentos deste estudo foram, principalmente, a criticidade que este equipamento representa para qualidade da produção e custos de manutenção e produção.

A parada do exaustor de tiragem da caldeira, em função de falhas dos rolamentos, provoca parada da caldeira, ou seja, interrupção do fornecimento do vapor e energia, necessários para a produção de celulose e papel, afetando toda a cadeia produtiva.

A parada dos mancais de prensa das máquinas de papel, em função de falhas nos rolamentos, provoca parada imediata da máquina de papel.

No caso de uma parada do exaustor por falha do rolamento, tem-se os seguintes custos para realizar a troca do mesmo:

- custo com materiais: R\$ 9.500,00;
- custo da diária do guindaste: R\$ 1.600,00;
- perda de produção de papel: 150 toneladas;
- perda de receita: R\$ 145.000,00.

No caso de uma parada de um dos mancais da prensa da máquina de papel por falha do rolamento, tem-se os seguintes custos para realizar a troca do mesmo:

- custo com materiais: R\$ 22.500,00;
- perda de produção de papel: 100 toneladas;
- perda de receita: R\$ 120.000,00.

Os resultados esperados e obtidos para a seleção dos equipamentos citados acima, são:

a) eliminar desmontagens desnecessárias para inspeção. Com o acompanhamento preditivo por vibração, eliminaram-se as inspeções dos mancais de rolamento e condições de lubrificação;

b) reduzir o trabalho de emergência ou a manutenção corretiva não planejada. O número de paradas do processo, em função de falhas dos componentes do exaustor de tiragem da caldeira, eram de 3 paradas em média por ano. Após a implantação da análise das vibrações, não houve nenhuma ocorrência de manutenção corretiva não planejada do exaustor.

Para os mancais da prensa o histórico de paradas não programadas devido a falhas no rolamento eram média de 4 paradas por ano. Após a implantação da análise das vibrações, não houve nenhuma ocorrência de manutenção corretiva não planejada dos mancais por problemas no rolamento. Houve ocorrência de paradas devido a problemas de revestimento dos rolos, também foram detectados por análise de vibração;

c) reduzir custos de manutenção corretiva. Com a implantação das técnicas apresentadas neste estudo, espera-se obter uma redução significativa de manutenção corretiva do exaustor e mancais da prensa. Após implantação do programa preditivo, em 2 anos não houveram paradas não programadas devido a desgaste nos rolamentos. Calculado uma perda evitada em média de R\$ 1.830.000,00.

Para a coleta de informações deste trabalho, foram utilizados os seguintes documentos:

- manual de operação e manutenção;
- projetos de instalação;
- planos de manutenção;
- histórico de paradas operacionais.
- histórico dos níveis de vibração;
- plano de lubrificação;

4.2 Histórico de Vibração

4.2.1 Exaustor Tiragem Caldeira

Os mancais do exaustor de tiragem da caldeira haviam apresentado características de quebra do filme lubrificante durante os 3 meses anteriores ao diagnóstico da desgaste no rolamento.

O espectro de aceleração de 28 de outubro de 2014, mostra evolução dos níveis de vibração, com formação de “carpete” (termo utilizado para quebra do filme lubrificante) entre as frequências de 4000 Hz a 8000 Hz, indicando o rompimento do filme lubrificante, gerando contato metálico entre pistas e elementos girantes.

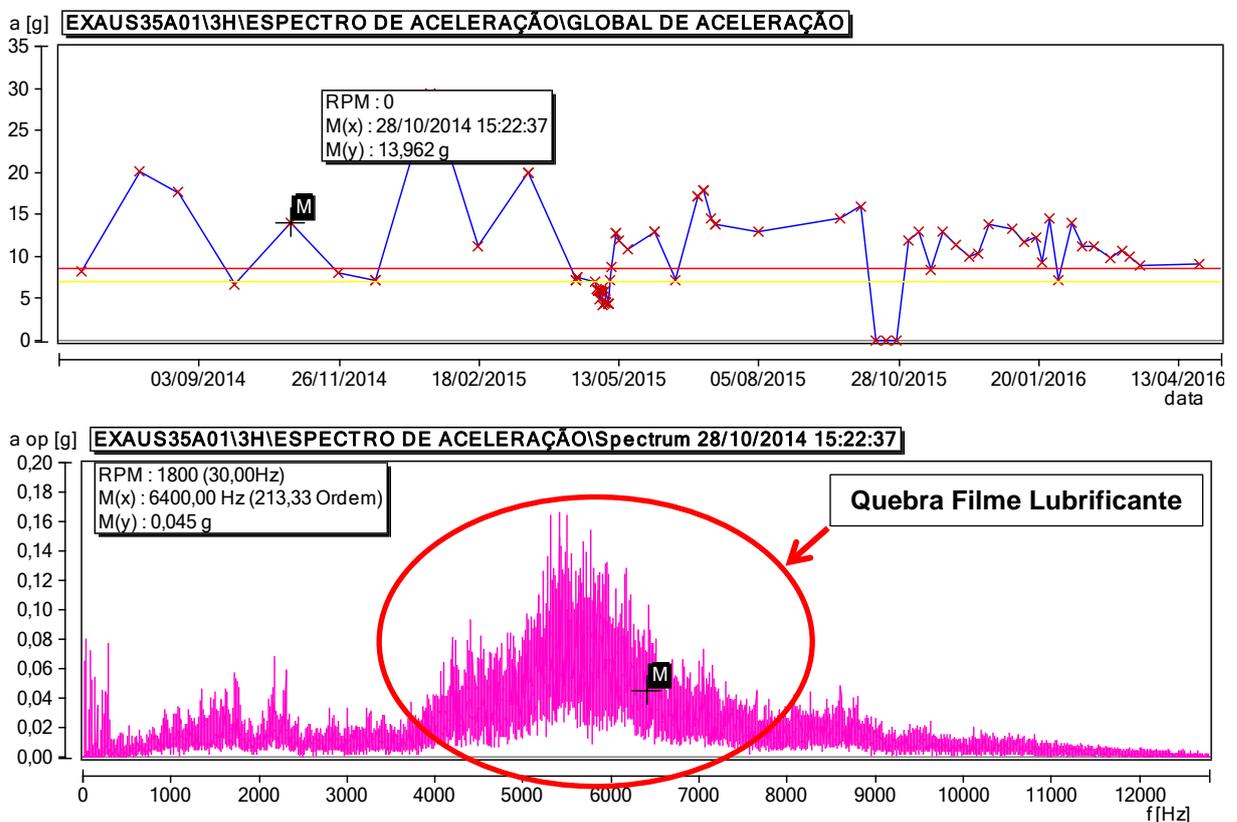


Figura 33 – Curva de Tendência e Espectro de Aceleração

Fonte: Do Autor (2014)

Após 3 meses de acompanhamento houve mudança das características do espectro, indicando nova evolução dos níveis de vibração em aceleração, evidenciando desgaste no rolamento e folga.

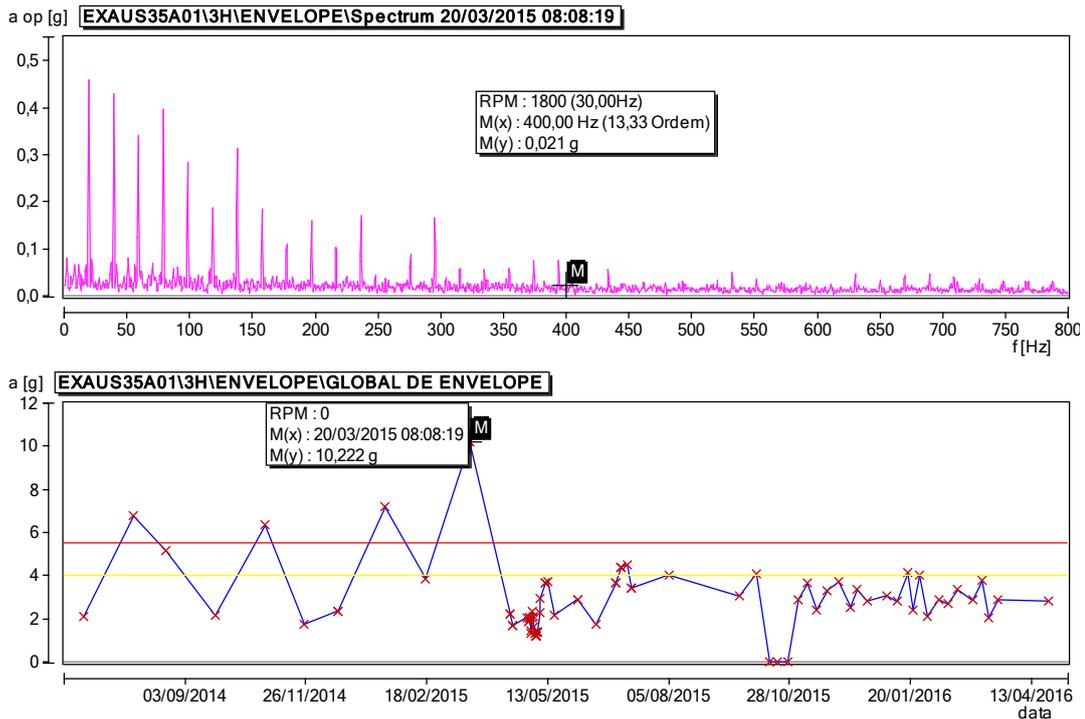


Figura 34 – Curva de Tendência e Espectro de Aceleração

Fonte: Do Autor (2015)

Realizando o cadastro do rolamento e rotação exata do exaustor no momento da coleta, foi possível diagnosticar não só o desgaste do rolamento, mas também qual componente estava com este desgaste.

