

FUNDAÇÃO OSWALDO ARANHA
CENTRO UNIVERSITÁRIO DE VOLTA REDONDA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

EDUARDO PEREIRA
NATHAN NEBOJSZA E CUNHA

**CADERNO TÉCNICO PARA A IMPLANTAÇÃO DE UM SISTEMA
ONLINE DE MONITORAMENTO DA CONDIÇÃO DOS
EQUIPAMENTOS DE UMA TORRE DE RESFRIAMENTO**

VOLTA REDONDA
2019

FUNDAÇÃO OSWALDO ARANHA
CENTRO UNIVERSITÁRIO DE VOLTA REDONDA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**CADERNO TÉCNICO PARA A IMPLANTAÇÃO DE UM
SISTEMA ONLINE DE MONITORAMENTO DA CONDIÇÃO DOS
EQUIPAMENTOS DE UMA TORRE DE RESFRIAMENTO**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Mecânica do UniFOA como requisito à obtenção do título de bacharel de Engenheiro Mecânico.

Discentes:

Eduardo Pereira

Nathan Nebojsza e Cunha

Orientadores:

Prof. Dr. Alexandre Alvarenga Palmeira

Prof. Dr. Alexandre Fernandes Habibe

VOLTA REDONDA

2019

FOLHA DE APROVAÇÃO

Alunos:

Eduardo Pereira

Nathan Nebojsza e Cunha

Caderno técnico para a implantação de um sistema online de monitoramento da condição dos equipamentos de uma torre de resfriamento

Orientadores:

Prof. Dr. Alexandre Alvarenga Palmeira

Prof. Dr. Alexandre Fernandes Habibe

Banca Examinadora:

A Deus que nos guardou e deu forças, possibilitando essa conquista. Aos professores que nos orientaram e dividiram seu conhecimento durante esse trajeto. Também aos nossos familiares e amigos que nos apoiaram em todos os passos.

AGRADECIMENTOS

Temos gratidão a Deus por estar conosco em todos os momentos e por ser o farol que nos guiou durante os dias de tormenta.

Agradecemos aos nossos familiares pelo apoio incondicional e dedicação aplicada em nossa educação, mesmo com todas as dificuldades da vida.

Mostramos gratidão aos orientadores, Prof. Dr. Alexandre Alvarenga Palmeira e Prof. Dr. Alexandre Fernandes Habibe que foram essenciais na conclusão deste trabalho.

RESUMO

Com a identificação de uma oportunidade, desenvolvemos neste trabalho uma sequência de atividades para a implantação de um sistema online de monitoramento da condição dos equipamentos de uma torre de resfriamento.

Gestão da condição das máquinas instaladas nesse setor exploramos a técnica de análise de vibrações. Foram realizados levantamentos de dados técnicos e realizado o cruzamento com normas existentes, possibilitando a definição de limites de alarme de vibração para indicar uma condição anormal de funcionamento do ativo.

Com a configuração do sistema verificamos que os resultados obtidos atenderam a necessidade de gestão da condição dos equipamentos, auxiliando a tomada de decisões.

Palavras chaves: Análise de vibrações. Gestão. Sistema online.

ABSTRACT

With the identification of an opportunity, we developed in this work a sequence of activities for the implementation of an online system for monitoring the condition of the equipment of a cooling tower.

Management of the condition of the machines installed in this sector we explore the technique of vibration analysis. Technical data were collected and cross-referenced with existing standards, allowing the definition of vibration alarm limits to indicate an abnormal condition of the asset.

With the configuration of the system we verified that the obtained results met the need of management of the condition of the equipment, aiding the decision making.

Keywords: Analysis of vibrations. Management. Online system.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1	Laminação de Tiras a Quente	19
2.2	Torres de Resfriamento	20
2.3	Histórico da Manutenção	21
2.4	Tipos de Manutenção.....	23
2.4.1	Manutenção Corretiva	24
2.4.2	Manutenção Preventiva.....	25
2.4.3	Manutenção Preditiva	26
2.4.4	Análise de Lubrificante	28
2.4.5	Análise estrutural.....	28
2.4.6	Análise do estado das superfícies	29
2.4.7	Análise das vibrações.....	30
2.4.8	Manutenção Centrada na Confiabilidade	30
2.5	Vibração.....	32
2.6	Movimento Harmônico	32
2.7	Frequência	34
2.8	Frequência natural e ressonância.....	34
2.9	Transformada de Fourier e espectro de frequências	35
2.10	Janelas de ponderação.....	40
2.10.1	Janela Retangular	41
2.10.2	Janela de Hanning.....	41
2.10.3	Janela de Hamming.....	42
2.10.4	Janela Triangular.....	43
2.10.5	Janela Kaiser-Bessel.....	44
2.10.6	Janela Flattop	45
2.10.7	Janela Exponencial	46
2.11	Medida	46
2.11.1	Amplitude	47
2.11.2	Deslocamento.....	48

2.11.3	Velocidade.....	49
2.11.4	Aceleração	50
2.12	Envelope de aceleração.....	50
2.13	Escolha dos parâmetros	51
2.14	Detecção de defeitos	51
2.14.1	Desbalanceamento.....	52
2.14.2	Rotor Excêntrico	54
2.14.3	Eixo Empenado	55
2.14.4	Desalinhamento.....	56
2.14.5	Folga Mecânica	57
2.14.6	Roçamento	59
2.14.7	Defeitos em Rolamentos	59
2.14.8	Forças aerodinâmicas de hidráulicas	61
2.14.9	Fluxo com turbulência	62
2.14.10	Cavitação	62
2.15	Níveis de alarme	63
2.15.1	Alarmes de nível global em velocidade	63
2.15.2	Alarmes de nível global em aceleração	68
2.16	Transdutores.....	69
2.16.1	Transdutores de Resistência Variável	70
2.16.2	Transdutores Piezelétricos	70
2.16.3	Transdutores Eletrodinâmicos	70
2.16.4	Transdutor Transformador Diferencial Linear Variável	71
2.16.5	Sensores de Vibração	71
2.16.6	Transdutor de Deslocamento	71
2.16.7	Acelerômetro	72
2.17	Montagem dos sensores.....	73
2.17.1	Localização dos Transdutores.....	73
2.17.2	Tipos de fixação	74
2.18	Analísadores de sinal	76
3	METODOLOGIA.....	77
3.1	Identificação dos equipamentos críticos da planta.....	78
3.2	Detalhamento das características construtivas dos ativos.....	78

3.3	Definição dos níveis de alarme	78
3.4	Definição dos pontos de monitoramento	79
3.5	Cadastro dos equipamentos	79
4	DESENVOLVIMENTO	80
4.1	Identificação dos equipamentos críticos da planta.....	80
4.2	Detalhamento das características construtivas dos ativos	84
4.3	Definição dos níveis de alarme	88
4.3.1	Níveis de alarme para os motores.....	88
4.3.2	Níveis de alarme para as bombas	90
4.3.3	Níveis de alarme para os redutores.....	91
4.3.4	Níveis de alarme para os exaustores	92
4.4	Definição dos pontos e montagem dos sensores	93
4.4.1	Fixação dos sensores nos motores	95
4.4.2	Fixação dos sensores nas bombas	95
4.4.3	Fixação dos sensores nas redutoras e exaustores	96
4.5	Cadastro dos equipamentos	96
4.5.1	Cadastro dos pontos de medição	98
4.6	Interpretação dos resultados.....	101
5	CONCLUSÃO.....	104
6	REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA	105

LISTA DE ABREVIATURAS

BPFI	- Defeito na pista interna do rolamento
BPFO	- Defeito na pista externa do rolamento
BSF	- Defeito nos elementos girantes do rolamento
CPM	- Ciclos por minuto
ETE	- Estação de Tratamento de Efluentes
FTF	- Defeito na gaiola do rolamento
LA	- Lado acoplado
LOA	- Lado oposto ao acoplado
LTQ	- Laminador de Tiras a Quente
RMS	- Raiz média quadrática
RPM	- Rotações por minuto

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Circuito de água em uma torre de resfriamento.	21
Figura 2- Evolução do contexto industrial.	23
Figura 3- Inspeção de partículas magnéticas.	29
Figura 4- Inspeção por termografia.	29
Figura 5- Vibração de um sistema massa mola.	32
Figura 6- Projeção senoidal de um movimento harmônico.	33
Figura 7- Componentes de um sistema mecânico.	33
Figura 8- Frequências naturais de uma sendo excitadas durante a sua rampa de aceleração.	35
Figura 9- Sinal de vibração no domínio do tempo.	36
Figura 10- Espectro de frequências.	36
Figura 11- Sinal harmônico fundamental de 260 Hz no domínio do tempo. ...	37
Figura 12- Sinal do terceiro harmônico no tempo.	37
Figura 13- Sinal do quinto harmônico no tempo.	38
Figura 14- Sinal do sétimo harmônico no tempo.	38
Figura 15- Decompostos todos os componentes do sinal.	39
Figura 16- Janela Retangular para N=32.	41
Figura 17- Janela de Hanning com N=32.	42
Figura 18- Janela de Hamming com N=32.	43
Figura 19- Janela Triangular para N=32.	43
Figura 20- Janela Kaiser-Bessel com N=32 e com diferentes valores atribuídos para " β ".	44
Figura 21- Janela Flattop com N=32.	45
Figura 22- Janela Exponencial para N=32, com o valor final especificado como 0,1.	46
Figura 23- Sistema massa-mola em vibração.	47
Figura 24- Equivalência das amplitudes expressas.	48
Figura 25- Sinal de uma onda aleatória no domínio do tempo.	50
Figura 26- Identificação de frequências dos componentes da máquina.	52
Figura 27- Espectro típico de desbalanceamento.	53
Figura 28- Relação de fases de um desbalanceamento comum de massa.	53

Figura 29- Relação de fases de um desbalanceamento acoplado.	53
Figura 30- Relação de fases de um desbalanceamento em balanço.	54
Figura 31- Espectro típico de Excentricidade.	54
Figura 32- Relação de fases de excentricidade de uma polia.	55
Figura 33- Espectro típico de eixo empenado.	55
Figura 34- Relação de fases de eixo empenado.	56
Figura 35- Espectro típico de desalinhamento axial.	56
Figura 36- Relação de fases de desalinhamento axial.	57
Figura 37- Espectro típico de desalinhamento radial.	57
Figura 38- Relação de fases de desalinhamento radial.	57
Figura 39- Relação de fases e espectro típico das folgas.	58
Figura 40- Forma de onda e espectro de roçamento.	59
Figura 41- Espectros referentes às fases de degradação do rolamento.	60
Figura 42- Espectro típico de forças aerodinâmicas e hidráulicas.	61
Figura 43- Espectro típico de turbulência.	62
Figura 44- Espectro típico de cavitação.	62
Figura 49- Acelerômetro piezelétrico.	72
Figura 50- Recomendação para a fixação dos sensores.	73
Figura 51- Locais de medição em bombas horizontais.	74
Figura 52- Relação entre máxima frequência de resposta e tipos de montagem dos sensores.	75
Figura 53- Numeração dos pontos de medição seguindo o fluxo de energia.	79
Figura 54- Fluxograma para definição do tipo de manutenção a ser empregada.	81
Figura 55- Localização dos equipamentos que integram a torre de resfriamento.	82
Figura 56- Dimensões da base metálica utilizada para a fixação de sensores.	93
Figura 57- Detalhe do filete adesivo protegendo a borda do disco de fixação do sensor.	94
Figura 58- Localização dos sensores fixados nos motores.	95
Figura 59- Localização dos sensores fixados nas bombas.	95
Figura 60- Localização dos sensores fixados nas redutoras.	96

Figura 61- Gráfico de tendência do nível global de vibração do equipamento.	102
Figura 62- Espectro de Envelope de Aceleração da Bomba 01 do Sistema de Bombeamento de Água para a Torre.....	103

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Níveis de Alarme de Vibração segundo ISO 10816-7:2009.	63
Tabela 2- Níveis de Alarme de Vibração segundo NBR 10082:2011.	64
Tabela 3- Níveis de Alarme de Vibração segundo ISO 10816-3:2009.	65
Tabela 4- Classificação dos Ventiladores de acordo com sua aplicação.	66
Tabela 5- Limites de vibração absoluta, em testes realizados em campo.	67
Tabela 6- Níveis de Alarme para o Envelope de Aceleração.....	68
Tabela 7- Fator de escala para o Envelope de Aceleração.	69
Tabela 8- Matriz de criticidade para definição do grau de importância do ativo industrial.	80
Tabela 9- Identificação dos equipamentos que compõem o Sistema de Bombeamento de Água para a Torre.....	83
Tabela 10- Identificação dos equipamentos que compõem o Sistema de Resfriamento de Água.	83
Tabela 11- Identificação dos equipamentos que compõem o Sistema de Bombeamento de Água Fria para o LTQ.....	84
Tabela 12- Características Técnicas do Sistema de Bombeamento de Água para a Torre.	85
Tabela 13- Características Técnicas do Sistema de Resfriamento de Água. .	86
Tabela 14- Características Técnicas do Sistema de Bombeamento de Água Fria para o LTQ.	87
Tabela 15- Níveis de alarme para os motores dos sistemas de Bombeamento de Água para a Torre e de Resfriamento de Água.	88
Tabela 16- Níveis de alarme para os motores do Sistema de Bombeamento de Água Fria para o LTQ.	89
Tabela 17- Níveis de Alarme para as bombas dos sistemas de Bombeamento de Água para a Torre e Bombeamento de Água Fria para o LTQ.	90
Tabela 18- Níveis de Alarme para os redutores do Sistema de Resfriamento da Água.	91
Tabela 19- Classificação dos exaustores do Sistema de Resfriamento da Água.	92

Tabela 20- Níveis de alarme para os exaustores do Sistema de Resfriamento da Água.	92
Tabela 21- Estrutura do banco de dados do sistema online.	97
Tabela 22- Configuração do parâmetro de velocidade.	98
Tabela 23- Parâmetros de análise por banda de frequência para os motores.	99
Tabela 24- Parâmetros de análise por banda de frequência para as bombas com 6 pás.	99
Tabela 25- Parâmetros de análise por banda de frequência para as bombas com 7 pás.	100
Tabela 26- Parâmetros de análise por banda de frequência para os redutores com 25 dentes no pinhão.	100

LISTA DE SIGLAS

A	- AMPLITUDE
b	- VALOR FINAL DA EXPONENCIAL
C	- AMORTECIMENTO
d	- DIÂMETRO DOS ELEMENTOS GIRANTES DO ROLAMENTO
D	- DIÂMETRO PRIMITIVO DO ROLAMENTO
f	- FREQUENCIA
K	- RIGIDEZ
M	- MASSA
n	- EVENTOS
N	- TAMANHO DA JANELA
Nbs	- NÚMERO DE ELEMENTOS GIRANTES DO ROLAMENTO
t	- TEMPO
$x(t)$	- DESLOCAMENTO INSTANTÂNEO
$X(f)$	- RESPOSTA EM FREQUENCIA
w	- VELOCIDADE ANGULAR
Wn	- FREQUÊNCIA NATURAL
$W(n)$	- JANELA DE PONDERAÇÃO
α	- ÂNGULO DE CONTATO DO ROLAMENTO

1 INTRODUÇÃO

A 4ª Revolução Industrial, identificada também como Indústria 4.0, dá início a transformação digital com a popularização da internet e a utilização dessa ferramenta para os negócios. O que faz as empresas acompanharem de perto essa tendência.

O impacto com a migração para Indústria 4.0 é estimado em R\$ 73 bilhões/ano no setor industrial, segundo o Governo Federal, com o controle do processo produtivo, customização da produção, redução de custos com sobressalentes, dentre outros. Sendo necessário assim, avanços tecnológicos para diminuir os custos, melhorar desempenho e alcançar melhores resultados.

Um dos instrumentos utilizados pela Indústria 4.0 é a Internet das Coisas que tem o objetivo de conectar todos os dispositivos e equipamentos por meio da internet, gerando assim uma grande quantidade de dados. Esses dados por sua vez são identificados como Big Data e configuram mais um instrumento da 4ª Revolução Industrial. Esse instrumento fica responsável por gerenciar essa grande quantidade de informações e auxiliar a tomada de decisões.

Com a necessidade de maior controle dos processos e equipamentos da planta, também se faz primordial o desenvolvimento de novas tecnologias para a gestão da condição dos ativos.

No Setor de Laminação a Quente (LTQ) são conformadas placas de aço aquecidas numa faixa de temperatura entre 1100°C e 1150°C e o controle de temperatura desse processo e das máquinas utilizadas é indispensável. Esse setor utiliza água em todos os paços para a obtenção do produto final.

O LTQ conta com uma Estação de Tratamento de Efluentes (ETE) para receber e tratar toda a água utilizada. Essa estação processa aproximadamente 14435 m³ de água por hora, recebendo a água numa temperatura de aproximadamente 38°C e retornando para o processo uma água tratada com temperatura igual ou inferior a 32°C.

Sendo assim a aplicação de uma tecnologia para o monitoramento remoto da condição dos ativos dessa planta se torna uma opção favorável. Para auxiliar a manutenção no gerenciamento da condição dos ativos dessa planta apresentaremos neste trabalho um caderno técnico para a implantação de um sistema online de monitoramento da condição das máquinas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Laminação de Tiras a Quente

A laminação é um processo de conformação mecânica, onde o metal é forçado a passar entre dois cilindros, girando em sentido oposto, com a mesma velocidade superficial, distanciados entre si a uma distância menor que o valor da espessura da peça a ser deformada. Pela laminação, o perfil obtido pode ser o definitivo e a peça resultante pronta para ser usada (CHIAVERINI, 1986).

Em princípio, o laminador é composto basicamente de cilindros, mancais, carcaça ou gaiola, as quais, por meio de mancais, suportam os cilindros e fixam essas partes e um motor para fornecer potência aos cilindros e controlar a velocidade de rotação. Esse conjunto é chamado de cadeira de laminação. Na laminação contínua as cadeiras são colocadas uma após a outra, em linha reta, de modo que a peça sob laminação avance continuamente, sendo trabalhada em vários passes, até que, ao sair da última cadeira, o produto esteja acabado (CHIAVERINI, 1986).

Nas usinas siderúrgicas o processo de laminação se encontra entre os mais importantes, especialmente a laminação de tiras a quente em que aborda quase a metade de todo o aço produzido. Os equipamentos dessa linha exigem a máxima capacidade produtiva e disponibilidade operacional (PRIMETALS).

O processo de Laminação de Tiras a Quente (LTQ) é a etapa de acabamento da laminação de chapas finas. Nesta operação, o material é submetido a sequências de deformação constituídas de cinco a sete passes, com as gaiolas de laminação ordenadas umas em frente às outras, realizando uma operação contínua.

2.2 Torres de Resfriamento

Uma das formas mais convenientes de remover calor consiste na utilização da água, numa temperatura que se pode considerar fria, sem estar, contudo, nas temperaturas baixas que caracterizam a água gelada. O resfriamento da água pode ser feito em grandes reservatórios, onde sua superfície livre fica em contato com o ar, porém é quase sempre mais prático e econômico empregar torres de resfriamento (MACINTYRE, 1997).

As torres de resfriamento têm a finalidade de remover calor dos processos industriais, usando água como fluido de resfriamento. O seu funcionamento consiste em recircular continuamente a água destes processos, resfriando e protegendo estes sistemas através de tratamento químico. A água que sai dos equipamentos de processo é alimentada e distribuída no topo da torre de resfriamento. A água cai de aspersores na parte superior de uma caixa que possui paredes laterais permitindo a entrada de ar por venezianas (MACINTYRE, 1997).

Uma torre de resfriamento do tipo contracorrente possui uma abertura na parte superior onde sai o ar, graças à atuação de um ventilador axial de pás fixas ou de passo ajustável. A ação do ventilador produz uma rarefação na torre, de modo a induzir a entrada de ar em sentido contrário ao da água que goteja (MACINTYRE, 1997).

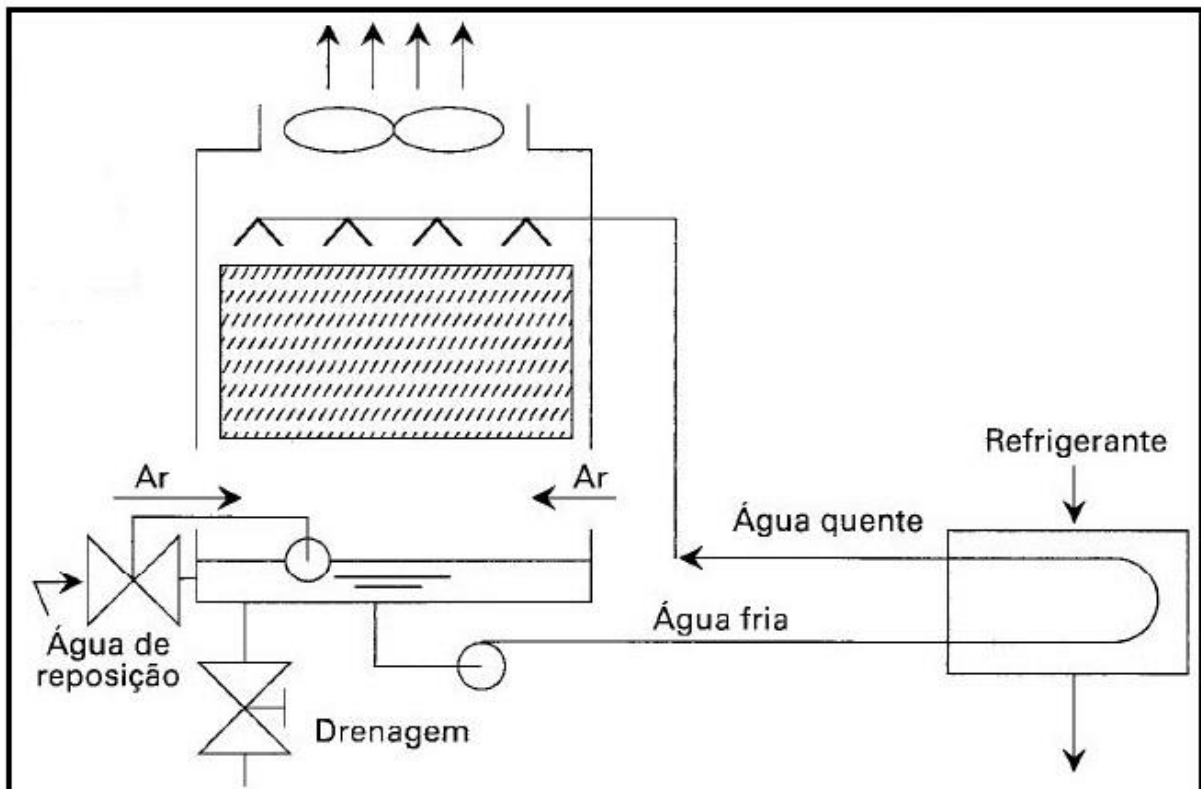


Figura 1- Circuito de água em uma torre de resfriamento.

Fonte: Stoecker e Jabardo, 2002.

2.3 Histórico da Manutenção

Segundo a norma NBR 5462 (1994) o termo manutenção pode ser definido como, uma combinação de ações técnicas e administrativas, destinadas a manter ou recolocar um equipamento em um estado no qual possa desempenhar uma função requerida. Essas ações englobam a conservação, a restauração, a adequação, a substituição e a prevenção.

Apesar de menosprezada, a manutenção sempre existiu, desde os tempos mais longínquos. Com a chegada da Revolução Industrial e o surgimento das máquinas têxteis e máquinas a vapor, a manutenção foi ganhando mais visibilidade, entretanto, se resumia apenas em intervir e consertar os equipamentos que falhavam.

Até o início da Segunda Guerra Mundial a indústria era pouco mecanizada, a produtividade não era prioritária, e os equipamentos eram simples e

superdimensionados. Apenas os serviços mais básicos como limpeza, lubrificação e reparo após a quebra eram executados. Esse período marca a Primeira Geração da manutenção, em que basicamente se resumia em manutenção corretiva não planejada (PINTO e XAVIER, 2001).

A Segunda Geração da manutenção surgiu com a Segunda Guerra Mundial onde ocorreu uma drástica mudança no contexto social. A mão-de-obra disponível caiu significativamente junto com o aumento da demanda por novos produtos. A mecanização naquele período teve um forte aumento assim como as plantas industriais se tornaram mais complexas. Diante de todo este cenário iniciou-se uma busca pela produtividade, fazendo com que as indústrias dependessem do bom funcionamento das máquinas. Isto levou a conclusão de que as falhas deveriam ser evitadas, o que resultou no conceito de manutenção preventiva (PINTO e XAVIER, 2001).

A Terceira Geração da manutenção ocorreu na década 1970 com o aumento da competitividade entre as empresas. O objetivo de maximizar os lucros entraria em conflito com a paralisação da produção, geralmente ocasionada por uma falha de equipamento, acabou se tornando uma grande preocupação. O aumento da automação e mecanização passou a indicar que quanto maior o número de falhas menor seria a capacidade de se manter os padrões de qualidade da época. Nasceu-se então o conceito de uma manutenção preditiva, em que, não somente a disponibilidade era um fator relevante, mas também a segurança e o meio ambiente (PINTO e XAVIER, 2001).

Em 2013 foi apresentado pela primeira vez na Feira de Hannover, na Alemanha, o tema Indústria 4.0, um projeto do Governo Alemão que tem o objetivo que conectar toda a manufatura por meio das novas tecnologias de informação. A integração das novas tecnologias de informação com a indústria marcará o início da Quarta Revolução Industrial. Segundo Nascif (2001) essa nova fase permitirá desenvolver ainda mais o monitoramento e controle das máquinas por meio de sensores avançados, sistema de coleta de dados, sistemas de armazenamento e transferência de dados e algoritmos, que, além de possuírem a capacidade de prever a ocorrência da falha, poderá também sugerir que ação deverá ser tomada. Essa nova

forma de prever e fornecer alternativas de solução é denominada de Manutenção Prescritiva.

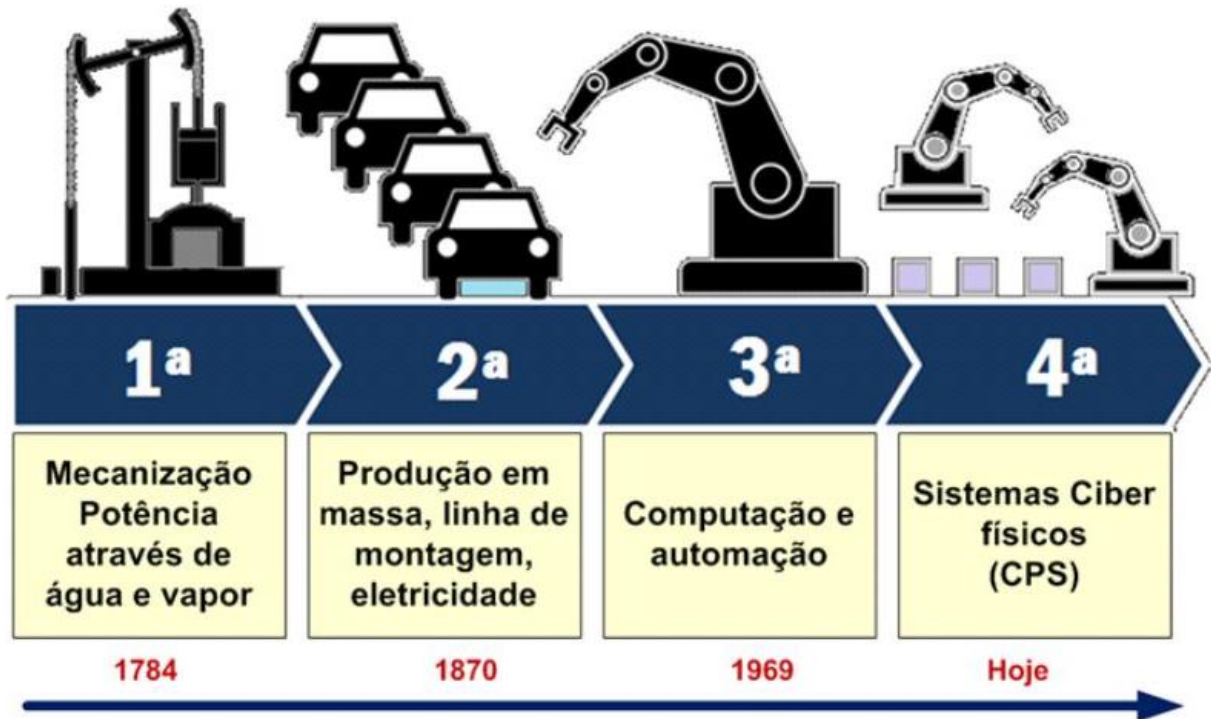


Figura 2- Evolução do contexto industrial.

Fonte: www.tecem.com.br

2.4 Tipos de Manutenção

A manutenção sempre sofre modificações acompanhando o desenvolvimento da indústria. Viana (2002) afirma que existem diversos tipos de manutenção, e que são basicamente, as formas como são encaminhadas as intervenções nos instrumentos de produção. Apesar de algumas variações irrelevantes a manutenção pode ser classificada de forma geral da seguinte forma:

2.4.1 Manutenção Corretiva

Esta é o tipo de manutenção mais antigo das indústrias. De início não se tinha ferramentas avançadas de análise que pudessem detectar as falhas com antecedência, também pouco se sabia sobre as causas das falhas. O defeito geralmente só era detectado quando a máquina parava de funcionar.

A manutenção corretiva nos dias atuais ainda é muito utilizada. Segundo Filho (2008), a primeira forma de manutenção introduzida nas indústrias geralmente começa pela corretiva. E algumas empresas operam apenas com a manutenção corretiva por causa de fatores tais como: a desconsideração e não acompanhamento dos custos da manutenção; falta de consciência da importância da manutenção dentro do processo produtivo; falta de um histórico de dados do equipamento; desconhecimento de melhores técnicas de gerenciamento da manutenção.

Com a evolução a manutenção corretiva passou a ser classificada de dois modos: Manutenção Corretiva Planejada e Manutenção Corretiva Não Planejada.

A manutenção corretiva não planejada é definida como um reparo após uma falha inesperada. Neste caso não há muito tempo para a equipe de manutenção se planejar e preparar as ferramentas. Em alguns casos pode se tornar vantajosa, tudo irá depender do custo envolvido e da criticidade do equipamento.

Muito se associa a manutenção corretiva não planejada a altos custos porque muitos equipamentos dentro de um processo produtivo poderão causar uma parada de produção, uma perda de produto, alteração da qualidade e até mesmo uma ameaça à segurança caso venham a falhar. Por outro lado, em alguns casos poderá ser vantajosa a adoção de uma manutenção corretiva não planejada, como em equipamentos de menor importância, que além possuírem baixo custo de reposição, não oferecem risco ao processo.

A manutenção corretiva planejada acontece a partir de uma decisão tomada com antecedência, geralmente por parte da gerência de manutenção. Este tipo de manutenção necessita de um conhecimento e um acompanhamento mais

aprofundado do equipamento. Para a tomada de decisão são necessários dados do equipamento, seu histórico e acompanhamento.

Mesmo se a decisão seja deixar o equipamento operar até a falha a manutenção corretiva planejada em alguns casos será a melhor opção pois permitirá um planejamento prévio e possibilita que o reparo seja feito de forma mais segura e eficiente gerando uma harmonia entre a manutenção e produção.

A preferência por uma manutenção corretiva planejada traz inúmeros benefícios e algumas dessas vantagens de acordo com Pinto (2001) são: os interesses da produção podem ser conciliados com as necessidades de intervenção; promove maior segurança, pois é possível saber o grau de risco que a falha poderá causar; possibilidade de otimizar custos com sobressalentes, equipamentos e ferramental.

2.4.2 Manutenção Preventiva

Este tipo de manutenção tem a finalidade de prevenir a ocorrência de falhas. Assim como na manutenção corretiva ela é viável em algumas situações e outras não. A manutenção preventiva é realizada antes de ocorrer uma falha ou defeito e possui a característica de sempre ser planejada. A parada do equipamento é feita periodicamente, ou seja, de tempos em tempos deve-se parar o equipamento para substituir as peças gastas por novas.

O início de uma avaria em uma peça de um equipamento que opera com várias peças interligadas entre si, acaba por gerar esforços dinâmicos nas outras peças em perfeito estado. A manutenção preventiva ajuda diminuir este problema, identificando as peças avariadas com antecedência. Este método de manutenção também se consegue uma melhor distribuição dos gastos com sobressalentes e proporciona uma melhora nos investimentos.

Uma das características da manutenção preventiva é ajudar a reduzir a improvisação em um processo produtivo. Uma parada de produção não programada

acarreta em grandes perdas e prejuízos, e com o objetivo de evitar ao máximo uma parada não programada os operadores podem recorrer a muitos improvisos no dia-a-dia para tentar evitar tal prejuízo. As manutenções baseadas na prevenção com paradas periódicas ajudam a prevenir e reduzir tais improvisos.

A manutenção preventiva sempre necessita de um planejamento para entrar em conformidade com a produção. Para se desenvolver um cronograma de intervenções são necessários dados estatísticos e a escassez de informações sobre o equipamento é um dos grandes problemas enfrentados por esta técnica. Segundo Filho (2008) a carga de trabalho do equipamento, que poderá ser maior do que o esperado, dificilmente é levada em consideração durante um planejamento, e até o fabricante pode negligenciar este dado importante, bem como as características do ambiente onde o equipamento irá operar e o meio em que ele se encontra. Isto pode ocasionar uma falha antes do tempo previsto e também poderá levar uma reposição de forma prematura.

Como as paradas são programadas, os equipamentos devem sofrer intervenções no tempo certo. Isso resulta a parada do equipamento em operação ou até mesmo a parada da produção. Esta é outra grande desvantagem da manutenção preventiva, pois, muitas das vezes os equipamentos se encontram em perfeito estado, gerando um certo prejuízo com as paradas, e também existe o risco acrescentar defeitos ao equipamento ou sistema que antes não existiam.

2.4.3 Manutenção Preditiva

É o tipo de abordagem que mais gerou evolução no conceito de manutenção. Todo equipamento em operação gera parâmetros que podem ser mensurados, comparados e analisados. A manutenção preditiva utiliza destes parâmetros para indicar a condição real do equipamento, podendo informar o estágio de desgaste que se encontra a máquina, a natureza de sua avaria etc.