Além da condição de folga, as frequências de pista externa no rolamento se destacavam.

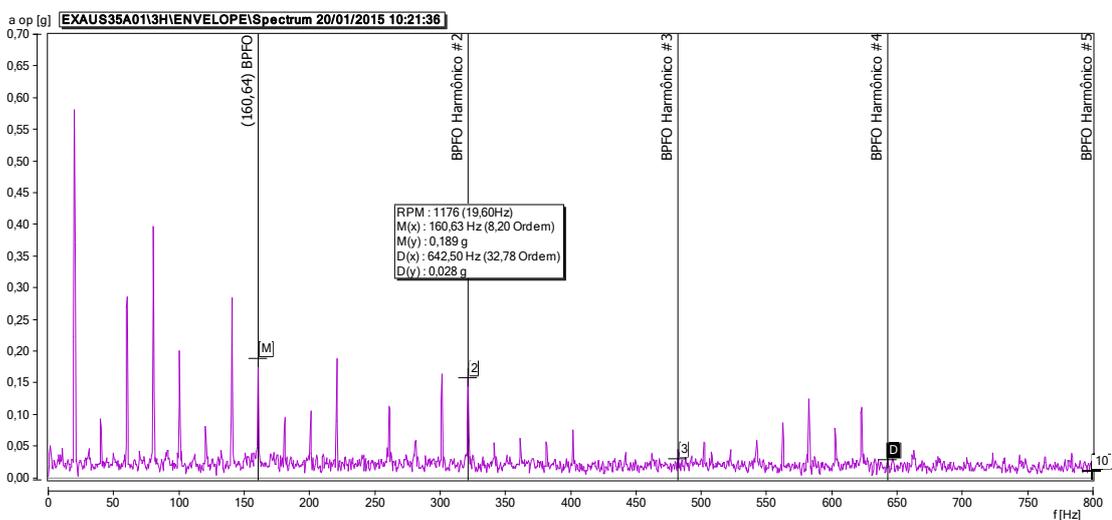


Figura 35 –Espectro de Aceleração

Fonte: Do Autor (2014)

A partir do diagnóstico foi possível realizar uma parada programada do exaustor para substituição dos rolamentos e mancais.

Abaixo gráfico de tendência evidenciando a queda dos níveis após substituição dos rolamentos e mancais.

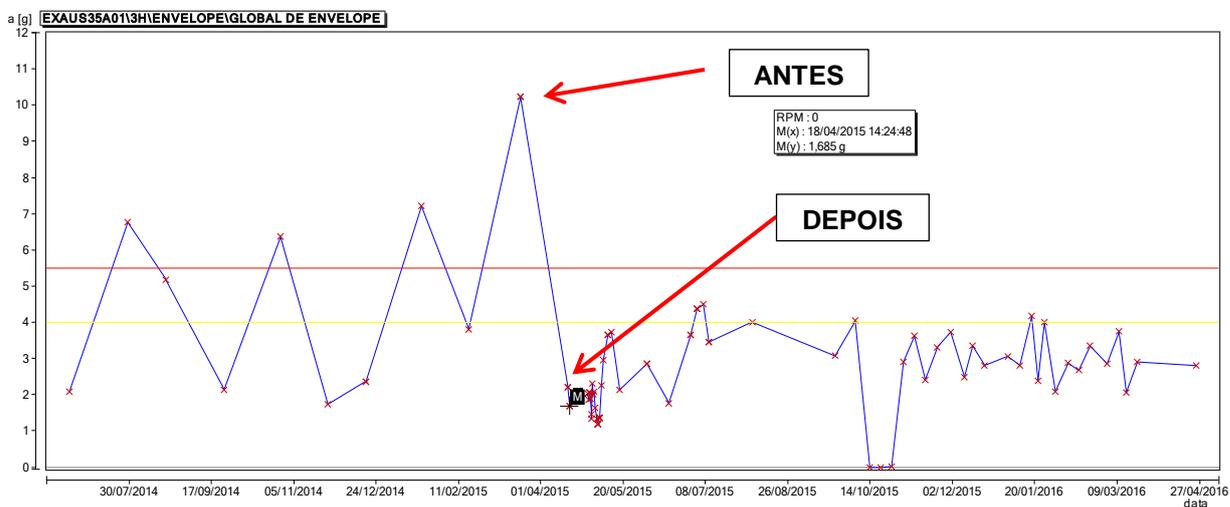


Figura 36 – Curva de Tendência

Fonte: Do Autor (2015)

4.2.2 Mancal 1ª Prensa Inferior

O mancal inferior da 1ª Prensa lado comando, apresentou evolução dos níveis de vibração em aceleração apresentando características de desgaste no rolamento.

O espectro de aceleração de 14 de janeiro de 2016 mostra evolução dos níveis de vibração, com picos definidos de frequências de desgaste do rolamento.

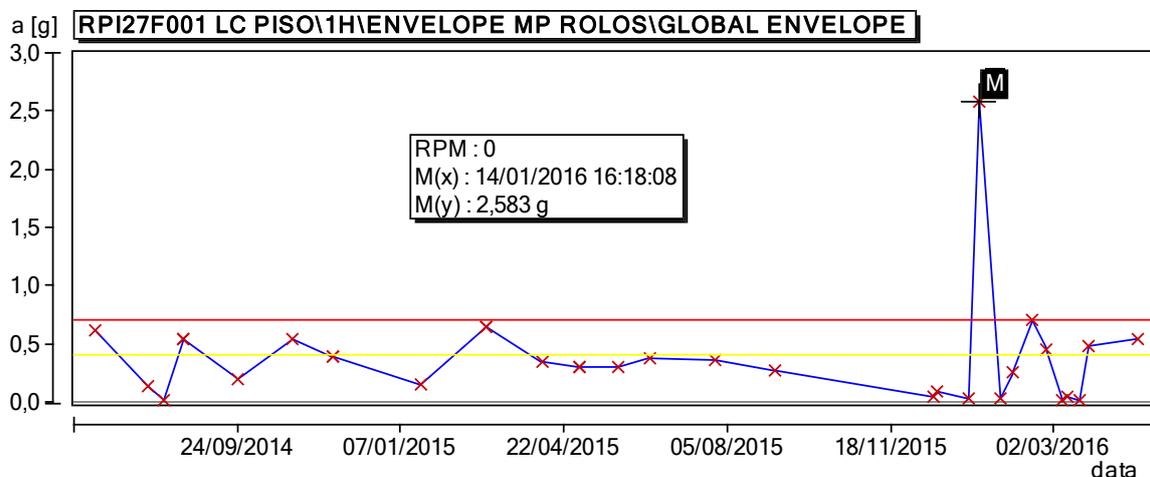


Figura 37 – Curva de Tendência

Fonte: Do Autor (2016)

Realizando o cadastro do rolamento e rotação exata do mancal da prensa no momento da coleta, foi possível diagnosticar não só o desgaste do rolamento, mas também qual componente estava com este desgaste.

As frequências de pista interna no rolamento se destacavam no espectro de aceleração, indicando o desgaste na mesma.

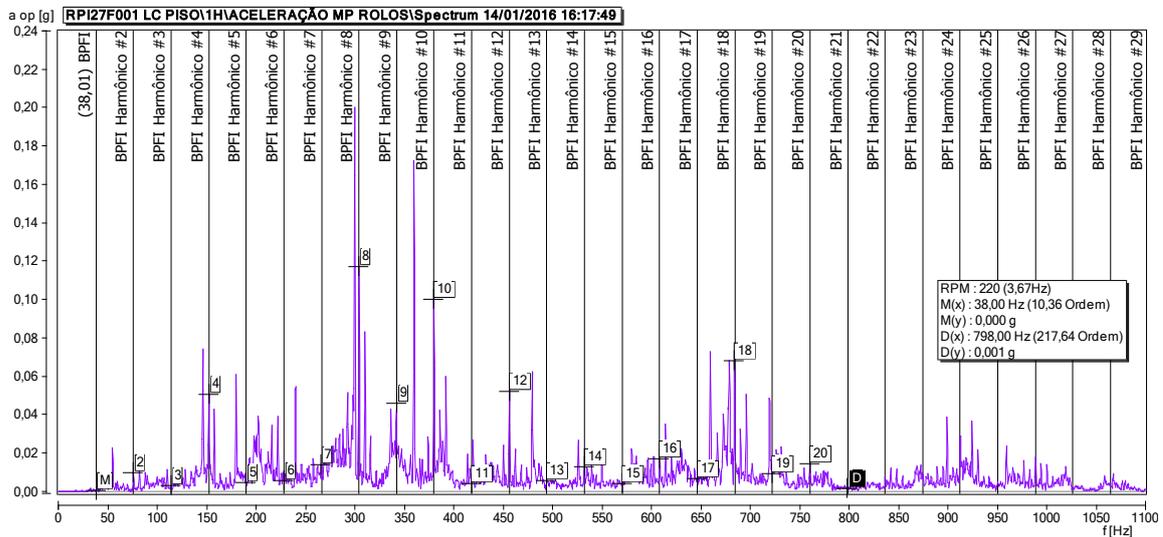


Figura 38 –Espectro de Aceleração

Fonte: Do Autor (2016)

A partir do diagnóstico foi possível realizar uma parada programada do exaustor para substituição dos rolamentos e mancais.