Utilizando de gráficos e da estatística, é uma técnica que permite prever a evolução da falha, realizar planejamentos, e obter o máximo da capacidade

e vida útil de um equipamento. Todos os dados são coletados com o equipamento em operação, fazendo com que se tenha um ganho enorme em eficiência e produtividade.

A manutenção preditiva sempre trabalha em conjunto com a manutenção corretiva planejada, sendo esta a forma mais eficiente. O monitoramento realizado pela manutenção preditiva emite diagnósticos que permitem criar um planejamento e uma preparação prévia para intervenção do equipamento que será feita pela manutenção corretiva planejada.

A manutenção detectiva é um tipo de manutenção aplicado em sistemas automatizados onde se possui equipamentos de proteção e comandos. Tem a finalidade de detectar falhas que não são perceptíveis aos sentidos humanos. O grande diferencial em relação a manutenção preditiva é ser aplicada em sistemas com alto grau de automação e permitir os técnicos e a equipe de manutenção realizar as leituras constantes em tempo real da situação dos sistemas e equipamentos.

Em situações que envolvem disponibilidade e confiabilidade a manutenção preditiva é uma das estratégias mais eficientes e mais baratas onde uma eventual falha gere um alto custo. De acordo com Pinto e Nascif (2001) algumas condições necessárias para se implementar uma manutenção preditiva são: onde o prejuízo e o custo de uma falha, caso ocorra, seja grande; os equipamentos ou planta devem permitir sua coleta de dados ou monitoramento; seja implementado um sistema de acompanhamento, análise e diagnóstico, sistematizado; as causas das falhas possam ser mensuradas e ter sua evolução acompanhada.

Para se detectar uma falha de um equipamento é necessário a aplicação de alguma técnica. Cada equipamento possui seus tipos de falhas específicos e cada falha possui sua natureza própria, que só poderá ser investigada com o método de investigação adequado. A manutenção preditiva conta com várias destas técnicas, que podem ser definidas de maneira geral como: análise de lubrificante; análise estrutural; análise do estado da superfície; análise de vibrações.

2.4.4 Análise de Lubrificante

A análise de lubrificante é um método que executa análises em laboratório feitos a partir de amostras de óleo. Os equipamentos laboratoriais permitem realizar análises exatas e rápidas dos lubrificantes das máquinas. Segundo a ALS Global os resultados levantam informações essenciais sobre as condições dos lubrificantes, os níveis de contaminação e o desgaste dos componentes do equipamento lubrificado pelo óleo. A análise de lubrificante pode ser distinguida em quatro categorias: espectrometria, ferrografia, análise físico-química e análise de contaminações.

Com os dados emitidos pelo laboratório é possível criar a melhor estratégia. As informações sobre o grau de contaminação e o grau de deterioração, por exemplo, permitem o pessoal da manutenção controlar tais variáveis aumentando a vida útil do óleo, o intervalo entre as trocas e resultando em grande economia.

Outra vantagem da análise de lubrificantes é a redução de custo com manutenções corretivas e aumento da confiabilidade de um equipamento. A ferrografia é uma técnica que permite detectar o desgaste de uma peça antecipadamente e acompanhar sua evolução. O controle do desgaste de um equipamento reduz custo de sobressalentes e possibilita conciliar a intervenção do equipamento com as paradas programadas

2.4.5 Análise estrutural

Utiliza-se de várias técnicas como raios X, raios gama, ultrassom, ecografia e interferometria holográfica. Com este método é possível se identificar defeitos estruturais ocultos como por exemplo trincas, inclusões, gota fria e etc. Na soldagem tem papel fundamental na detecção de trincas e porosidade. Um meio muito utilizado nas indústrias é o fluxo magnético induzido na superfície do material, em que as partículas magnéticas se aglomeram nas descontinuidades da superfície, tornando

possível a detecção de junta fria, trincas, dupla laminação, segregações, inclusões, dobramentos, falta de penetração (MMTEC, 2018).



Figura 3- Inspeção de partículas magnéticas.

Fonte: <https://globoend.com.br/portfolio-item/inspecao-de-particula-magnetica/>

2.4.6 Análise do estado das superfícies

Analisando a superfície de um componente é possível extrair muitas informações sobre o estado do equipamento. O atrito gerado pelo contato gera ruído, calor e causa desgaste nas superfícies em contato. Existem vários meios de se fazer uma análise superficial, o que possibilita um controle da deterioração, até mesmo a inspeção visual é uma técnica que pode ser aplicada na análise de estado das superfícies.

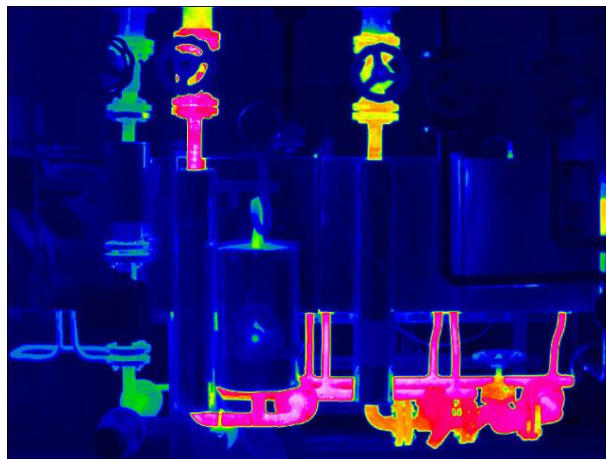


Figura 4- Inspeção por termografia.

Fonte: <https://cdn.infratec.eu/en/thermography/applications/thermography-chemical-industry-infratec-industrial-plant.jpg>

A endoscopia industrial é uma técnica que através de uma câmara de videoscopia permite detectar trincas, desalinhamentos e outros defeitos sem a necessidade de desmontar o equipamento. A termografia permite detectar avarias causadas pelo atrito excessivo ou algum desalinhamento através da captação da radiação infravermelha emitida pela superfície de um componente. De acordo com a MMTEC algumas outras principais técnicas de análise do estado das superfícies são: holografia, estroboscopia, molde e impressão.

2.4.7 Análise das vibrações

O estudo das vibrações é uma técnica amplamente empregada na manutenção preditiva. Por meio das vibrações é possível emitir um verdadeiro diagnóstico da “saúde” de um equipamento.

Toda massa excêntrica gera esforços dinâmicos, e o movimento vibratório é uma resposta da máquina aos esforços que a excitam. As vibrações podem gerar inúmeras avarias nos equipamentos, principalmente nas máquinas rotativas.

De acordo com o tipo de frequência produzido é possível detectar a natureza de uma avaria. Alguns dos tipos de defeitos mais comuns diagnosticados pela análise de vibrações são o desbalanceamento, desalinhamento e folgas (FUPAI, 2003).

2.4.8 Manutenção Centrada na Confiabilidade

A manutenção centrada na confiabilidade é uma metodologia que nasceu na indústria da aviação, juntamente com o aumento da complexidade da automação, em

que se exigia segurança e disponibilidade acima de tudo. É um método que visa estudar e investigar os diversos meios que podem gerar a falha em um equipamento, visualizando as ações de bloqueio pertinente a serem tomadas. É também uma ferramenta para decisões gerenciais (VIANA, 2002).

Apesar de ter sua origem há alguns anos, a MCC continua em estágio de desenvolvimento, sendo incorporada novas técnicas de manutenção, monitoramento e ferramentas estatísticas. O método possui conceitos gerais que podem ser aplicáveis a quase todos os tipos de sistemas, independente da tecnologia, onde se necessita aumento de confiabilidade e redução de custos (SIQUEIRA, 2009).

As consequências de determinadas falhas em que envolvem segurança, meio ambiente, e prejuízos em um processo são o foco principal da MCC em que visa evitar ou reduzir tais danos. Esta é uma mudança de paradigma, pois ao invés de se concentrar nas necessidades individuais dos ativos, os esforços são direcionados para as necessidades do processo em geral.

De acordo com Siqueira (2009) e seguindo a norma IEC 60300-3-11 e o relatório ATA MSG-3 a manutenção centrada na confiabilidade visa buscar alguns objetivos gerais, tais como:

- Preservar as funções dos equipamentos, com a segurança requerida;
- Restaurar sua confiabilidade e segurança projetada, após a deterioração;
- Otimizar a disponibilidade;
- Minimizar o custo do ciclo de vida;
- Atuar conforme os modos de falha;
- Realizar apenas as atividades que precisam ser feitas;
- Agir em função dos efeitos e consequências da falha; e
- Documentar as razões para a escolha das atividades.

2.5 Vibração

Rao (2008) aponta que a vibração de um corpo é caracterizada por qualquer movimento oscilatório que se repita periodicamente. Bueno (2010) indica também que a vibração pode ser demonstrada com uma massa suspensa por uma mola, onde essa massa oscila quando submetida a uma força vertical.

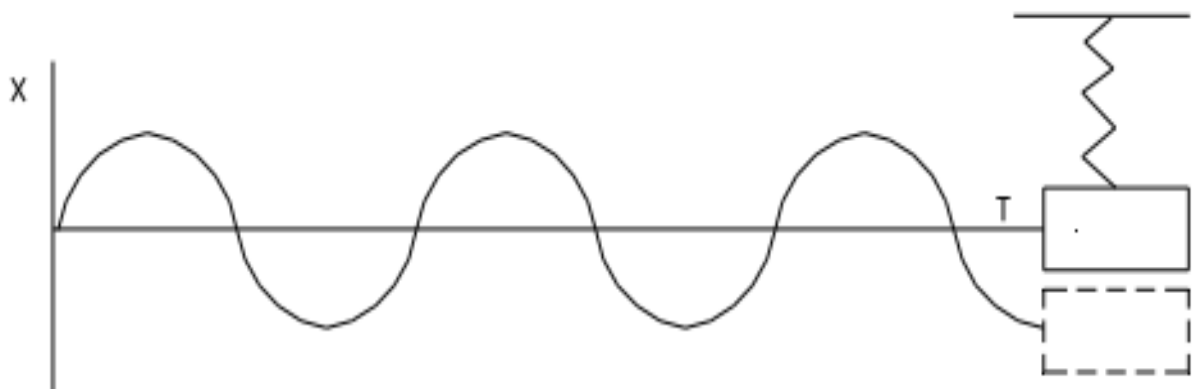


Figura 5- Vibração de um sistema massa mola.

Fonte: SKF, 2004.

2.6 Movimento Harmônico

A forma mais simples de vibração é representada pela senoide de um movimento harmônico (SKF, 2004). Essa senoide é definida pela seguinte equação:

$$x(t) = A \sin wt$$

Esse mesmo movimento harmônico possui amplitude, ângulo de defasagem de sinal, período e, conseqüentemente, frequência (FUPAI, 2005). Essas informações também podem ser observadas na ilustração a seguir.

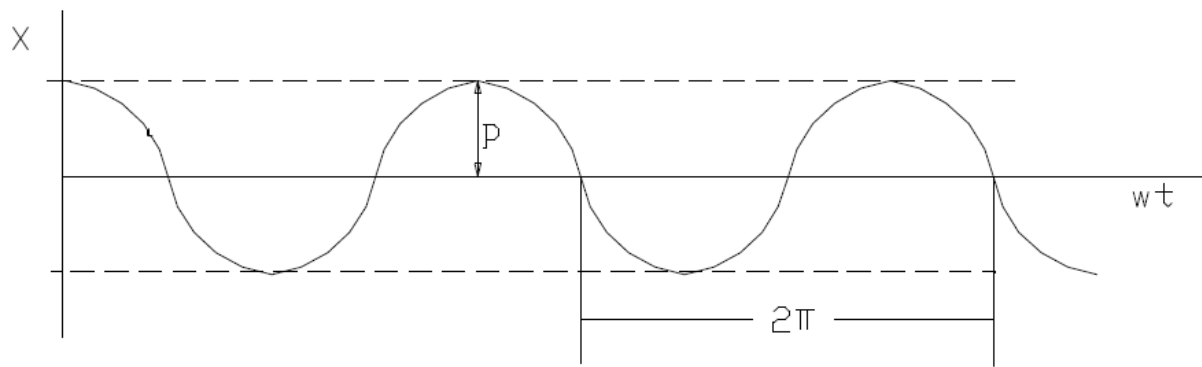


Figura 6- Projeção senoidal de um movimento harmônico.

Fonte: SKF, 2004.

FUPAI (2002) aponta que os sistemas mecânicos são compostos por rigidez, amortecimento e massa, que interagindo entre si são responsáveis por um comportamento dinâmico quando submetidos a uma força.

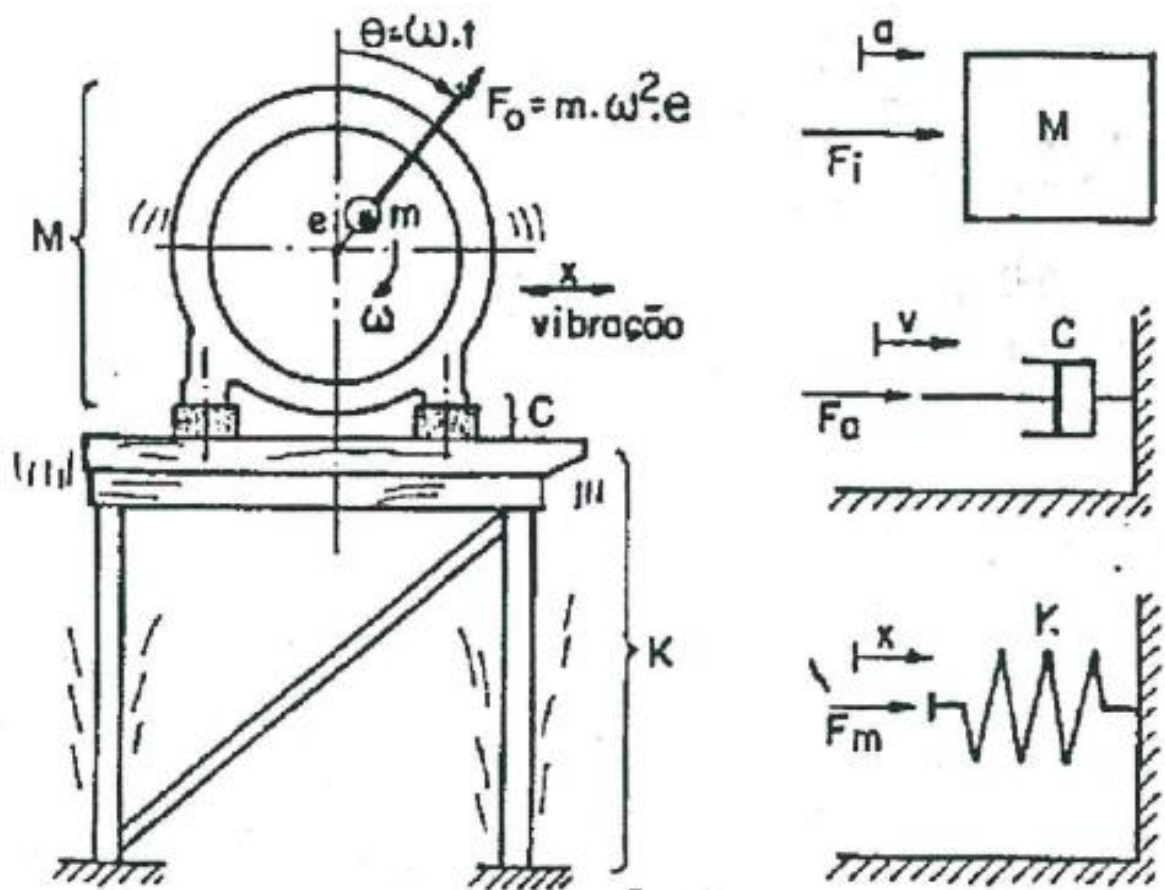


Figura 7- Componentes de um sistema mecânico.

Fonte: FUPAI, 2002.

2.7 Frequência

Conforme apontado por Mobley (1999) o número de repetições de um evento específico em uma unidade de tempo caracteriza a frequência. Nas máquinas rotativas seus componentes produzem uma força, devido a sua dinâmica de funcionamento, e conseqüente vibração com sua frequência característica. Observando por exemplo um ventilador que possui seis hélices. Toda vez que o eixo desse ventilador faz um giro completo, cada uma das seis hélices também completa esse ciclo. Neste caso observamos seis eventos por revolução. Em vista disso, se o eixo girar a 1000 RPM, a frequência das hélices será de 6000 ciclos por minuto. Assim como ciclos por minuto (CPM), a frequência é usualmente expressa em ciclos por segundo (CPS) ou Hertz (Hz).

2.8 Frequência natural e ressonância

A Frequência Natural é a frequência no qual o sistema possui vibração livre quando submetido a um movimento excitante, dependente apenas das variáveis de massa, rigidez e amortecimento conforme registrado por Mobley (1999). Esse fenômeno pode ser descrito pela seguinte equação:

$$W_n = \sqrt{\frac{K}{M}}$$

A ressonância é a resultante da coincidência da frequência de excitação com uma das frequências naturais do sistema, tendo como conseqüência grandes deslocamentos, deformações, e tensões que podem ocasionar a falha do mesmo (RAO, 2008).

Na imagem a seguir é possível observar as frequências naturais de um sistema sendo excitadas pela frequência de rotação do equipamento, sendo testado em sua rampa de aceleração.

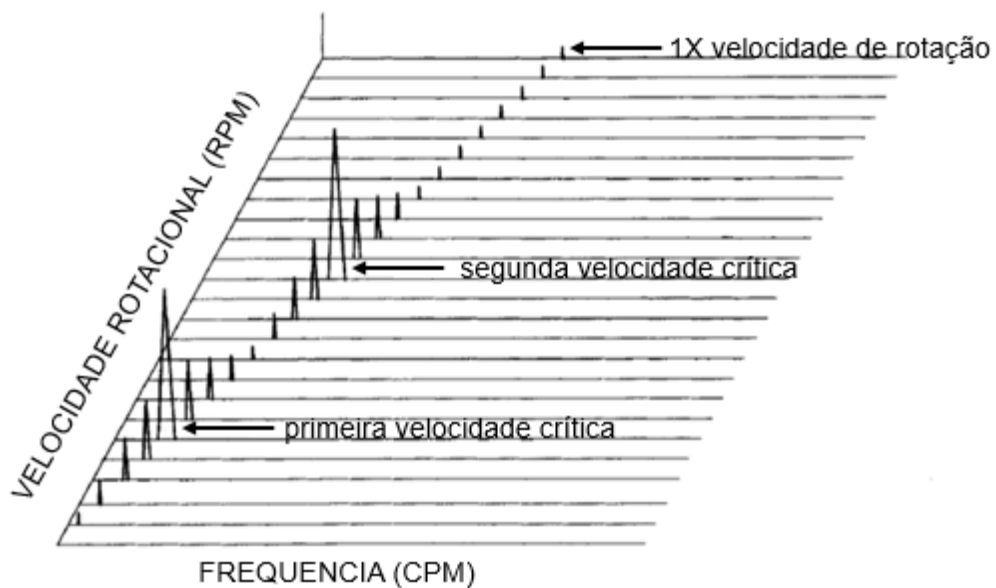


Figura 8- Frequências naturais de uma sonda excitadas durante a sua rampa de aceleração.

Fonte: Mobley, 1999.

2.9 Transformada de Fourier e espectro de frequências

Com a Transformada de Fourier é possível descrever qualquer função periódica empregando representações no domínio de frequência ou no domínio de tempo (MOBLEY, 1999). Ela é matematicamente indicada pela equação a seguir, onde “ $X(f)$ ” corresponde a resposta em frequência:

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-j2\pi ft} dt$$

$$j = \sqrt{-1}$$

De forma objetiva a Transformada de Fourier permite a identificação de amplitude e frequência de um sinal de vibração (FUPAI, 2005). A transição do sinal no domínio do tempo para o domínio da frequência pode ser observada nessa ordem conforme as figuras a seguir.

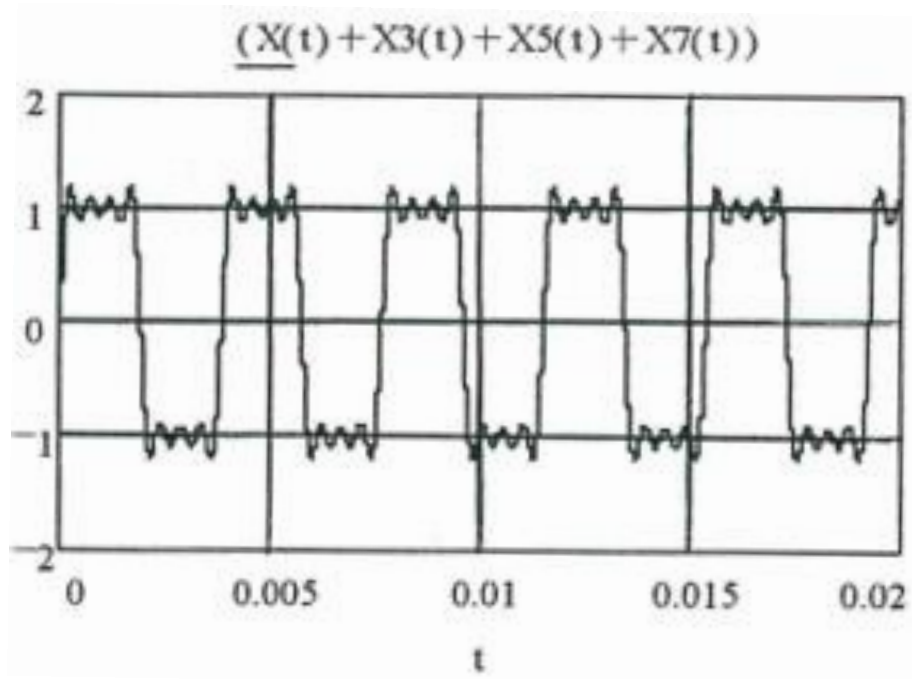


Figura 9- Sinal de vibração no domínio do tempo.

Fonte: FUPAI, 2002.

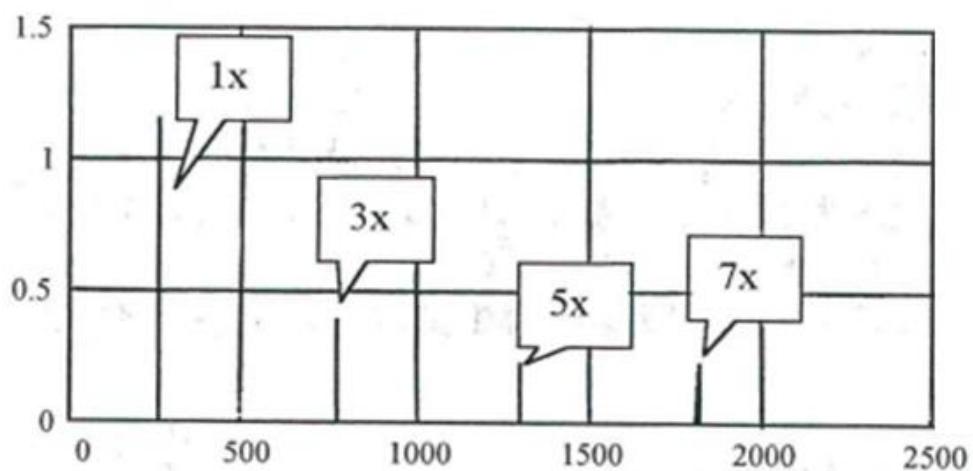


Figura 10- Espectro de frequências.

Fonte: FUPAI, 2002.

Nessas ilustrações é notório que a frequência fundamental (1X) corresponde a 260Hz e as frequências do terceiro (3X), quinto (5X) e sétimo (7X) harmônico do componente fundamental correspondem respectivamente a 780, 1300 e 1820 Hz. Nas

figuras seguintes observam-se os mesmos sinais correspondentes a essas frequências.

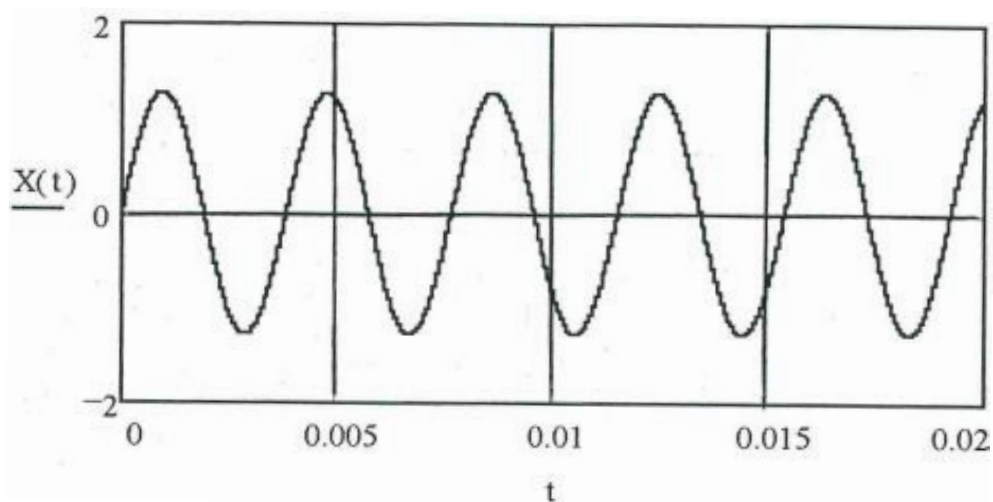


Figura 11- Sinal harmônico fundamental de 260 Hz no domínio do tempo.

Fonte: FUPAI, 2002.

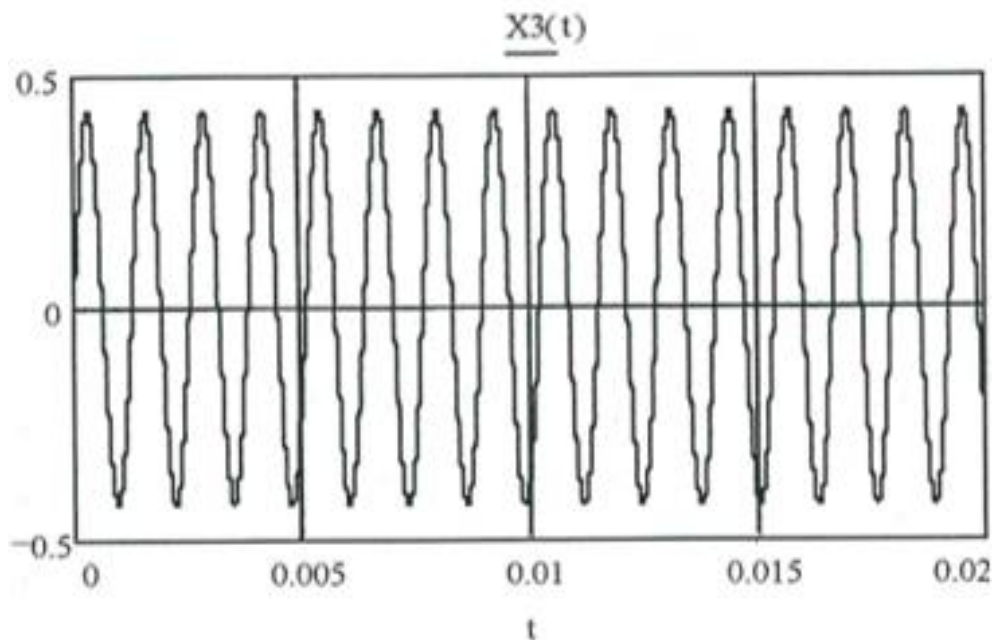


Figura 12- Sinal do terceiro harmônico no tempo.

Fonte: FUPAI, 2002.

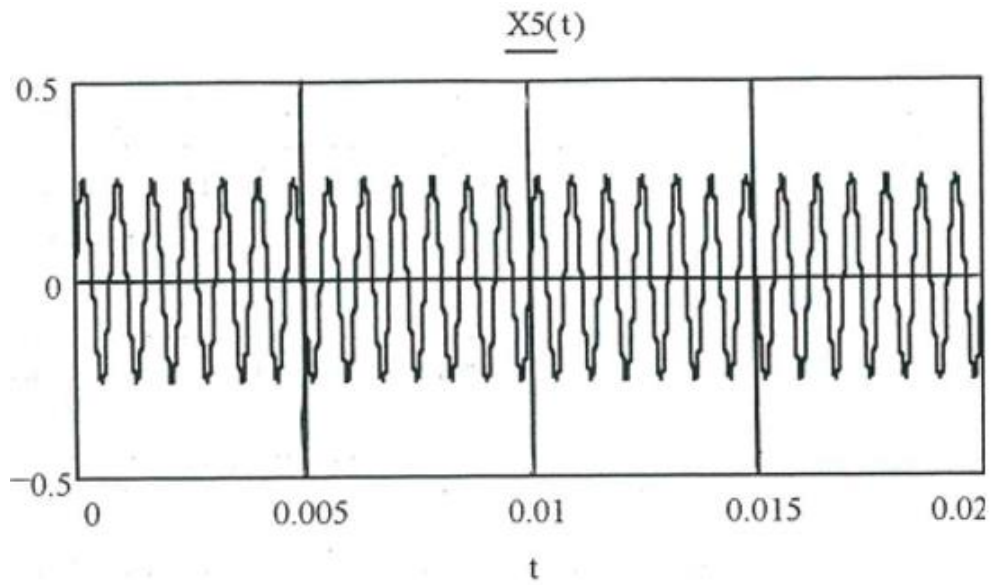


Figura 13- Sinal do quinto harmônico no tempo.

Fonte: FUPAI, 2002.

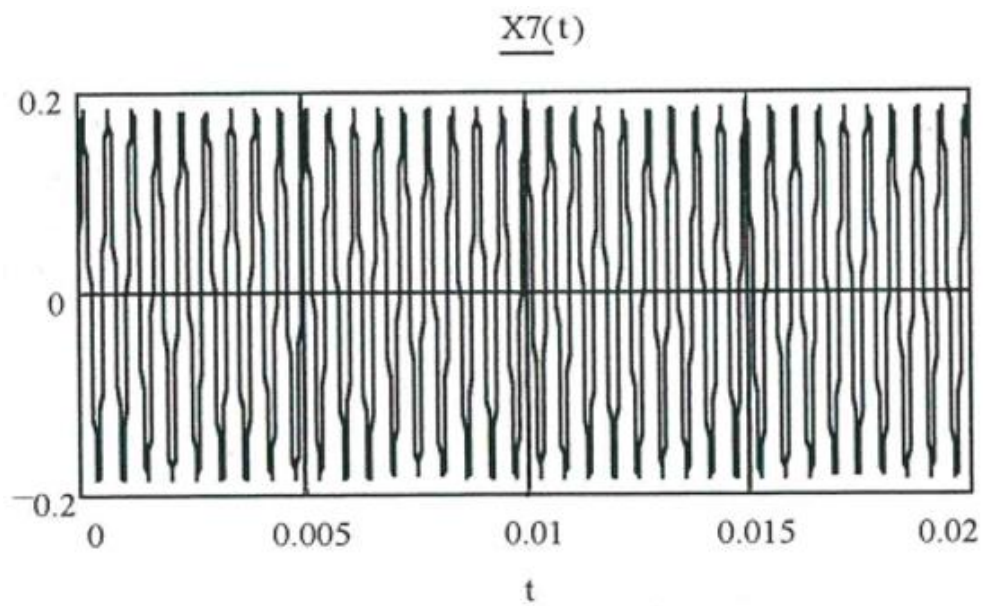


Figura 14- Sinal do sétimo harmônico no tempo

Fonte: FUPAI, 2002.

Representados de forma decomposta todos esses sinais do tempo, temos:

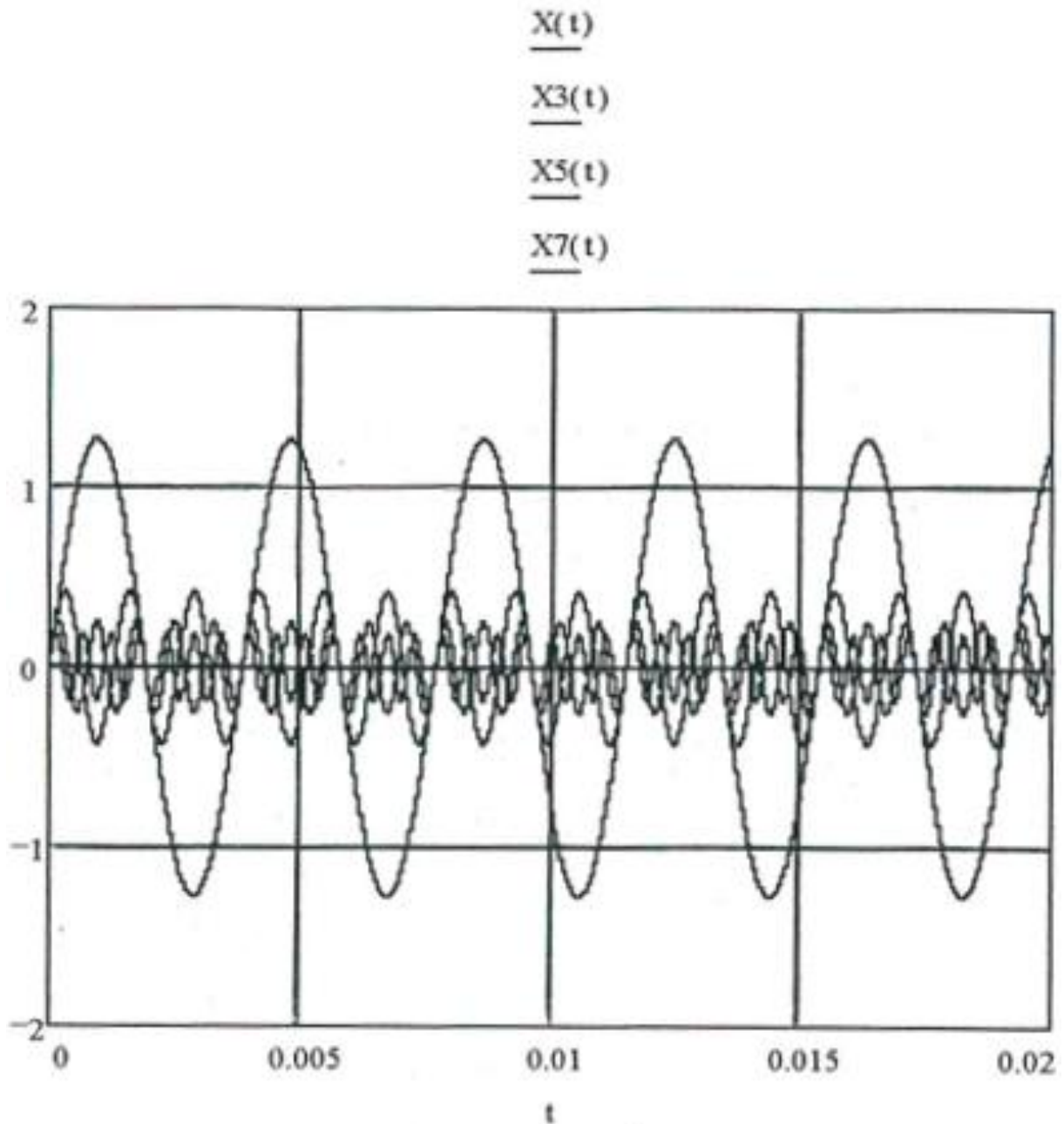


Figura 15- Decompostos todos os componentes do sinal.