Abaixo gráfico de tendência evidenciando a queda dos níveis após substituição dos rolamentos e mancais.

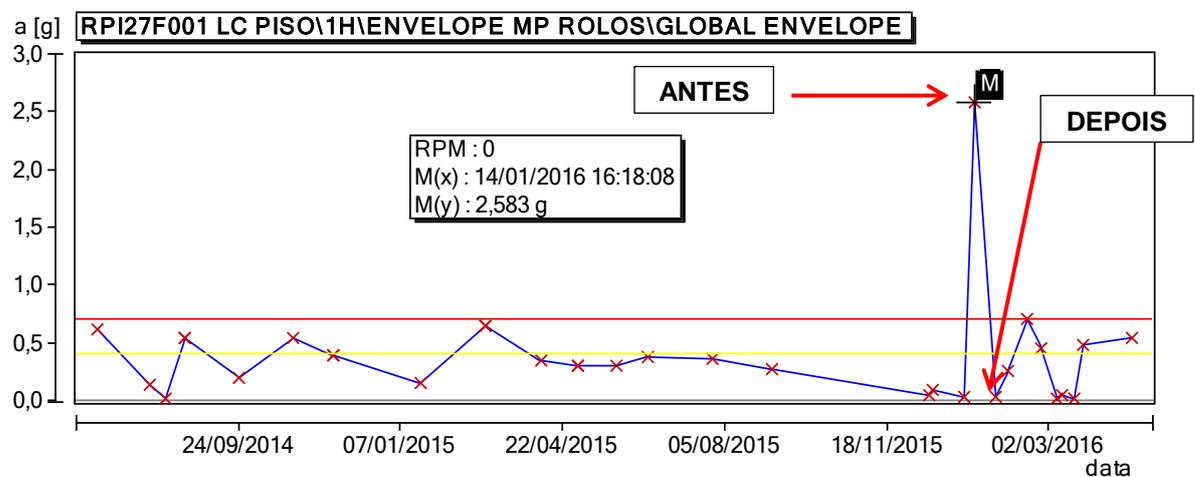


Figura 39 – Curva de Tendência

Fonte: Do Autor (2016)

4.2.3 Mancal 2ª Prensa Inferior

O mancal inferior da 2ª Prensa lado comando, apresentou evolução dos níveis de vibração em aceleração apresentando características de desgaste no rolamento.

O espectro de aceleração de 16 de junho de 2015 mostra evolução dos níveis de vibração, com picos definidos de frequências de desgaste do rolamento.

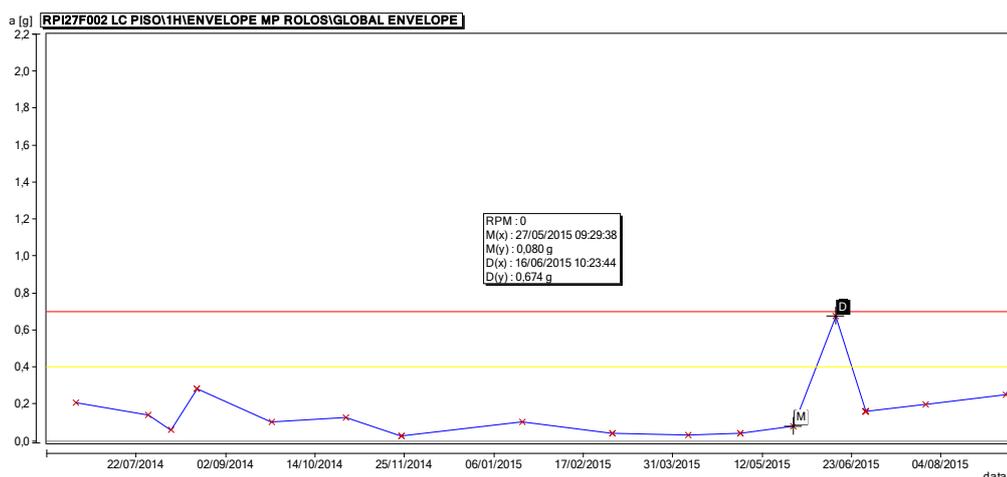


Figura 40 – Curva de Tendência

Fonte: Do Autor (2014)

Realizando o cadastro do rolamento e rotação exata do mancal da prensa no momento da coleta, foi possível diagnosticar não só o desgaste do rolamento, mas também qual componente estava com este desgaste.

As frequências de pista externa no rolamento se destacavam no espectro de aceleração, indicando o desgaste na mesma.

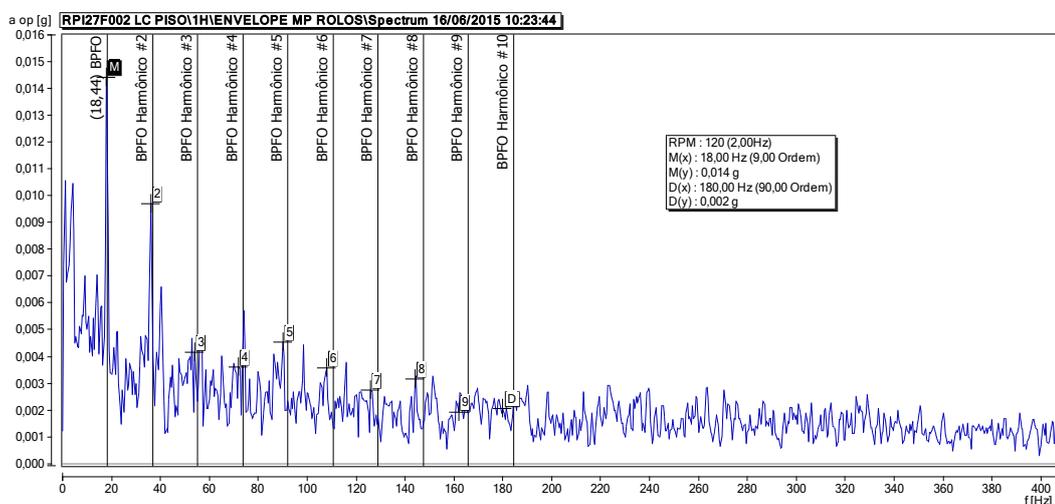


Figura 41 – Espectro de Aceleração

Fonte: Do Autor (2016)

A partir do diagnóstico foi possível realizar uma parada programada do exaustor para substituição dos rolamentos e mancais.

Abaixo gráfico de tendência evidenciando a queda dos níveis após substituição dos rolamentos e mancais.

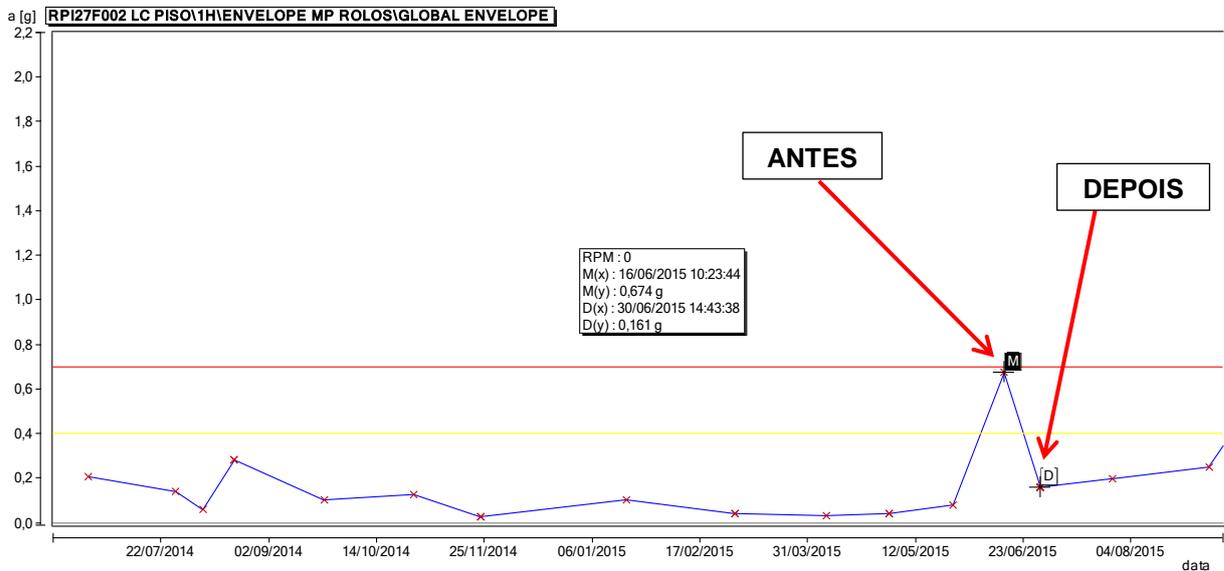


Figura 42 – Curva de Tendência

Fonte: Do Autor (2016)

4.3 Aplicação da Confiabilidade

Foi realizada aplicação da confiabilidade nos equipamentos do estudo de duas maneiras, a primeira utilizando os tempos entre falhas no período de 2 anos em que não houve monitoramento por análise de vibração e a segunda utilizando os tempos entre falhas, considerando as paradas não programadas com a aplicação da análise de vibração no histórico de 2 anos.