Fonte: FUPAI, 2002.

Se somarmos todos esses sinais retornaremos ao sinal de vibração original, com os sinais no domínio do tempo recompostos, que também resultará num espectro de frequência com quatro componentes distintas em amplitude e defasagens.

Um espectro de frequências, de um sinal obtido numa máquina rotativa, é composto de várias frequências de eventos que ocorrem simultaneamente (FUPAI, 2002). Existindo uma relação entre cada frequência e eventos provenientes da dinâmica de cada componente, a avaliação e identificação dos picos revelados no espectro de frequências se torna possível.

Com a publicação do Algoritmo de Cooley-Tukey, em 1965, foram reduzidas consideravelmente as operações aritméticas e tornando muito mais rápidos os cálculos das transformadas de Fourier (FUPAI, 2002). A técnica de Transformada Rápida de Fourier (FFT) permite o cálculo com inúmeros valores e linhas a partir de várias amostras, sendo definida pela função:

$$X(m) = \frac{1}{N_a} \sum_{n=0}^{N_a-1} \left\{ x(n) e^{-j2\pi \left(\frac{n \cdot m}{N_a} \right)} \right\}$$

Os estudos realizados com o intuito de compreender as vibrações evoluíram com o advento dos computadores, possibilitando a obtenção de resultados eficazes e a execução de análise em sistemas complexos (RAO, 2008). Os analisadores são instrumentos portáteis que captam e processam todos esses sinais de vibração.

2.10 Janelas de ponderação

Conforme apontado por Rocha e Padovese (2004) a análise do sinal de vibração utilizando a Transformada de Fourier tem o conceito de que o sinal é constante, retratando sua repetição de forma cíclica. Essa concepção gera irregularidades e perda de informação no espectro de frequências. Para escapar desse problema são aplicadas as janelas de ponderação. Elas são chamadas de janelas: Retangular, Hanning, Hamming, Kaiser-Bessel, Triangular, Flattop e Exponencial.

2.10.1 Janela Retangular

Em todo seu intervalo de tempo com grandeza igual a 1 é configurada a Janela Retangular (NATIONAL INSTRUMENTS, 1998). Conforme a equação a seguir, ela é equivalente não aplicação da janela de ponderação, sendo útil para a análise de eventos transientes com tempo inferiores a sua duração.

$$W(n) = 1, n = 0, 1, 2, \dots, N - 1$$

Possuindo aparência igual a figura a seguir:

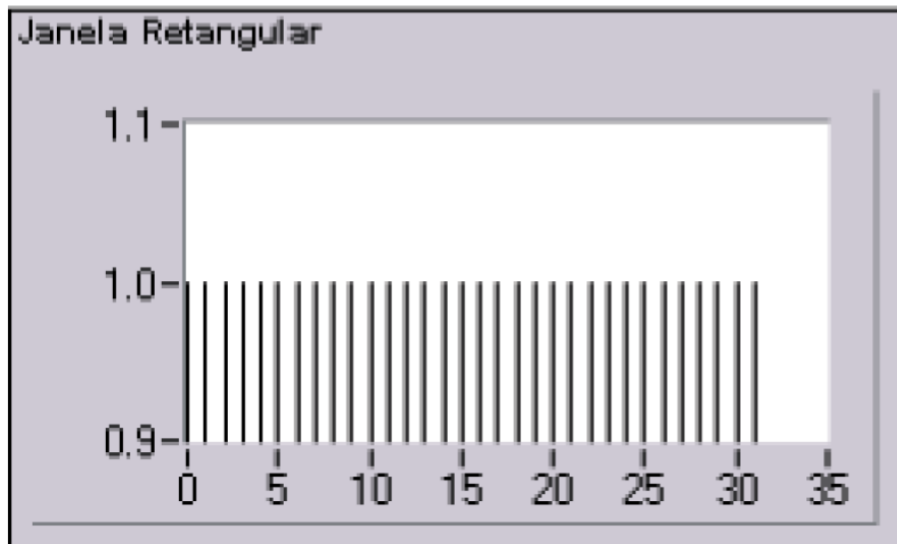


Figura 16- Janela Retangular para N=32.

Fonte: National Instruments, 1998.

2.10.2 Janela de Hanning

A Janela de Hanning é utilizável para avaliação de finalidades gerais e transientes com tempo de duração superiores ao seu período (National Instruments, 1998). Ela possui formato equivalente à de meio ciclo de aspecto senoidal, conforme figura a seguir.

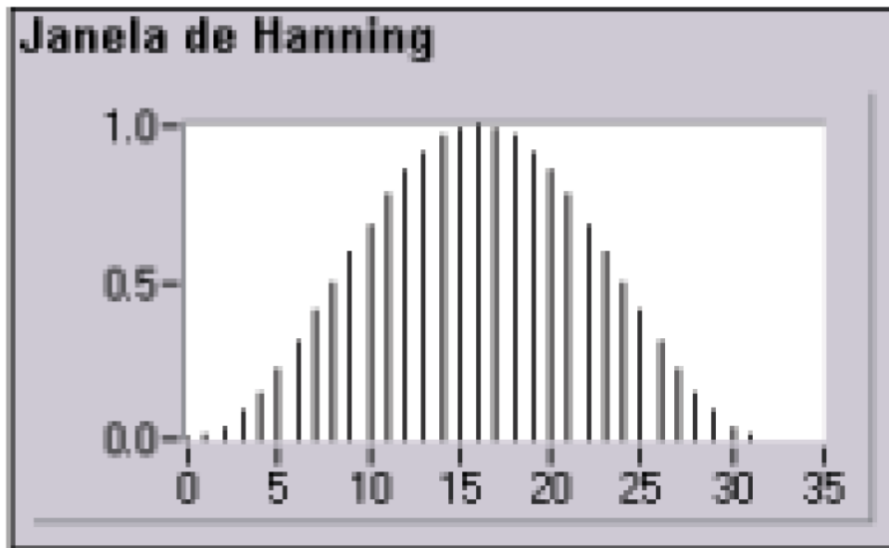


Figura 17- Janela de Hanning com N=32.

Fonte: National Instruments, 1998.

Essa janela detém a seguinte equação para descreve-la:

$$W(n) = 0.5 - 0.5\cos(2\pi n/N), n = 0, 1, 2, \dots, N - 1$$

2.10.3 Janela de Hamming

De forma bastante parecida com a Janela de Hanning, conforme figura a seguir, a janela de Hamming não se aproxima de zero segundo a National Instruments (1998).

Essa janela segue a equação:

$$W(n) = 0.54 - 0.46\cos(2\pi n/N), n = 0, 1, 2, \dots, N - 1$$

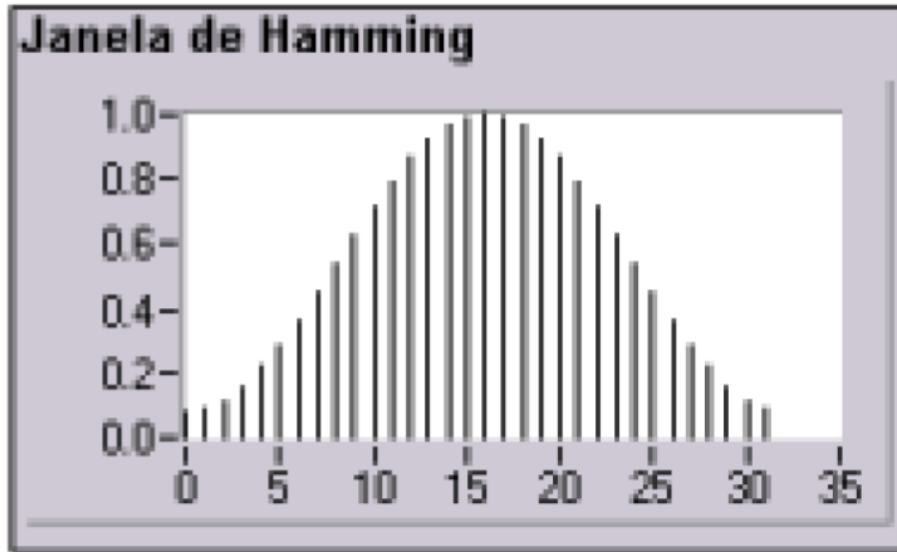


Figura 18- Janela de Hamming com N=32.

Fonte: National Instruments, 1998.

2.10.4 Janela Triangular

Conforme National Instruments (1998), a Janela Triangular apresenta forma de onda triangular e a seguinte definição:

$$W(n) = 1 - |2\pi n/N|, n = 0, 1, 2, \dots, N - 1$$

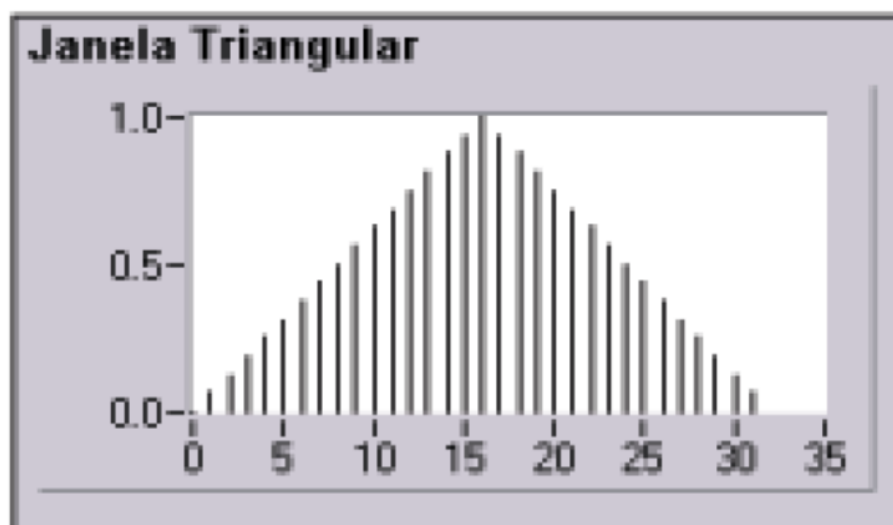


Figura 19- Janela Triangular para N=32.

Fonte: National Instruments, 1998.

2.10.5 Janela Kaiser-Bessel

Modificada pelo o ajuste de um parâmetro modificável " β ", a Janela Kaiser-Bessel tem forma flexível para controle da perda espectral com diferentes valores atribuídos para " β " (NATIONAL INSTRUMENTS, 1998). Sendo aplicável para análise de dois sinais amplitudes substancialmente desiguais, conforme figura a seguir.

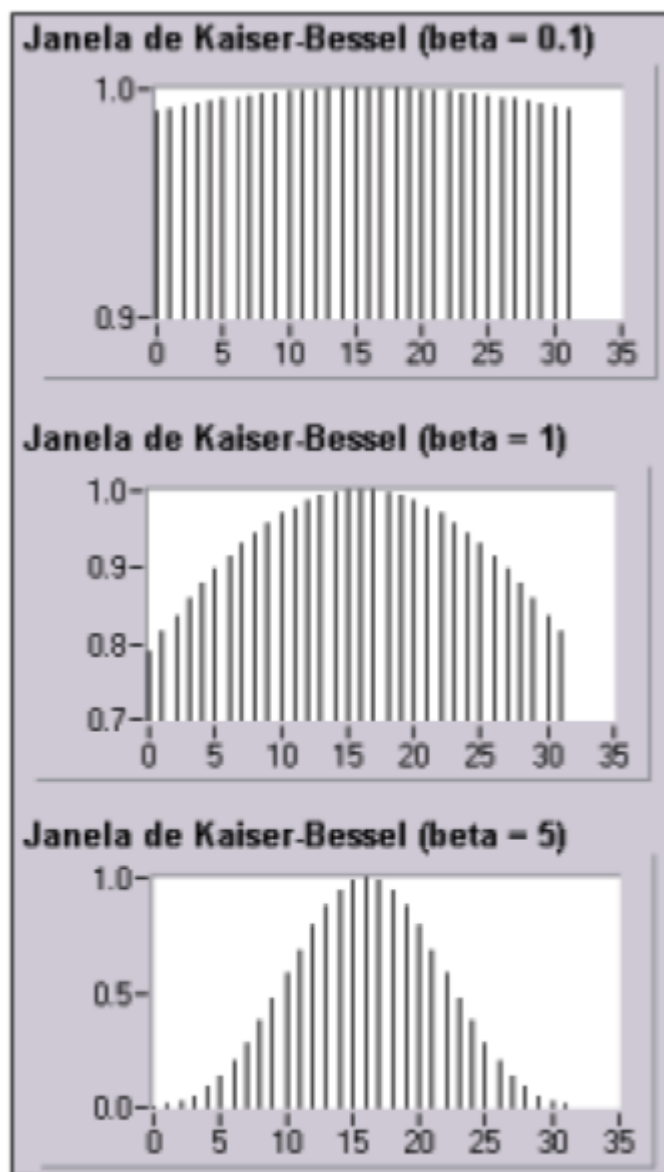


Figura 20- Janela Kaiser-Bessel com $N=32$ e com diferentes valores atribuídos para " β ".

Fonte: National Instruments, 1998.

2.10.6 Janela Flattop

Possuindo superior precisão em amplitude, a Janela Flattop se torna útil para medições de amplitude no custo da certeza de frequência (NATIONAL INSTRUMENTS, 1998). Essa janela possui a seguinte definição matemática:

$$W(n) = a_0 - a_1 (2\pi n/N) + a_2 \cos(4\pi n/N)$$

Onde:

$$n = 0, 1, 2, \dots, N - 1$$

$$a_0 = 0.2810638602$$

$$a_1 = 0.1980389663$$

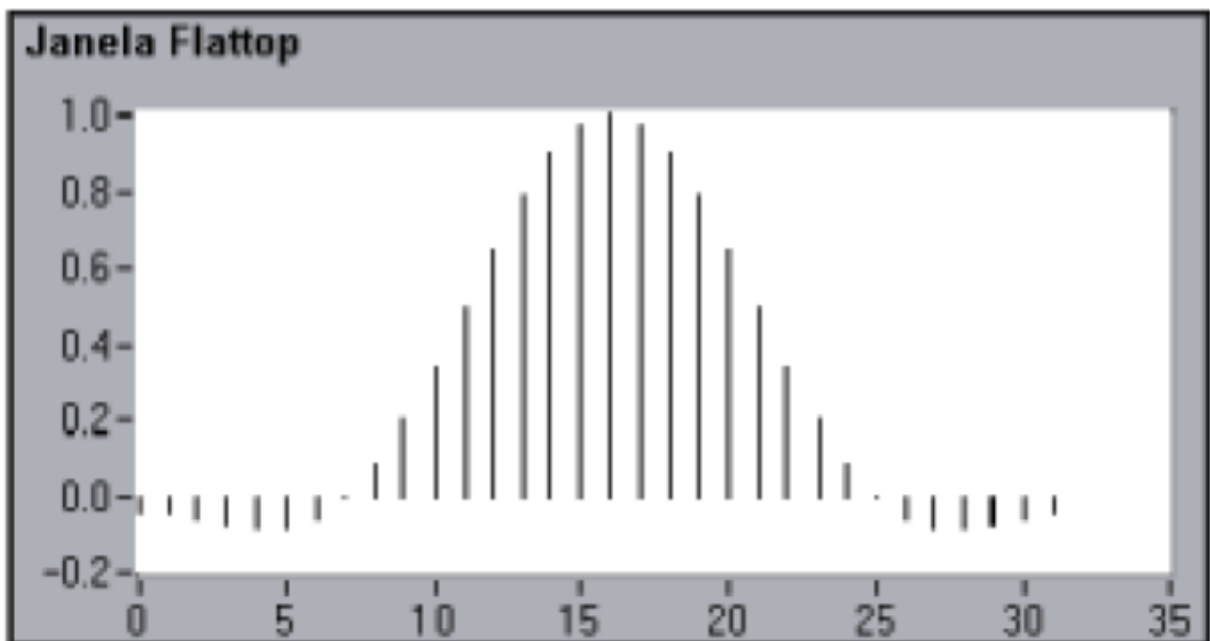


Figura 21- Janela Flattop com N=32.

Fonte: National Instruments, 1998.

2.10.7 Janela Exponencial

Sendo utilizável na avaliação de transientes com duração superior ao seu tamanho, a Janela Exponencial possui a característica de uma função exponencial com valor ajustável entre 1 e 0. Ela pode ser expressa matematicamente assim:

$$W(n) = \exp(n \ln(f)/(N - 1))$$

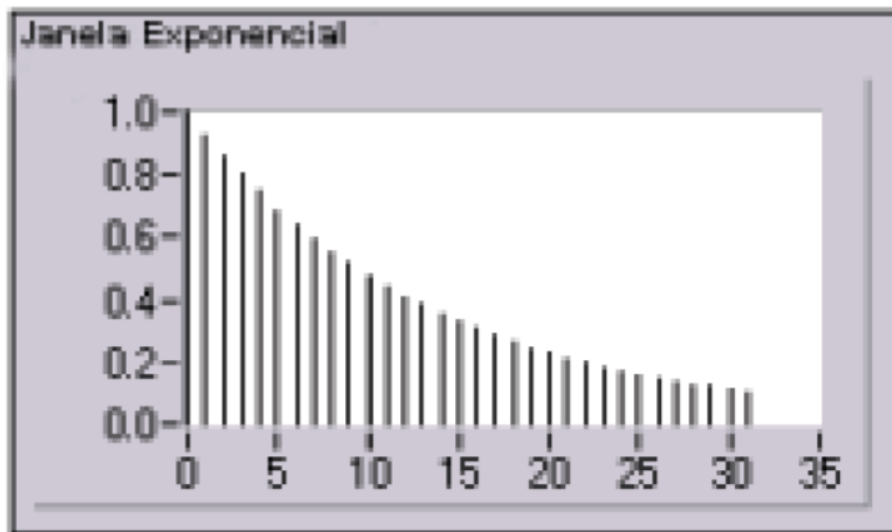


Figura 22- Janela Exponencial para N=32, com o valor final especificado como 0,1.

Fonte: National Instruments, 1998.

2.11 Medida

Produzindo uma forma de onda senoidal observamos o sistema proposto por Bueno (2010) para ilustrar a vibração de um corpo. Nessa forma de onda identificamos algumas informações, como: o pico de aceleração, onde verificamos uma maior taxa de velocidade; o pico de velocidade, onde é observada uma maior taxa de deslocamento e; o deslocamento que expressa à variação de posição da massa. Além dessas informações o sinal de vibração também revela outras informações descritas a seguir.

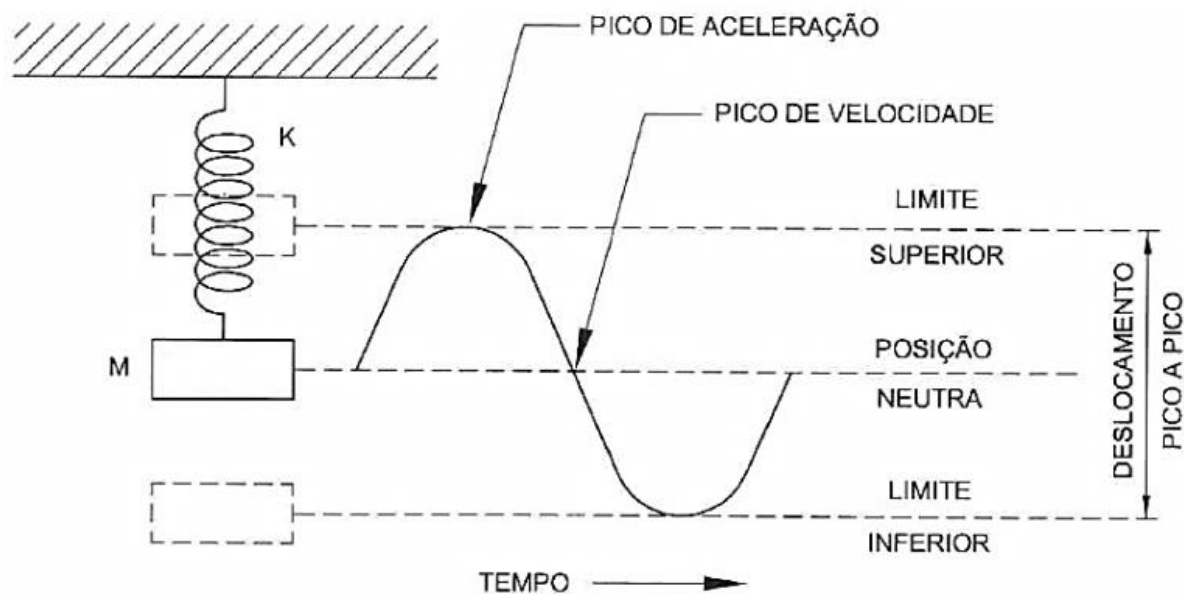


Figura 23- Sistema massa-mola em vibração.

Fonte: Bueno, 2010.

2.11.1 Amplitude

Conforme descrito por Bueno (2010) a amplitude, também caracterizada como magnitude, nos indica o quanto o equipamento está vibrando. No item 6.3.4 da NBR 10082:2011 a magnitude de vibração, quando apresenta um desvio significativo, é indicada como uma ferramenta que fundamenta uma apuração das causas de vibração.

As magnitudes podem ser expressas em pico a pico, zero a pico ou pico, valor médio e valor médio eficaz.

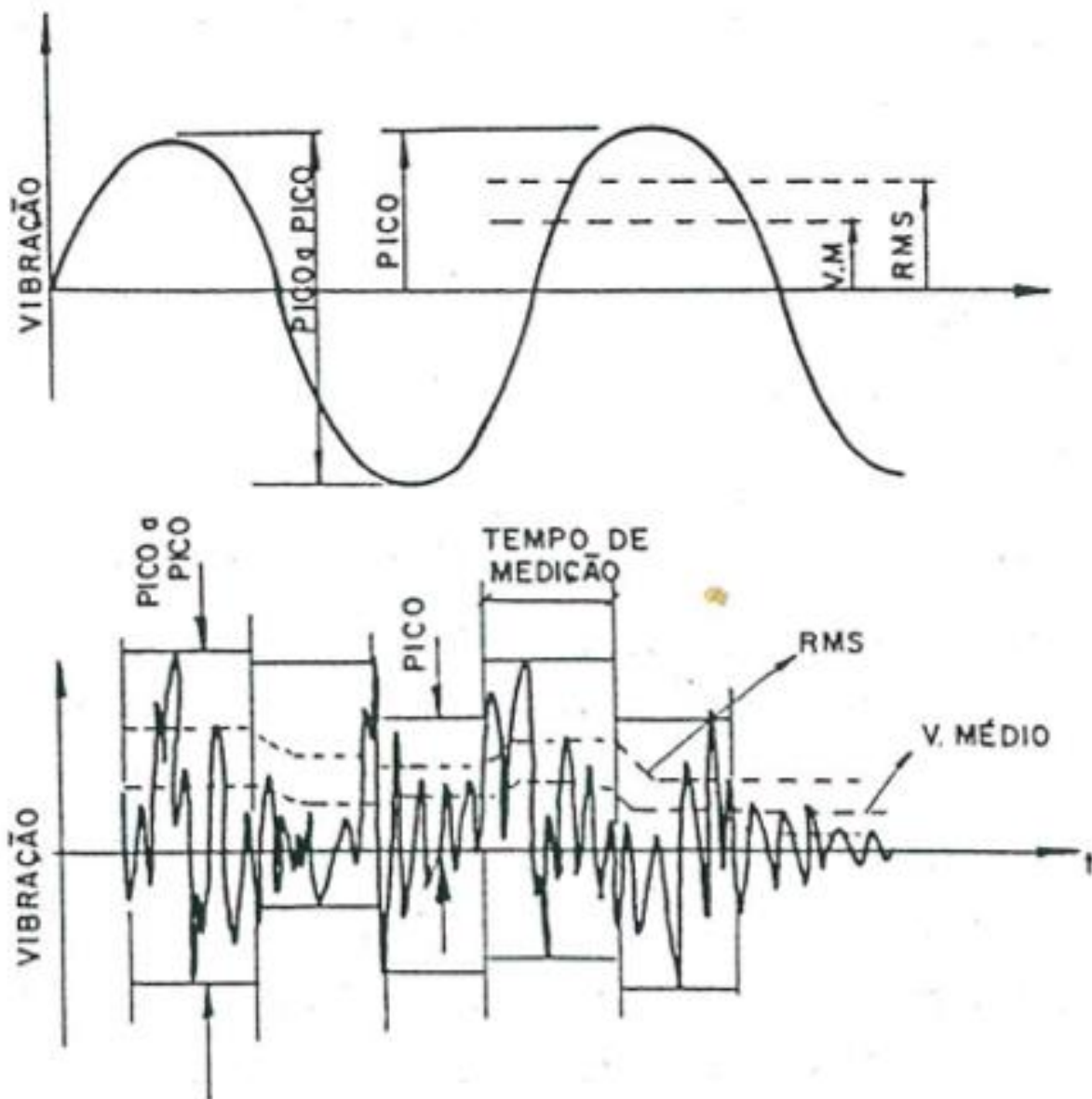


Figura 24- Equivalência das amplitudes expressas.

Fonte: FUPAI, 2002.

2.11.2 Deslocamento

O deslocamento, conforme descrito por Mobley (1999), é a variação real da posição de um objeto em relação a um ponto de referência. Sendo neste caso o deslocamento radial ou axial de um eixo em relação a um ponto de referência do mancal de sustentação do eixo dessa máquina, para o caso da técnica de análise de

vibração em equipamentos rotativos. O deslocamento é usualmente indicado nas unidades de Microns (0,001mm), Mils (milésimo de polegadas) e suas variações.

2.11.3 Velocidade

A velocidade é a descrição de quão rápido um componente em vibração está se movendo (MOBLEY, 1999). Conforme apontado anteriormente nesse trabalho, a velocidade é obtida quando ocorre a variação do espaço em relação ao tempo, sendo a primeira derivação do espaço conforme a equação abaixo:

$$\frac{dx}{dt} = \dot{x}(t) = Aw \cos wt$$

Observada usualmente na faixa de frequência entre 0 e 1000 Hz, a velocidade nos indica a energia de vibração do equipamento. Para ilustrar essa concepção Bueno (2010) propõe que: com a mão, dobremos um arame e aumentemos a velocidade de dobramento. A energia térmica percebida na ponta dos dedos, até o rompimento do arame, é análoga a energia que gera a quebra de equipamentos.

A velocidade é usualmente indicada nas unidades de mm/s, pol/s, in/sec em RMS.

A Raiz Média Quadrática (RMS) é utilizada quando os picos de velocidade de vibração variam instantaneamente (BUENO, 2010). Desse sinal é extraída eletronicamente a raiz da média do valor elevado ao quadrado, resultando em uma grandeza única que abrange a energia do sinal de vibração em velocidade, seguindo a equação:

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T f^2(t) dt}$$

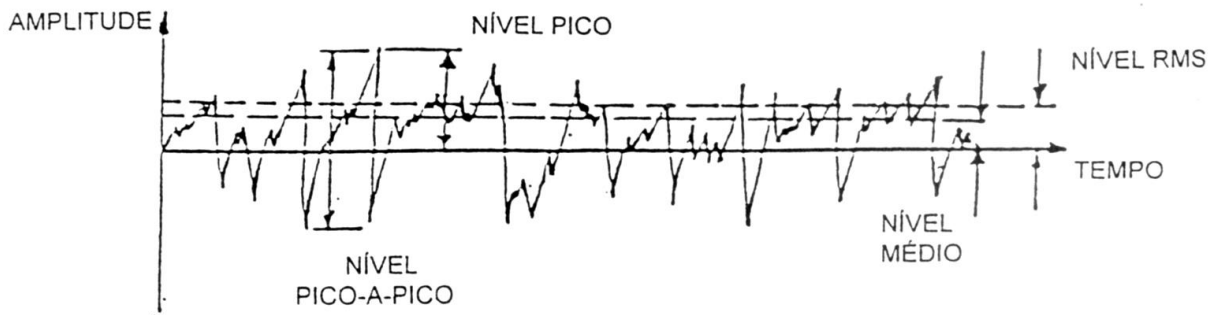


Figura 25- Sinal de uma onda aleatória no domínio do tempo.

Fonte: Bueno, 2010.

2.11.4 Aceleração

Bueno (2010, p. 15) aponta que a aceleração é a variação temporal da velocidade. Sendo neste caso a segunda derivação do espaço descrita a seguir:

$$\frac{dx^2}{dt} = \ddot{x}(t) = Aw^2 \sin wt$$

A aceleração habitualmente observada em frequências de vibração acima de 1000Hz, é expressa em termos de constante gravitacional “g” ou mm/s². Sendo 1g igual a aproximadamente 9,81 m/s².

2.12 Envelope de aceleração

O Envelope de aceleração é uma técnica de processamento do sinal de vibração, também conhecida como demodulação de sinais. Ela possibilita a observação dos pequenos eventos ocorridos em baixas frequências e que são mascarados pelos por outros eventos de grande amplitude (FUPAI, 2005). Assim a técnica de demodulação se apresenta como uma ferramenta para a análise de rolamentos.

2.13 Escolha dos parâmetros

Com posse dos parâmetros de deslocamento, velocidade e aceleração, devemos avaliar quais as frequências queremos observar, além de sua amplitude. Conforme apontado por Bueno (2010), a maioria dos sensores possibilita a aquisição dos sinais de vibração em ambos os parâmetros.

O parâmetro de velocidade é o mais aconselhável por permitir uma observância de um espectro mais linear, uma maior faixa de frequências e a indicação da condição da máquina, com o valor eficaz da velocidade de vibração (BUENO, 2010). Sendo um parâmetro mais linear possibilita a observância de grande parte dos defeitos diagnosticados por vibração.

A aceleração é um parâmetro, que por sua vez, expõe as amplitudes em alta frequência (BUENO, 2010). Segundo FUPAI (2002), a aceleração fornece grande confiabilidade na medição de vibração em componentes de alta frequência.

Não menos importante, o parâmetro de deslocamento aponta o percurso percorrido pelo componente monitorado na máquina (FUPAI, 2002).

2.14 Detecção de defeitos

Quando em operação os equipamentos sofrem esforços que fora dos parâmetros adequados geram consequências maléficas (FUPAI, 2002).

O diagnóstico do defeito presente na máquina, com um nível de vibração anormal, requer o conhecimento das frequências esperadas quando o ativo estiver operando numa determinada carga e rotação (FUPAI, 2002). Para isso, se faz necessário a identificação prévia dos componentes que compõem o equipamento que era analisado e monitorado. Essas informações poderão ser levantadas com o fabricante ou também no local onde está instalado o ativo.

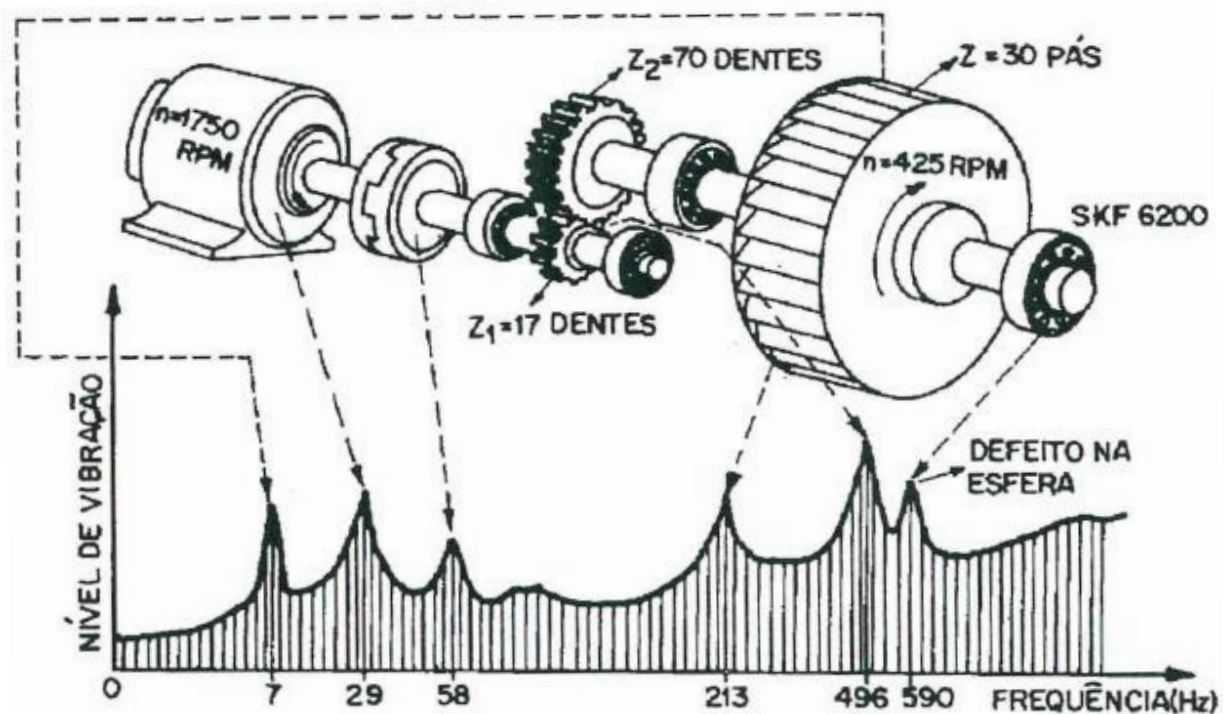


Figura 26- Identificação de frequências dos componentes da máquina.