Para os cálculos de confiabilidade foi utilizado o software Weibull da Relia Soft.

4.3.1 Confiabilidade Exaustor

Para o período sem acompanhamento preditivo, aplicando o teste de aderência aos dados levantados o melhor resultado a ser implementado foi o Weibull 3 parâmetros, conforme quadro 4.

Tipo de Relatório	Resultados Weibull++	
Informações do Usuário		
Usuário	DAELT Departamento Acadêmico de Eletrotécnica	
Empresa	Universidade Tecnológica Federal do Paraná	
Data	18/05/2016	
Parâmetros		
Distribuição:	Weibull-3P	
Análises:	NLRR	
Método do IC:	MF	
Ranqueando:	MED	
Beta	4,168767	
Eta (Mês)	26,151584	
Gama (Mês)	-6,84	
Valor da LK	-24,085028	
Rho	1	
F \ S	3 \ 21	
LOCAL VAR/COV MATRIX		
	Var-Beta=3,133414	CV Eta Beta=2,853840
	CV Eta Beta=2,853840	Var-Eta=5,180795

Quadro 4 – Relatório implementação distribuição Weibull.

Fonte: do Autor (2016)

Utilizando a calculadora do software, foi possível verificar a confiabilidade para 12 e 24 meses do equipamento, conforme quadro 5:

Tipo de Relatório	QCP Weibull++
Informações do Usuário	
Usuário	DAELT Departamento Acadêmico de Eletrotécnica
Empresa	Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Data	18/05/2016
Entradas do Usuário	
Tempo Final da Missão (Mês) =	12
Saída do Weibull++ 8	
R(t=12) =	0,775027

Tipo de Relatório	QCP Weibull++
Informações do Usuário	
Usuário	DAELT Departamento Acadêmico de Eletrotécnica
Empresa	Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Data	18/05/2016
Entradas do Usuário	
Tempo Final da Missão (Mês) =	24
Saída do Weibull++ 8	
$R(t=24) =$	0,136884

Quadro 5 – Confiabilidade 12 e 24 meses

Fonte: do Autor (2016)

Abaixo temos o gráfico da confiabilidade pelo tempo, mostrando a queda da confiabilidade após o oitavo mês.

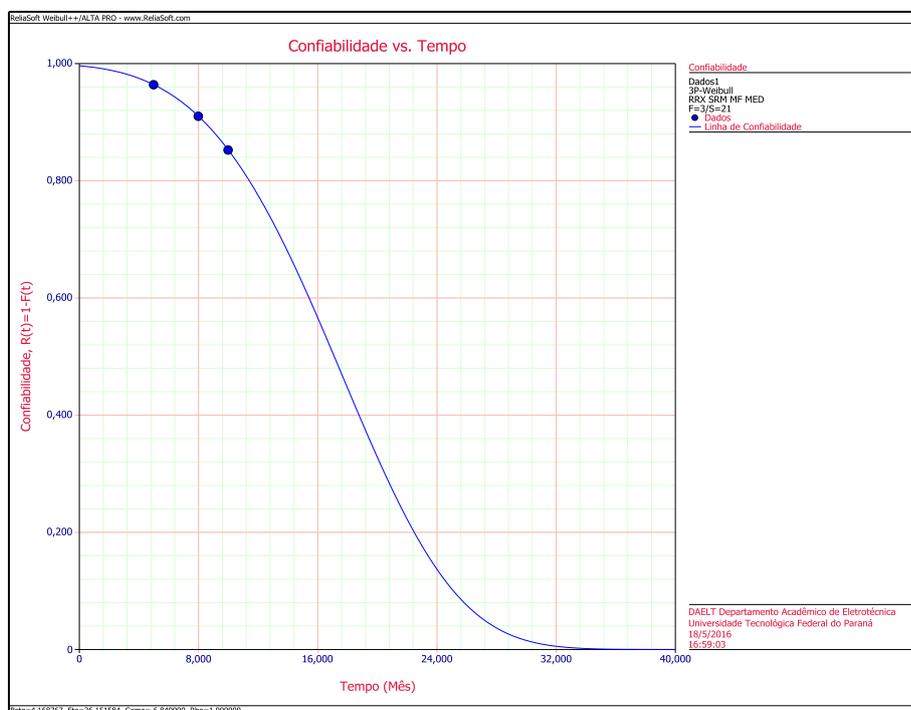


Figura 43 – Curva Confiabilidade pelo tempo

Fonte: Do Autor (2016)

Abaixo temos o gráfico da pdf (função densidade de probabilidade).

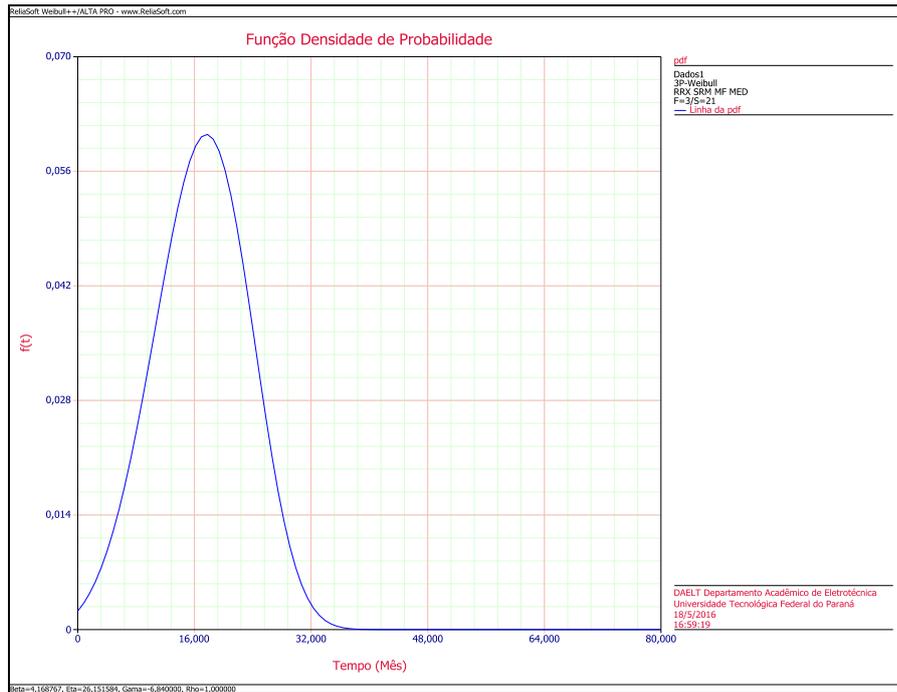


Figura 44 – Curva pdf.

Fonte: Do Autor (2016)

Com o acompanhamento por análise de vibração, aplicando o teste de aderência aos dados levantados o melhor resultado a ser implementado foi o Exponencial 2 parâmetros, conforme quadro 6.

Informações do Usuário	
Usuário	DAELT Departamento Acadêmico de Eletrotécnica
Empresa	Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Data	18/05/2016
Parâmetros	
Distribuição:	Exponencial-2P
Análises:	RRX
Método do IC:	MF
Ranqueando:	MED
Tempo Médio (Mês)	76,988292
Gama (Mês)	2,17018
Valor da LK	-11,92489
Rho	-1
F \ S	2 \ 22
LOCAL VAR/COV MATRIX	
	Var-Teta=2963,598562
	[Nota: Teta = (1 / Lambda)]

Quadro 6 – Relatório implementação distribuição Exponencial.

Fonte: do Autor (2016)

Utilizando a calculadora do software, foi possível verificar a confiabilidade para 12 e 24 meses do equipamento, conforme quadro 7.

Tipo de Relatório	QCP Weibull++
Informações do Usuário	
Usuário	DAELT Departamento Acadêmico de Eletrotécnica
Empresa	Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Data	18/05/2016
Entradas do Usuário	
Tempo Final da Missão (Mês) =	12
Saída do Weibull++ 8	
$R(t=12) =$	0,880135

Tipo de Relatório	QCP Weibull++
Informações do Usuário	
Usuário	DAELT Departamento Acadêmico de Eletrotécnica
Empresa	Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Data	18/05/2016
Entradas do Usuário	
Tempo Final da Missão (Mês) =	24
Saída do Weibull++ 8	
$R(t=24) =$	0,753108

Quadro 7 – Confiabilidade 12 e 24 meses

Fonte: do Autor (2016)

Abaixo temos o gráfico da confiabilidade pelo tempo.

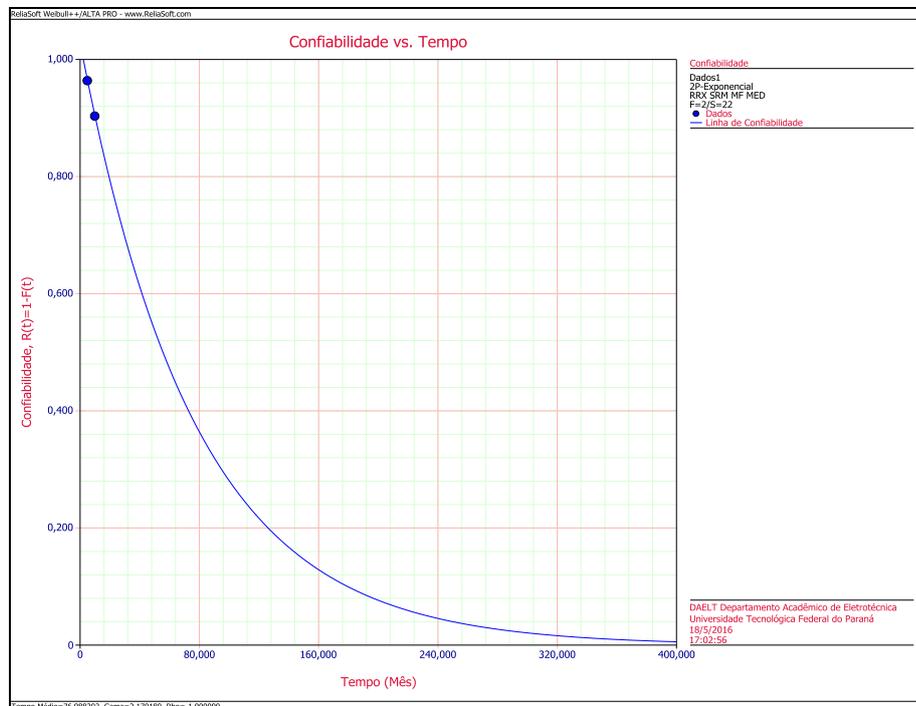


Figura 45 – Curva Confiabilidade pelo tempo

Fonte: Do Autor (2016)

Abaixo temos o gráfico da pdf (função densidade de probabilidade).

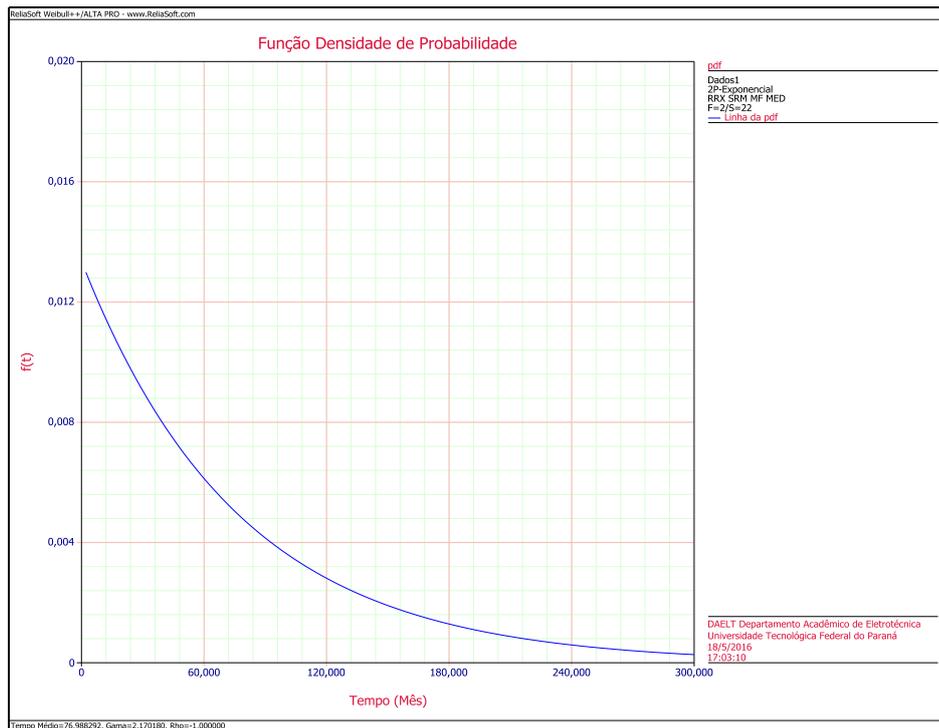


Figura 46 – Curva pdf.

Fonte: Do Autor (2016)

4.3.2 Confiabilidade 1ª Prensa Inferior

Sem acompanhamento preditivo, aplicando o teste de aderência aos dados levantados o melhor resultado a ser implementado foi o Weibull 3 parâmetros, conforme quadro 8.

Tipo de Relatório		Resultados Weibull++	
Informações do Usuário			
Usuário	DAELT Departamento Acadêmico de Eletrotécnica		
Empresa	Universidade Tecnológica Federal do Paraná		
Data	18/05/2016		
Parâmetros			
Distribuição:	Weibull-3P		
Análises:	NLRR		
Método do IC:	MF		
Ranqueando:	MED		
Beta	6,094572		
Eta (Mês)	67,087754		
Gama (Mês)	-36,5025		
Valor da LK	-20,987557		
Rho	0,98799		
F \ S	4 \ 20		
LOCAL VAR/COV MATRIX			
	Var-Beta=4,641233		CV Eta Beta=-9,863872
	CV Eta Beta=-9,863872		Var-Eta=46,278450

Quadro 8 – Relatório implementação distribuição Exponencial.

Fonte: do Autor (2016)

Utilizando a calculadora do software, foi possível verificar a confiabilidade para 12 e 24 meses do equipamento, conforme quadro 9.

Tipo de Relatório	QCP Weibull++
Informações do Usuário	
Usuário	DAELT Departamento Acadêmico de Eletrotécnica
Empresa	Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Data	18/05/2016
Entradas do Usuário	
Tempo Final da Missão (Mês) =	12
Limites de Confiança usados:	2-Lados
Método dos Limites de Confiança:	Matriz de Fisher
Nível de Confiança =	0,9
Saída do Weibull++ 8	
Limite Superior (0,95) =	0,944404
R(t=12) =	0,870677
Limite Inferior (0,05) =	0,715144
Informações do Usuário	
Usuário	DAELT Departamento Acadêmico de Eletrotécnica
Empresa	Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Data	18/05/2016
Entradas do Usuário	
Tempo Final da Missão (Mês) =	24
Limites de Confiança usados:	2-Lados
Método dos Limites de Confiança:	Matriz de Fisher
Nível de Confiança =	0,9
Saída do Weibull++ 8	
Limite Superior (0,95) =	0,790168
R(t=24) =	0,586979
Limite Inferior (0,05) =	0,299627

Quadro 9 – Confiabilidade 12 e 24 meses

Fonte: do Autor (2016)

Abaixo temos o gráfico da confiabilidade pelo tempo.

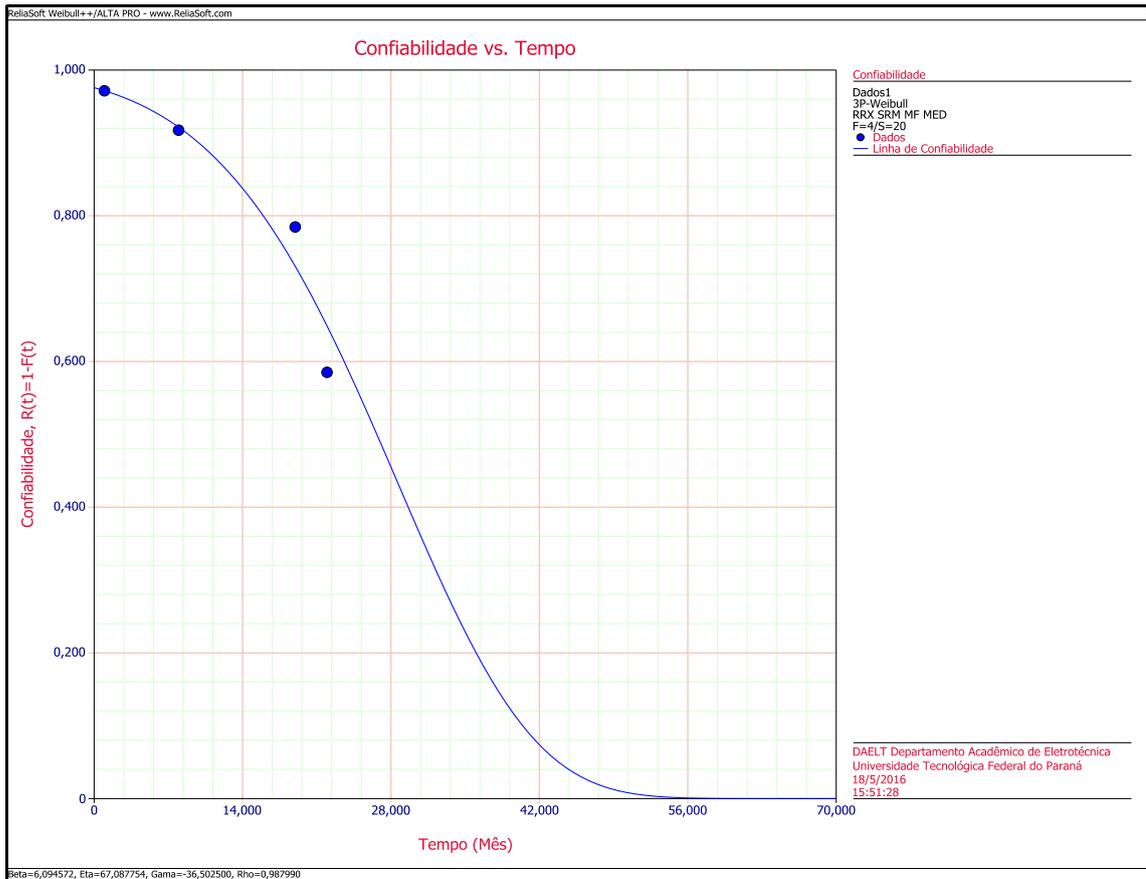


Figura 47 – Curva Confiabilidade pelo tempo

Fonte: Do Autor (2016)

Abaixo temos o gráfico da pdf (função densidade de probabilidade).