Fonte: FUPAI, 2002.

Assim como apontado pela FUPAI (2002), podemos calcular as várias frequências excitadas por defeitos em máquinas rotativas, como: desbalanceamento; desalinhamento; excentricidade; defeitos em rolamentos; folgas; defeitos em engrenagens; defeitos elétricos; roçamento (atrito de rotor); ressonâncias; vibração aero hidrodinâmicas; etc....

2.14.1 Desbalanceamento

O desbalanceamento de massa de um rotor apresenta espectro, no sentido radial, com uma frequência fundamental com amplitude predominante, que aumentará seu nível ao quadrado em função do aumento da frequência de rotação do eixo (CHARLOTTE, 1996).

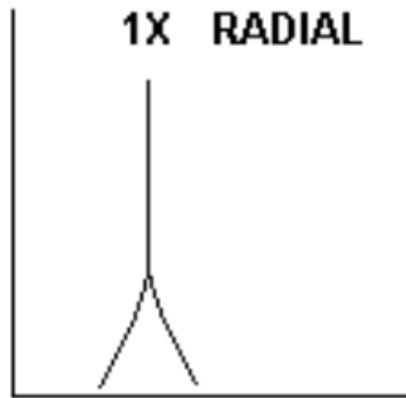


Figura 27- Espectro típico de desbalanceamento.

Fonte: SKF, 2004.

O desbalanceamento também pode assumir a configuração de desbalanceamento acoplado e de rotor em balanço. No primeiro a fase do sinal assume 180° de defasagem na radial em relação ao mancal oposto, e no segundo as leituras de fase são instáveis e o nível de vibração também assume maior amplitude na direção axial (CHARLOTTE, 1996).

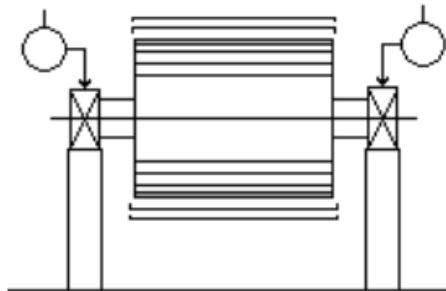


Figura 28- Relação de fases de um desbalanceamento comum de massa.

Fonte: SKF, 2004.

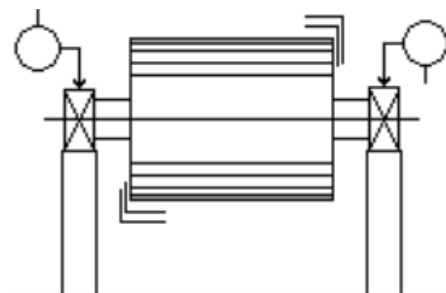


Figura 29- Relação de fases de um desbalanceamento acoplado.

Fonte: SKF, 2004.

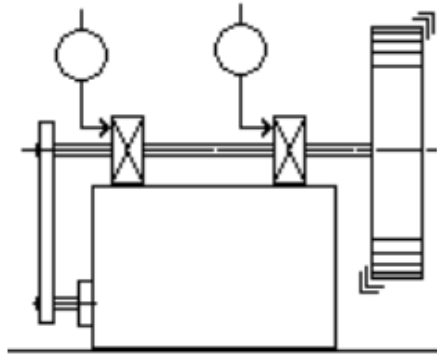


Figura 30- Relação de fases de um desbalanceamento em balanço.

Fonte: SKF, 2004.

2.14.2 Rotor Excêntrico

Apresenta espectro similar ao desbalanceamento, mas com sinais de fase divergentes de 0° a 180° nas direções vertical e horizontal e ocorrência de alteração do sentido de vibração, quando realizado balanceamento (CHARLOTTE, 1996).

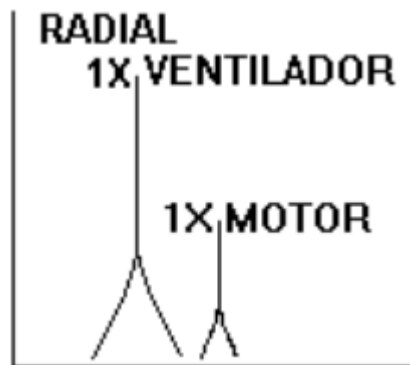


Figura 31- Espectro típico de Excentricidade.

Fonte: SKF, 2004.

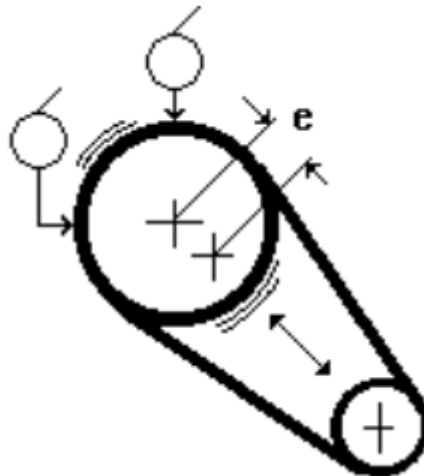


Figura 32- Relação de fases de excentricidade de uma polia.

Fonte: SKF, 2004.

2.14.3 Eixo Empenado

Elevado nível de vibração nos sentidos radiais e axiais, com defasagem de fase de vibração de 180° na axial e frequência fundamental destacada, tendo possível ocorrência também na segunda harmônica da fundamental destacada quando o empeno estiver próximo ao acoplamento (CHARLOTTE, 1996).

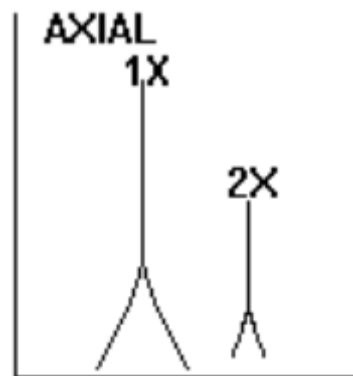


Figura 33- Espectro típico de eixo empenado.

Fonte: SKF, 2004.

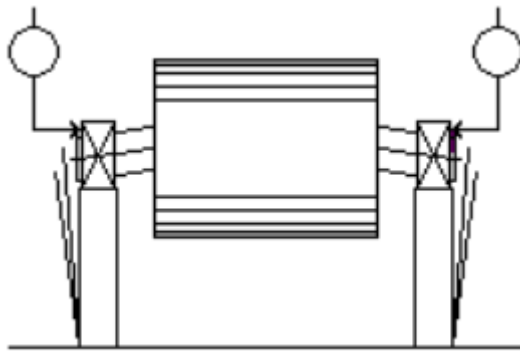


Figura 34- Relação de fases de eixo empenado.

Fonte: SKF, 2004.

2.14.4 Desalinhamento

O desalinhamento apresentará níveis de vibração elevados com destaque nos espectros para a frequência fundamental, segunda e terceira harmônicas (CHARLOTTE, 1996). O desalinhamento angular apresentará maior nível de vibração na direção axial, enquanto o paralelo maior nível na radial, sendo possível a ocorrência dos dois tipos simultaneamente, com espectro destacado para a segunda harmônica e também ocorrência de quarta harmônica da fundamental (SKF, 2004).



Figura 35- Espectro típico de desalinhamento axial.

Fonte: SKF, 2004.

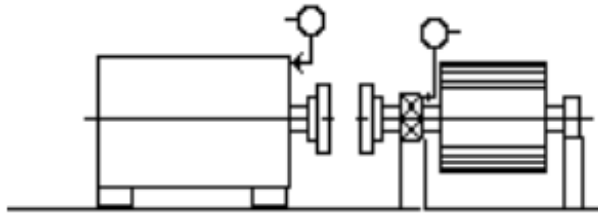


Figura 36- Relação de fases de desalinhamento axial.

Fonte: SKF, 2004.

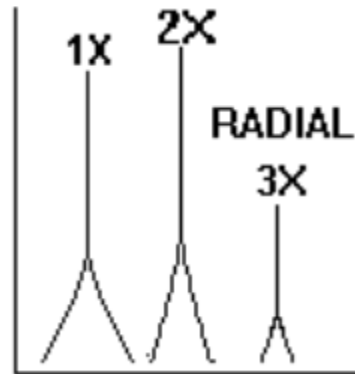


Figura 37- Espectro típico de desalinhamento radial.

Fonte: SKF, 2004.

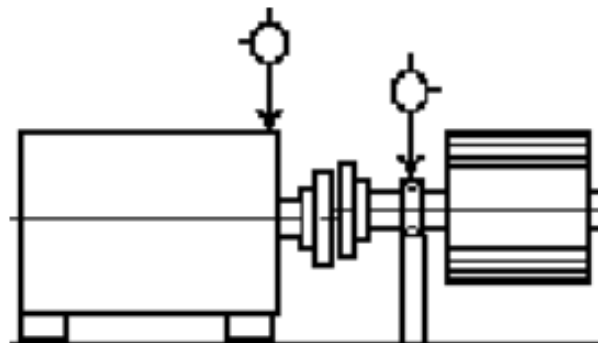


Figura 38- Relação de fases de desalinhamento radial.

Fonte: SKF, 2004.

2.14.5 Folga Mecânica

A folga mecânica se apresenta em tipos A, B e C. O tipo A, devido a falta de rigidez estrutural, apresenta espectro com elevado nível de vibração no componente da frequência fundamental (SKF, 2004). O tipo B apresenta, além do componente da fundamental, harmônicos de uma, duas, três, quatro e quinta ordem, devido ao

afrouxamento de componentes do equipamento (CHARLOTTE, 1996). O tipo C, relacionada a folga de ajuste, se diferencia das folgas descritas anteriormente pelo aparecimento de inter-harmônicos que compreendem 1/2 e 1/3 da frequência fundamental, além das harmônicas similares ao tipo B (SKF, 2004).

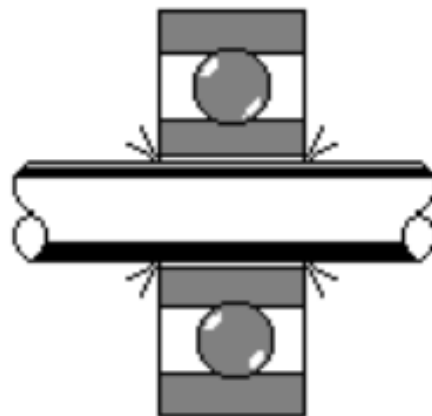
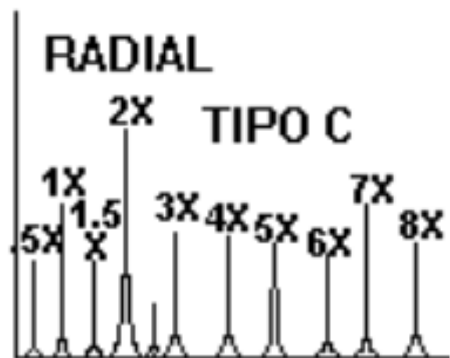
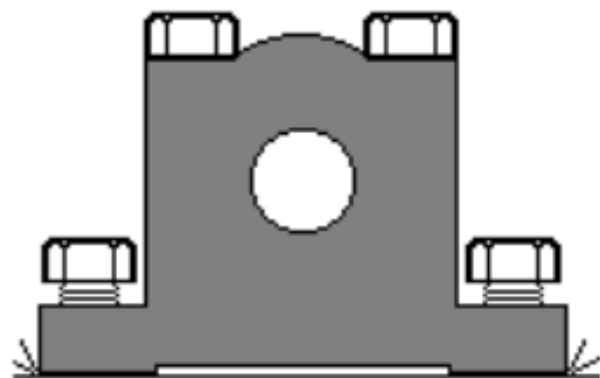
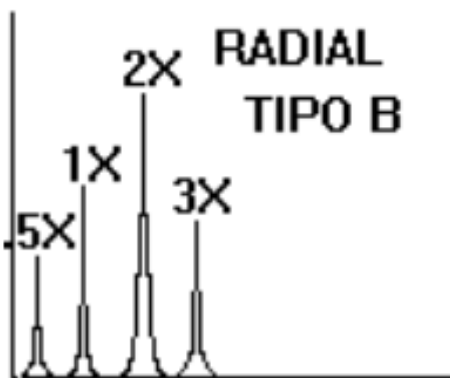
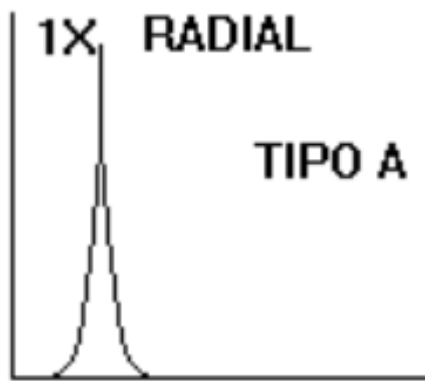


Figura 39- Relação de fases e espectro típico das folgas.

Fonte: SKF, 2004.

2.14.6 Roçamento

O roçamento pode apresentar características similares a folga, mas com componentes sub-harmônicos em frações da frequência da rotação ($\frac{1}{2}$, $\frac{1}{3}$, $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{5}$, ... $\frac{1}{n}$), podendo excitar frequências altas, gerando um ruído no espectro e forma de onda truncada (CHARLOTTE, 1996).

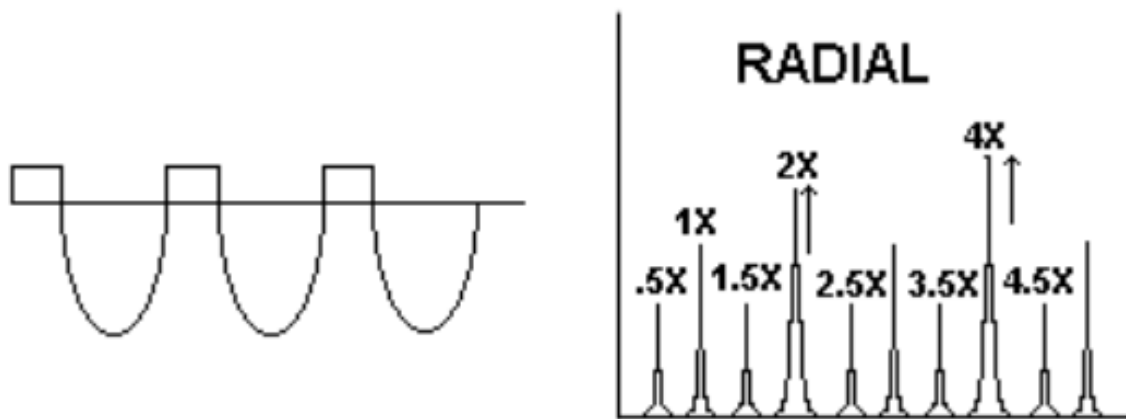


Figura 40- Forma de onda e espectro de roçamento.

Fonte: SKF, 2004.

2.14.7 Defeitos em Rolamentos

Os defeitos em rolamentos são classificados em quatro estágios (BUENO, 2010). No primeiro estágio os defeitos são revelados apenas com o auxílio de técnicas ultrassônicas, como o Spike Energy e o Shock Pulse numa ordem de frequência entre 20.000 e 80.000 Hz (SKF, 2004). O segundo estágio apresenta uma pequena excitação das frequências naturais dos componentes do rolamento (CHARLOTTE, 1996). As frequências de defeitos aparecem com harmônicos no terceiro estágio e indica a necessidade de troca do componente (SKF, 2004). No quarto estágio aparecem frequências aleatórias e sutil melhora da vibração antes da falha ocorrer (Bueno, 2010).