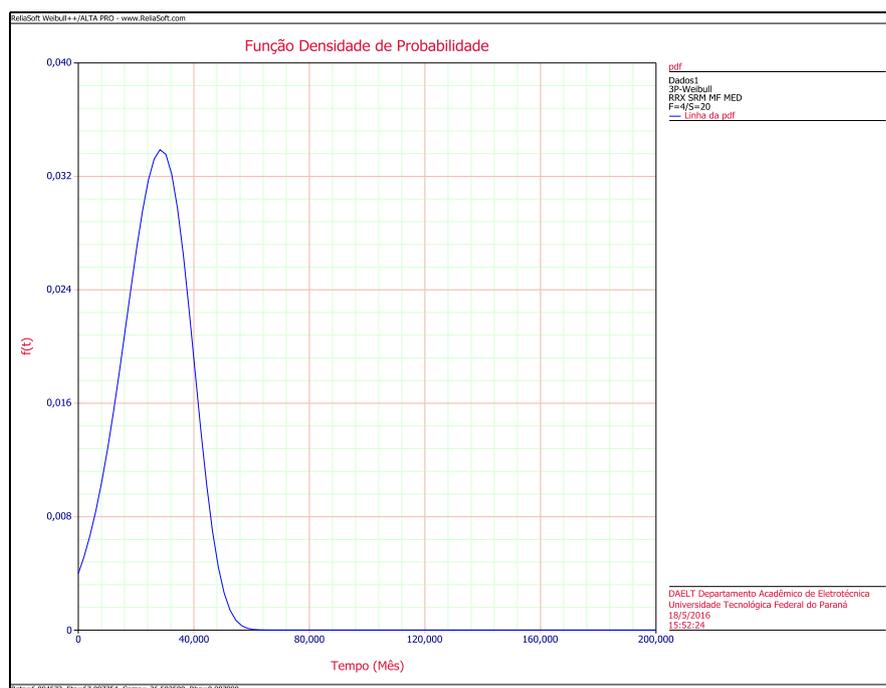


Figura 48 – Curva pdf.

Fonte: Do Autor (2016)

Com o acompanhamento por análise de vibração, aplicando o teste de aderência aos dados levantados o melhor resultado a ser implementado foi a distribuição Gumbel 2 parâmetros, conforme quadro 10.

Tipo de Relatório	Resultados Weibull++	
Informações do Usuário		
Usuário	DAELT Departamento Acadêmico de Eletrotécnica	
Empresa	Universidade Tecnológica Federal do Paraná	
Data	18/05/2016	
Parâmetros		
Distribuição:	Gumbel-2P	
Análises:	RRX	
Método do IC:	MF	
Ranqueando:	MED	
Mu (Mês)	31,937427	
Sigma (Mês)	8,728132	
Valor da LK	-12,498898	
Rho	1	
F \ S	2 \ 22	
LOCAL VAR/COV MATRIX		
Var-Mu=93,666146		CoVar=57,913581
CoVar=57,913581		Var-Sigma=46,717993

Quadro 10 – Relatório implementação distribuição Gumbel.

Fonte: do Autor (2016)

Utilizando a calculadora do software, foi possível verificar a confiabilidade para 12 e 24 meses do equipamento, conforme quadro 11.

Tipo de Relatório	QCP Weibull++
Informações do Usuário	
Usuário	DAELT Departamento Acadêmico de Eletrotécnica
Empresa	Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Data	18/05/2016
Entradas do Usuário	
Tempo Final da Missão (Mês) =	12
Saída do Weibull++ 8	
$R(t=12) =$	0,903167

Tipo de Relatório	QCP Weibull++
Informações do Usuário	
Usuário	DAELT Departamento Acadêmico de Eletrotécnica
Empresa	Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Data	18/05/2016
Entradas do Usuário	
Tempo Final da Missão (Mês) =	24
Saída do Weibull++ 8	
$R(t=24) =$	0,668471

Quadro 11 – Confiabilidade 12 e 24 meses

Fonte: do Autor (2016)

Abaixo temos o gráfico da confiabilidade pelo tempo.

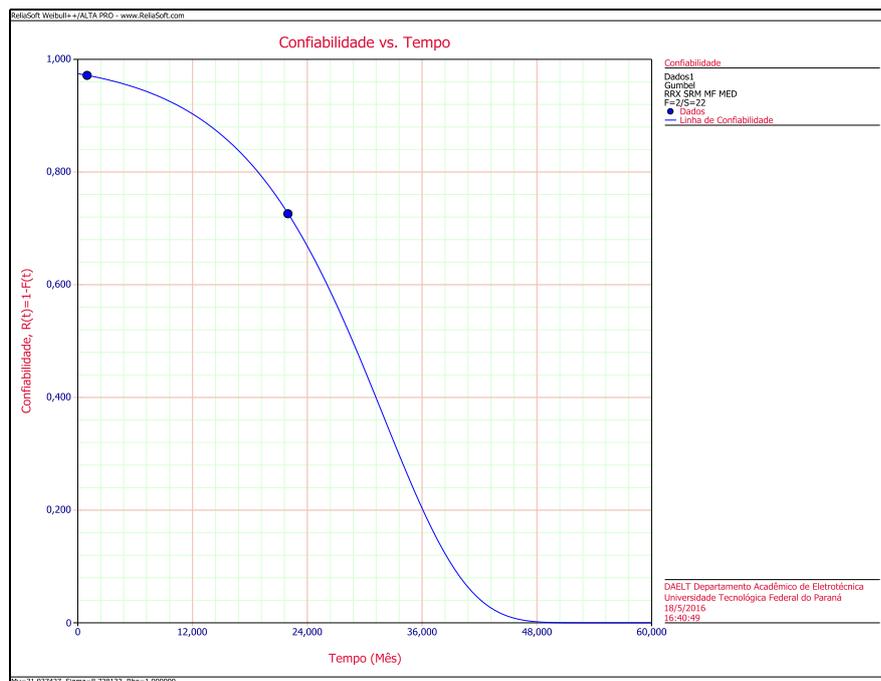


Figura 49 – Curva Confiabilidade pelo tempo

Fonte: Do Autor (2016)

Abaixo temos o gráfico da pdf (função densidade de probabilidade).

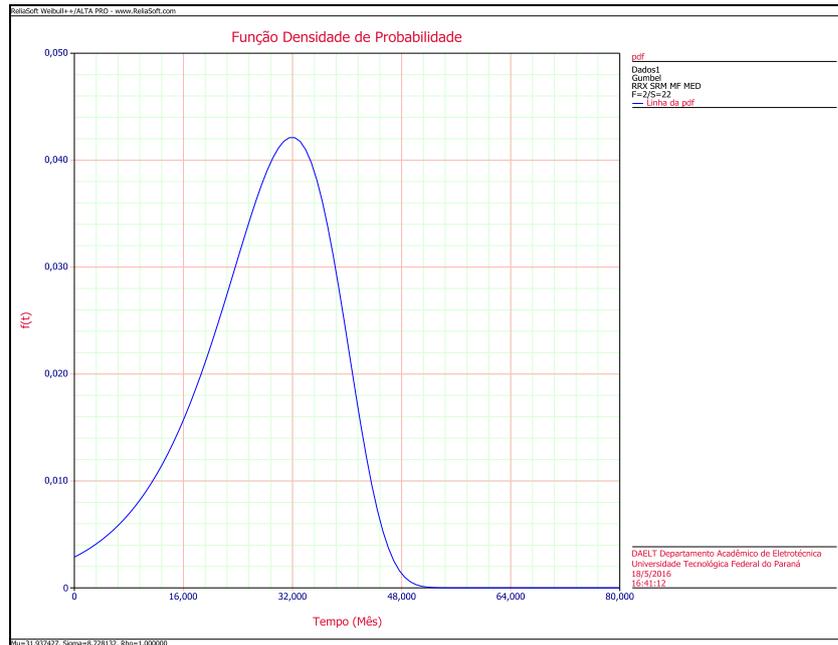


Figura 50 – Curva pdf.

Fonte: Do Autor (2016)

4.3.3 Confiabilidade 2ª Prensa Inferior

Sem acompanhamento preditivo, aplicando o teste de aderência aos dados levantados o melhor resultado a ser implementado foi a distribuição Gumbel 2 parâmetros, conforme quadro 12.

Informações do Usuário		
Usuário	DAELT Departamento Acadêmico de Eletrotécnica	
Empresa	Universidade Tecnológica Federal do Paraná	
Data	18/05/2016	
Parâmetros		
Distribuição:	Gumbel-2P	
Análises:	MLE	
Método do IC:	MF	
Ranqueando:	MED	
Mu (Mês)	22,638456	
Sigma (Mês)	3,586647	
Valor da LK	-22,538095	
F \ S	6 \ 18	
LOCAL VAR/COV MATRIX		
	Var-Mu=2,397999	CoVar=0,530111
	CoVar=0,530111	Var-Sigma=1,106400

Quadro 12 – Relatório implementação distribuição Gumbel.

Fonte: do Autor (2016)

Utilizando a calculadora do software, foi possível verificar a confiabilidade para 12 e 24 meses do equipamento, conforme quadro 13.

Tipo de Relatório	QCP Weibull++
Informações do Usuário	
Usuário	DAELT Departamento Acadêmico de Eletrotécnica
Empresa	Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Data	18/05/2016
Entradas do Usuário	
Tempo Final da Missão (Mês) =	12
Saída do Weibull++ 8	
$R(t=12) =$	0,900227

Tipo de Relatório	QCP Weibull++
Informações do Usuário	
Usuário	DAELT Departamento Acadêmico de Eletrotécnica
Empresa	Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Data	18/05/2016
Entradas do Usuário	
Tempo Final da Missão (Mês) =	24
Saída do Weibull++ 8	
$R(t=24) =$	0,231837

Quadro 13 – Confiabilidade 12 e 24 meses

Fonte: do Autor (2016)

Abaixo temos o gráfico da confiabilidade pelo tempo.

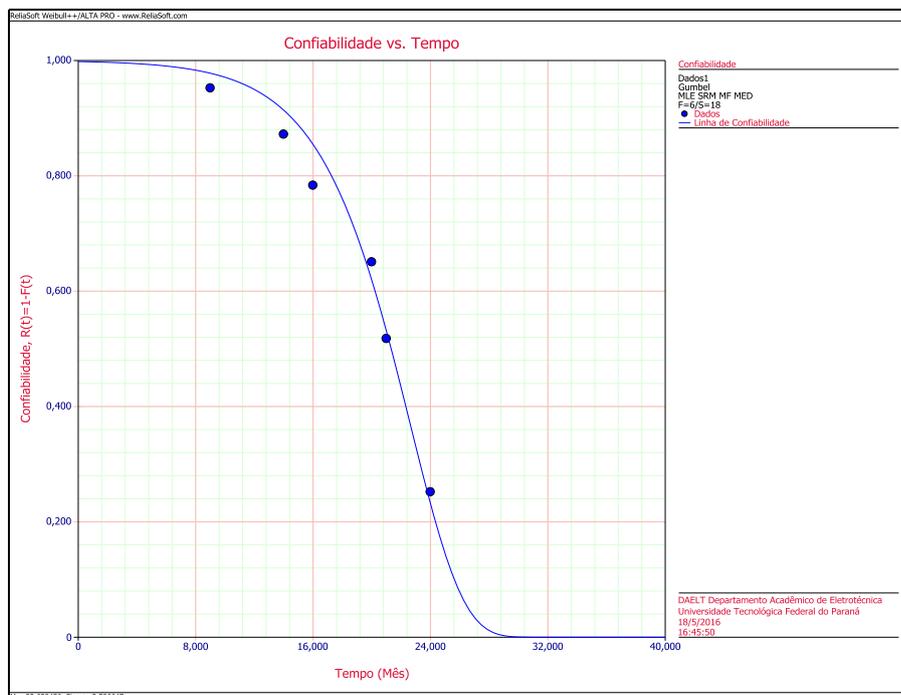


Figura 51 – Curva Confiabilidade pelo tempo

Fonte: Do Autor (2016)

Abaixo temos o gráfico da pdf (função densidade de probabilidade).

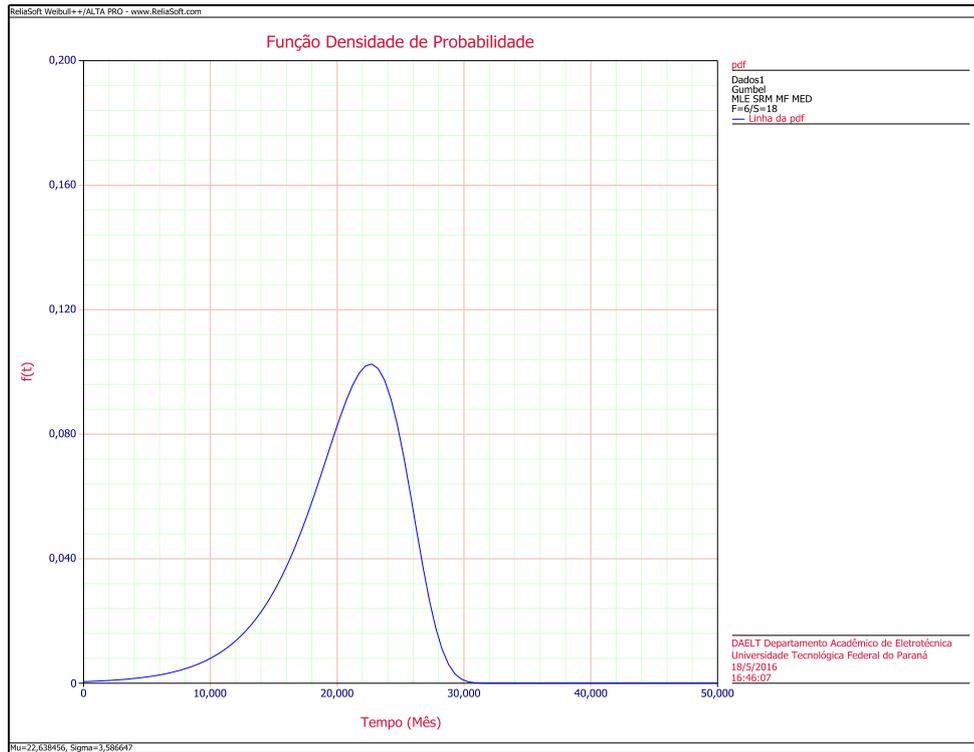


Figura 52 – Curva pdf.

Fonte: Do Autor (2016)

Com o acompanhamento por análise de vibração, aplicando o teste de aderência aos dados levantados o melhor resultado a ser implementado foi a distribuição Exponencial 2 parâmetros, conforme quadro 14.

Informações do Usuário		
Usuário	DAELT Departamento Acadêmico de Eletrotécnica	
Empresa	Universidade Tecnológica Federal do Paraná	
Data	18/05/2016	
Parâmetros		
Distribuição:	Exponencial-2P	
Análises:	RRX	
Método do IC:	MF	
Ranqueando:	MED	
Tempo Médio (Mês)	53,05522	
Gama (Mês)	6,42343	
Valor da LK	-11,022067	
Rho	-1	
F \ S	2 \ 22	
LOCAL VAR/COV MATRIX		
	Var-Teta=1407,428193	
	[Nota: Teta = (1 / Lambda)]	

Quadro 14 – Relatório implementação distribuição Exponencial.

Fonte: do Autor (2016)

Utilizando a calculadora do software, foi possível verificar a confiabilidade para 12 e 24 meses do equipamento, conforme quadro 15.

Tipo de Relatório	QCP Weibull++
Informações do Usuário	
Usuário	DAELT Departamento Acadêmico de Eletrotécnica
Empresa	Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Data	18/05/2016
Entradas do Usuário	
Tempo Final da Missão (Mês) =	12
Saída do Weibull++ 8	
R(t=12) =	0,949801

Tipo de Relatório	QCP Weibull++
Informações do Usuário	
Usuário	DAELT Departamento Acadêmico de Eletrotécnica
Empresa	Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Data	18/05/2016
Entradas do Usuário	
Tempo Final da Missão (Mês) =	24
Saída do Weibull++ 8	
R(t=24) =	0,717998

Quadro 15 – Confiabilidade 12 e 24 meses

Fonte: do Autor (2016)

Abaixo temos o gráfico da confiabilidade pelo tempo.

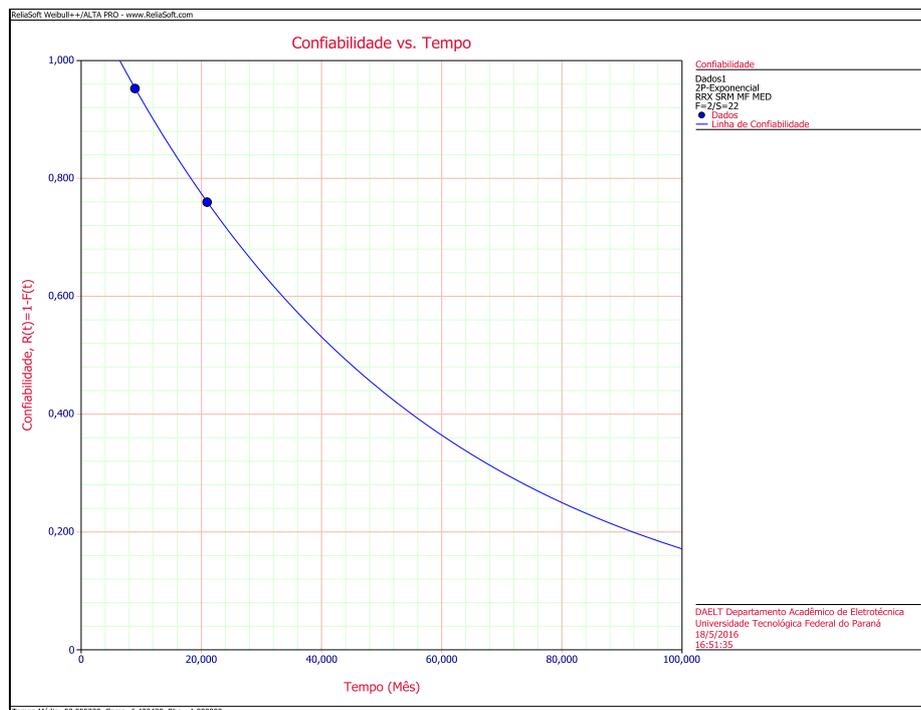


Figura 53 – Curva Confiabilidade pelo tempo

Fonte: Do Autor (2016)

Abaixo temos o gráfico da pdf (função densidade de probabilidade).

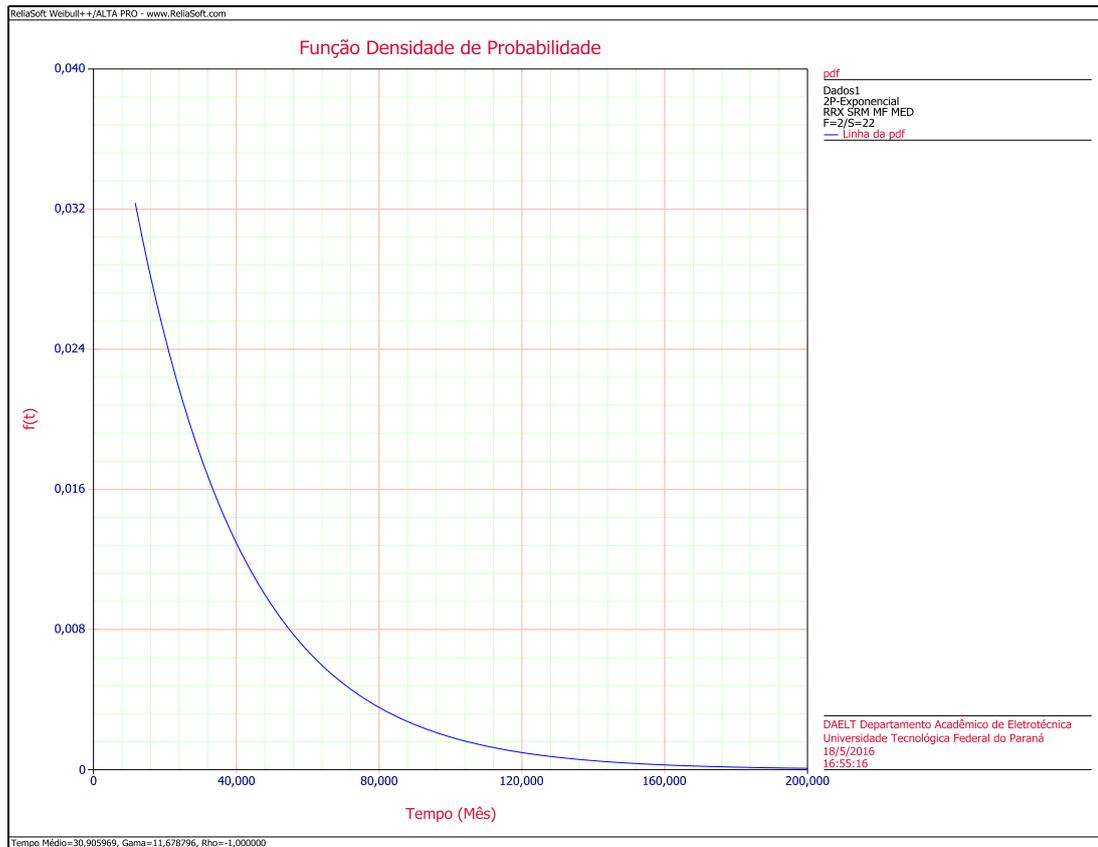


Figura 54 – Curva pdf.

Fonte: Do Autor (2016)

5. Conclusões

Este capítulo apresenta as conclusões da monografia, referente a confiabilidade e análise de vibrações, onde foi aplicada para analisar vibrações em um exaustor de tiragem de caldeira e em mancais de prensa de máquina de papel, com a finalidade de aumentar a confiabilidade, reduzir paradas não programadas, reduzir custos de manutenção e perdas de produção.

Nos três equipamentos estudados obteve-se aumento da confiabilidade utilizando análise de vibração. Para o primeiro período de 12 meses houve pequeno aumento da confiabilidade, para o período de 24 meses para o exausto e o mancal da 2ª Prensa tem-se um aumento considerável de 61,63% e 48,61% respectivamente.

Abaixo tabela com os resultados de confiabilidades obtidos com e sem o acompanhamento preditivo por análise de vibração:

Exaustor	Sem Preditiva	Com Preditiva	Aumento Confiabilidade
12 meses	77,50%	88,01%	10,51%
24 meses	13,68%	75,31%	61,63%

1ª Prensa	Sem Preditiva	Com Preditiva	Com Preditiva
12 meses	87,06%	90,31%	3,25%
24 meses	58,69%	66,84%	8,15%

2ª Prensa	Sem Preditiva	Com Preditiva	Com Preditiva
12 meses	90,01%	94,98%	4,97%
24 meses	23,18%	71,79%	48,61%

Quadro 16 – Confiabilidade 12 e 24 meses

Fonte: do Autor (2016)

Quanto aos objetivos específicos, conclui-se:

- a) todos os fundamentos teóricos característicos para a análise de vibrações descrita foram indispensáveis para as análises ou diagnósticos desta pesquisa;
- b) a configuração da estrutura dos dados necessários no programa de análise de vibrações, bem como o mapeamento dos pontos de coleta de vibrações dos equipamentos definidos, atenderam necessidades desta pesquisa;
- c) por intermédio dos dados coletados e armazenados, pode-se implementar a confiabilidade quantitativa dos equipamentos, utilizando programas específicos de confiabilidade;

6. REFERÊNCIAS

White, Glenn D - **Introduction to MACHINE VIBRATION** – DLI Engineering Corp
Winslow, Agosto de 2008.

Faustini, José Carlos – **Curso Básico de Vibrações Aplicado as Máquinas** - 2012

Mitchell, John S. **From Vibration Measurements to Condition Based Maintenance**. San Juan Capistrano, California, 2008.

Mitchell, John S - Physical **Asset Management Handbook**, Quarta Edição, 2006.

Asset Management Master Planning: **The Evolution of Maintenance Master Planning** – Webinar.com Acesso: Março/2013

From Vibration Measurements to Condition Based Maintenance - **70 Years of Continuous Progress** – Reliabilityweb.com Acesso: Março/2013.

Secall, Jorge Martins – **Apresentação de Gestão de Ativos** –
<http://www.cbtu.gov.br/estudos/pesquisa/viseminarioantp/080306/jorge/antp.pdf>
Acesso: Março / 2013.

Presented by U.S. Environmental Protection Agency and U.S. Department of
Transportation - **Multisector Asset Management Case Studies**, 2011.

De Almeida, Márcio Tadeu – **Manutenção Preditiva: Benefícios e Lucratividade** –
Escola Federal de Engenharia de Itajubá, 2010.

Fernandes, João Candido – **Manutenção Corretiva** – UNESP Universidade
Estadual Paulista, 02 de Setembro de 2010.

COMITTI, A., **Por que Investir em Manutenção Preditiva**, Revista Mecatrônica
Atual - no 16. 2004.

Seixas, E. S., **Confiabilidade Aplicada na Manutenção**. Rio de Janeiro, 2002.

ALMEIDA, Marcio Tadeu. **Vibrações Mecânicas Para Engenheiros**. São Paulo: Edgard Blucher, 1990.

FUNDAÇÃO DE PESQUISA E ASSESSORAMENTO À INDÚSTRIA. **Análise de Vibrações**. Itajubá, 2000.

FUNDAÇÃO DE PESQUISA E ASSESSORAMENTO À INDÚSTRIA. **Análise de Vibrações em Rolamentos e Engrenagens**. Itajubá, 2001.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **Norma ISO 10816-1**. 1995.

KARDEC, Alan; NASCIF, Júlio. **Manutenção: Função Estratégica**. Rio de Janeiro: Quality Mark, 2001.

KARDEC, Alan; NASCIF, Júlio; BARONI, Tarcísio. **Gestão Estratégica e Técnicas Preditivas**. Rio de Janeiro: Quality Mark, 2002.

MOUBRAY, John. **Manutenção Centrada em Confiabilidade**. Lutterworth, Inglaterra: Aladon, 2000.

NSK. **Vibrações Mecânicas Aplicadas à Manutenção**. São Paulo, 2004.

RIGONI, Emerson. **Metodologia para Implantação da Manutenção Centrada em Confiabilidade: uma Abordagem Fundamentada em Sistemas Baseados em Conhecimento e Lógica Fuzzy**. Florianópolis, 2009.

SIQUEIRA, Iony Patriota de. **Manutenção Centrada em Confiabilidade – Manual de Implementação**. Rio de Janeiro: Quality Mark, 2005.

SKF. **Análise de Máquinas Através de Monitoramento de Vibrações**. São Paulo, 2000.

SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS. **Norma SAE J1739**. Warrendale, Estados Unidos, 2002.

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ. Sistema de Bibliotecas. **Normas para Elaboração de Trabalhos Acadêmicos**. Curitiba: UTFPR, 2008.

COSTA, Cid Augusto. **Notas de Aula: Análise do Custo de Ciclo de Vida** – UTFPR. Curitiba. 2012.

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

KHATER, Evaldo. **Fundamentos de Confiabilidade**. Instituto Superior de Tecnologia. São João Del Rei. 2009.

LAFRAIA, João Ricardo Barusso Lafraia. **Manual de Confiabilidade, Manutenibilidade e Disponibilidade**. Rio de Janeiro: Qualitmark: Petrobras, 2001.

PIAZZA, G., **Introdução a Engenharia de Confiabilidade**. Caxias do Sul: EDUCS, 2000.

RAUSAND, M.; HOYLAND, A. **System reliability theory: models, statistical methods and applications**. New York: Wiley, 2004.