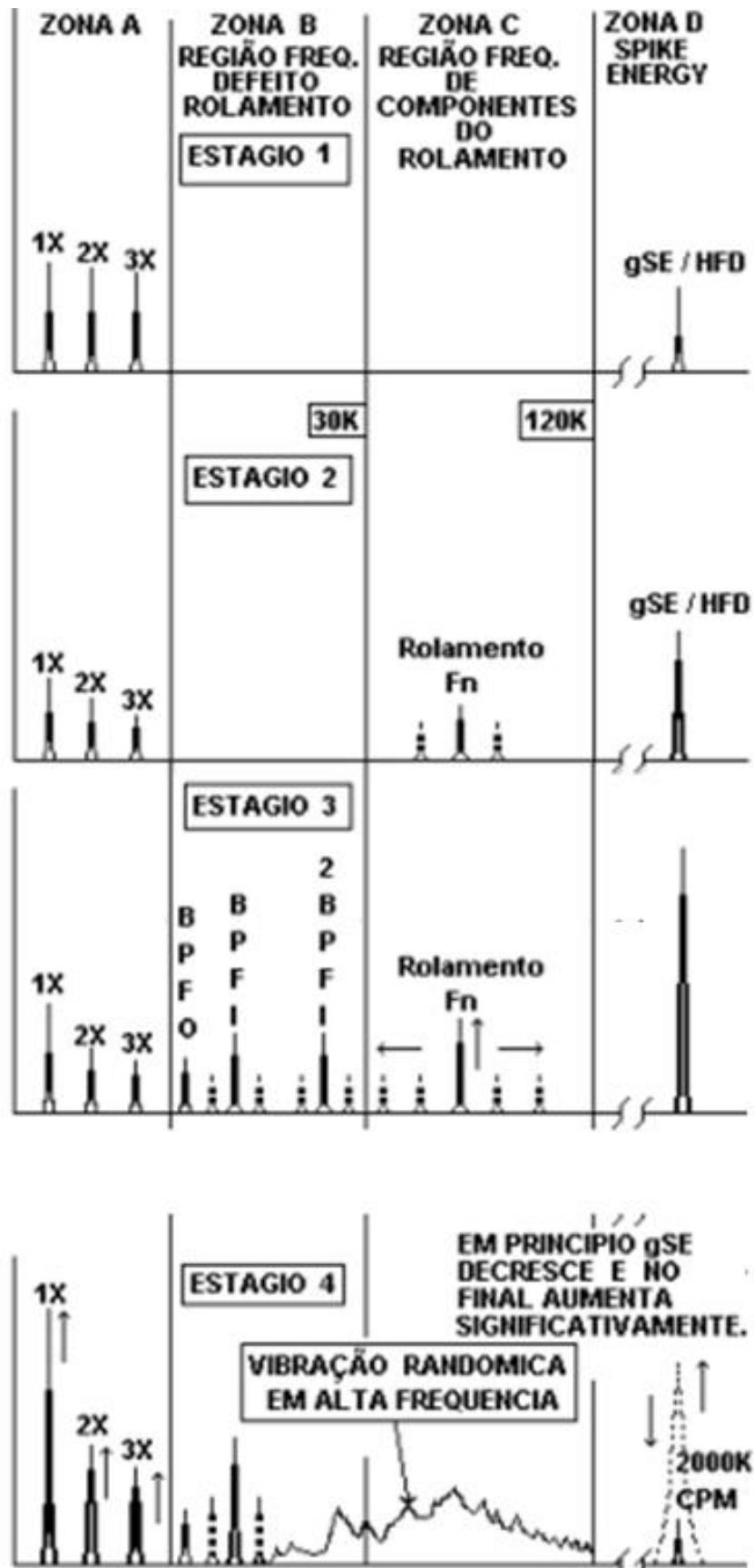


Figura 41- Espectros referentes às fases de degradação do rolamento.

Fonte: SKF, 2004.

Não sendo harmônicas da rotação do equipamento, as frequências de defeito em rolamentos são determinadas pelas seguintes equações:

$$FTF = \frac{f}{2} \left(1 - \frac{d}{D} \cos \alpha \right)$$

$$BSF = f \frac{D}{d} \left(1 - \frac{d^2}{D^2} \cos^2 \alpha \right)$$

$$BPFO = Nbs \frac{f}{2} \left(1 - \frac{d}{D} \cos \alpha \right)$$

$$BPFI = Nbs \frac{f}{2} \left(1 + \frac{d}{D} \cos \alpha \right)$$

2.14.8 Forças aerodinâmicas de hidráulicas

A frequência de passagem de pás é inerente às bombas de ventiladores, mas a ocorrência de um nível elevado dessa frequência pode indicar desgaste ou obstruções no fluxo do fluido bombeado (CHARLOTTE, 1996).

A- PASSAGEM PALHETA & PASSAGEM DIFUSOR

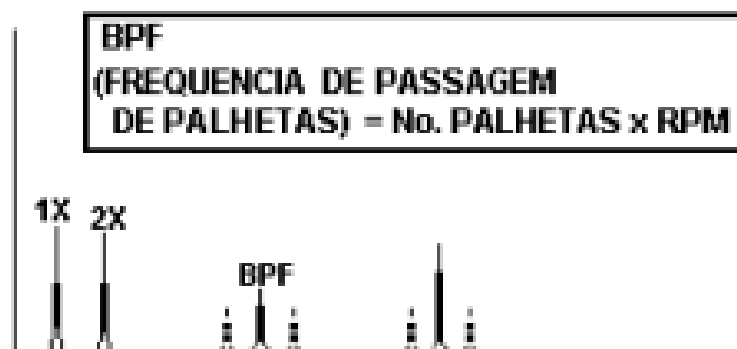


Figura 42- Espectro típico de forças aerodinâmicas e hidráulicas.

Fonte: SKF, 2004.

2.14.9 Fluxo com turbulência

As turbulências no fluxo do fluido causa vibração aleatória de baixa frequência, na faixa entre 50 e 2000 RPM (CHARLOTTE, 1996).

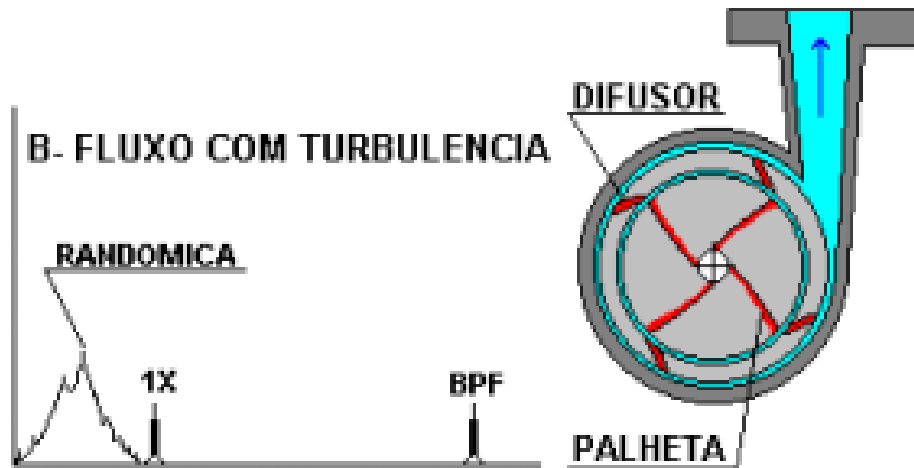


Figura 43- Espectro típico de turbulência.

Fonte: SKF, 2004.

2.14.10 Cavitação

Sendo extremamente maléfica para a bomba a cavitação gera elevação do nível de vibração e banda larga aleatória no espectro de frequências (BUENO, 2010).



Figura 44- Espectro típico de cavitação.

Fonte: SKF, 2004.

2.15 Níveis de alarme

De acordo com a NBR 10082:2011, vibrações anormais devem ser sinalizadas quando ultrapassar seus limites para evitar a operação dos equipamentos em condições impróprias. Por isso são definidos limites denominados de alarme e desarme. Na condição de alarme o equipamento apresenta nível de vibração que permite a programação da intervenção necessária. Já para o nível de desarme, estabelecido como nível de segurança, é aconselhável a parada do equipamento de forma imediata para que seja garantida a integridade do ativo e pessoas que estiverem próximas. Seguem identificadas a seguir algumas tabelas de classificação dos níveis de vibração quando não possuir recomendação específica do fabricante.

2.15.1 Alarmes de nível global em velocidade

Tabela 1- Níveis de Alarme de Vibração segundo ISO 10816-7:2009.

Limites de vibração para medições em partes não rotativas de bombas com rotores, com potência superior a 1 kW, aplicável para rotores com número de pás igual ou superior a 3.					
Zona de Alarme	Descrição	Limite de Velocidade de Vibração – r.m.s (mm/s)			
		Categoria I		Categoria II	
		≤ 200 kW	>200 kW	≤ 200 kW	>200 kW
A	Máquinas recém comissionadas	2,5	3,5	3,2	4,2
B	Operação irrestrita em longo prazo, na faixa de operação.	4,0	5,0	5,1	6,1
C	Operação Limitada (Planejamento de intervenção)	6,6	7,6	8,5	9,5
D	Risco de Falha (Ação imediata)	>6,6	>7,6	>8,5	>9,5
Categoria I – Bombas que requerem um alto nível de confiabilidade, disponibilidade ou por razões de segurança (bombas para fluídos tóxicos; aplicações críticas, óleo e gás, planta química, aplicação na indústria nuclear). Categoria II – Bombas para aplicações gerais ou aplicação menos crítica.					

Fonte: ISO 10816-7:2009.

Tabela 2- Níveis de Alarme de Vibração segundo NBR 10082:2011.

Máquinas rotativas que operam entre 600 RPM e 15000 RPM, com potência acima de 15 kW e frequência de vibração entre 10 Hz e 1000 Hz, através da medição de vibrações mecânicas na carcaça do mancal ou do pedestal que suporta o mancal.			
Classe de suporte	Limite entre zonas	GRUPO I	GRUPO II
		Valor eficaz mm/s-RMS	Valor eficaz mm/s-RMS
Rígido	A/B	1,1	1,8
	B/C	1,8	2,8
	C/D	2,8	4,5
Flexível	A/B	1,8	2,8
	B/C	2,8	4,5
	C/D	4,5	7,1
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Grupo I: máquinas com potência acima de 300 kW. Recomenda-se que as máquinas deste grupo sejam avaliadas também de acordo com normalização específica para avaliação da severidade de vibração pela medição de vibração de eixos com uso de sensores sem contato. ▪ Grupo II: máquinas com potência entre 15 kW até 300 kW. 			
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Zona A: valores de vibração recomendados para máquinas novas ou recentemente comissionadas; ▪ Zona B: máquinas com níveis de vibração classificados dentro desta zona são consideradas aceitáveis para operação contínua para longo período de operação, sem restrição. ▪ Zona C: máquinas com níveis de vibração classificadas dentro desta zona são normalmente consideradas insatisfatórias para a operação contínua por um longo período. Geralmente, podem continuar operando por um período limitado de tempo e deve-se programar sua correção. 			

Fonte: NBR 10082:2011.

Tabela 3- Níveis de Alarme de Vibração segundo ISO 10816-3:2009.

Classificação de Severidade para máquinas grande com potência nominal superior a 300 kW e inferior a 50 MW, máquinas elétricas com altura de eixo $H \geq 315$ mm. Rotação entre 120 RPM e 15.000 RPM			
Tipo de Suporte	Limites de Alarme	Deslocamento - RMS (μm)	Velocidade - RMS (mm/s)
Rígido	A/B	29	2,3
	B/C	57	4,5
	C/D	90	7,1
Flexível	A/B	45	3,5
	B/C	90	7,1
	C/D	140	11,0
Classificação de Severidade para máquinas grande com potência nominal superior a 15kW até ou igual a 300 kW, máquinas elétricas com altura de eixo $160 \text{ mm} \geq H < 315$ mm. Rotação entre 120 RPM e 15.000 RPM			
Tipo de Suporte	Limites de Alarme	Deslocamento - RMS (μm)	Velocidade - RMS (mm/s)
Rígido	A/B	22	1,4
	B/C	45	2,8
	C/D	71	4,5
Flexível	A/B	37	2,3
	B/C	71	4,5
	C/D	113	7,1
<ul style="list-style-type: none"> ▪ A – Excelente (máquinas recém comissionadas/ recém-instaladas); ▪ B – Bom ou Aceitável (equipamento em condição de funcionamento por um longo período de tempo sem restrições); ▪ C – Atenção (o equipamento não deverá operar por um longo período de tempo – planejar ação); ▪ D – Risco de Falha (tomar ação imediatamente). 			

Fonte: ISO 10816-3:2009.

Tabela 4- Classificação dos Ventiladores de acordo com sua aplicação.

Aplicação	Exemplos	Limites de Potência do Acionamento (kW)	Categoria de Aplicação de Ventiladores
Residencial	Ventiladores de Teto, Exaustor de telhado, Ar-Condicionado de Janela.	≤0,15	BV-1
		>0,15	BV-2
HVAC e Agrícola	Sistema de ventilação e ar condicionado; Sistemas Comerciais.	≤3,7	BV-2
		>3,7	BV-3
Processos Industriais, Geração de Energia, etc.	Baghouse, lavador, mina, transporte, caldeiras, ar de combustão, controle de poluição, túneis de vento.	≤300	BV-3
		>300	Vide ISO10816-Parte 3
Transporte e Naval	Locomotivas, caminhões, automóveis.	≤15	BV-3
		>15	BV-4
Trânsito/ Túneis	Ventilação de emergências em metrô, ventiladores de túneis, Ventilação de Garagens.	≤75	BV-3
		>75	BV-4
		Nenhum	BV-4
Processo Petroquímico	Gases tóxicos, Ventiladores de processo.	≤37	BV-3
		>37	BV-4
Manufatura de processadores e computadores	Salas Limpas	Nenhum	BV-5

Fonte: ISO 14694:2003

Tabela 5- Limites de vibração absoluta, em testes realizados em campo.

Condição	Categoria de Aplicação de Ventiladores	Base Rígida (mm/s)		Base Flexível (mm/s)	
		Pico	RMS	Pico	RMS
Startup	BV-1	14,0	10	15,2	11,2
	BV-2	7,6	5,6	12,7	9,0
	BV-3	6,4	4,5	8,8	6,3
	BV-4	4,1	2,8	6,4	4,5
	BV-5	2,5	1,8	4,1	2,8
Alarme	BV-1	15,2	10,6	19,1	14,0
	BV-2	12,7	9,0	19,1	14,0
	BV-3	10,2	7,1	16,5	11,8
	BV-4	6,4	4,5	10,2	7,1
	BV-5	5,7	4,0	7,6	5,6
Shutdown (Desarme)	BV-1	Nota 1	Nota 1	Nota 1	Nota 1
	BV-2	Nota 1	Nota 1	Nota 1	Nota 1
	BV-3	12,7	9,0	17,8	12,5
	BV-4	10,2	7,1	15,2	11,2
	BV-5	7,6	5,6	10,2	7,1
Nota 1: Os níveis para desarme para ventiladores em aplicações de grau BV-1 e BV-2, devem ser estabelecidas com base em seu histórico de dados.					

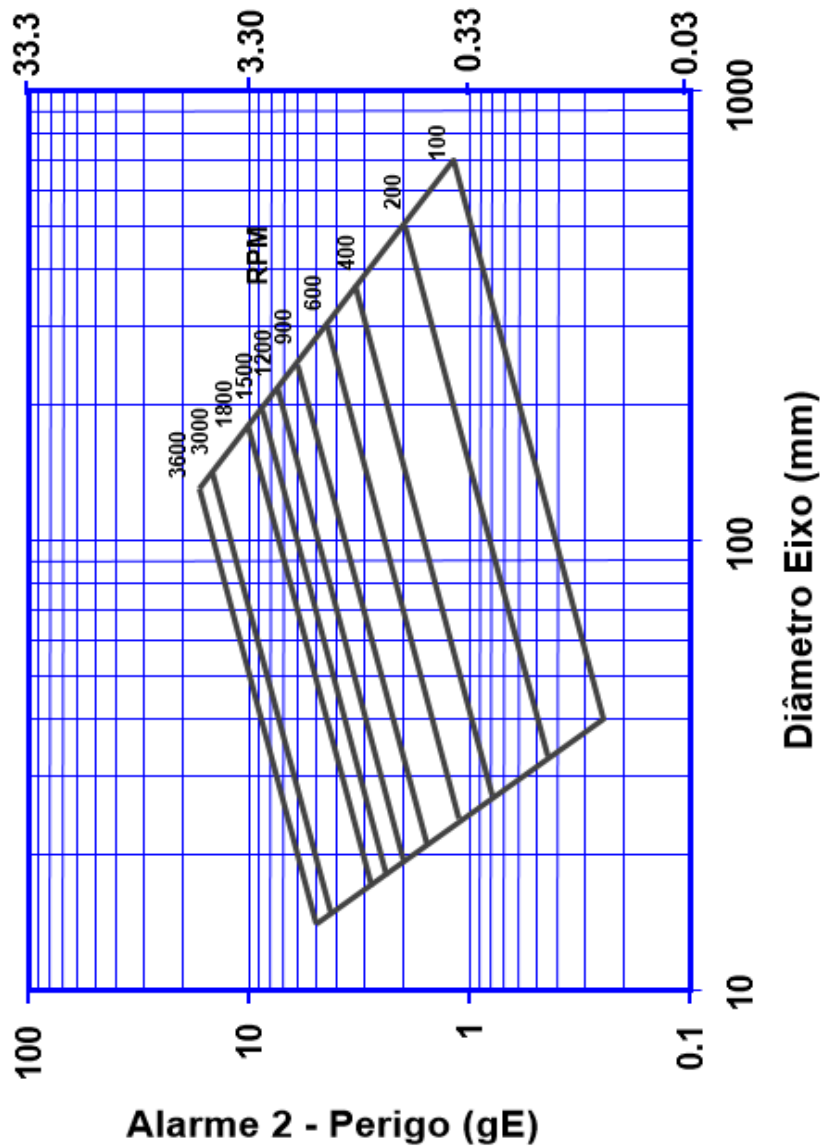
Fonte: ISO 14694:2003

2.15.2 Alarmes de nível global em aceleração

Para o caso da aceleração, que tem o objetivo de avaliar a condição dos rolamentos em alta frequência, devemos aplicar a técnica de Envelope de Aceleração (FUPAI, 2005). As tabelas a seguir apresentam os limites de alarme para o Envelope.

Tabela 6- Níveis de Alarme para o Envelope de Aceleração.

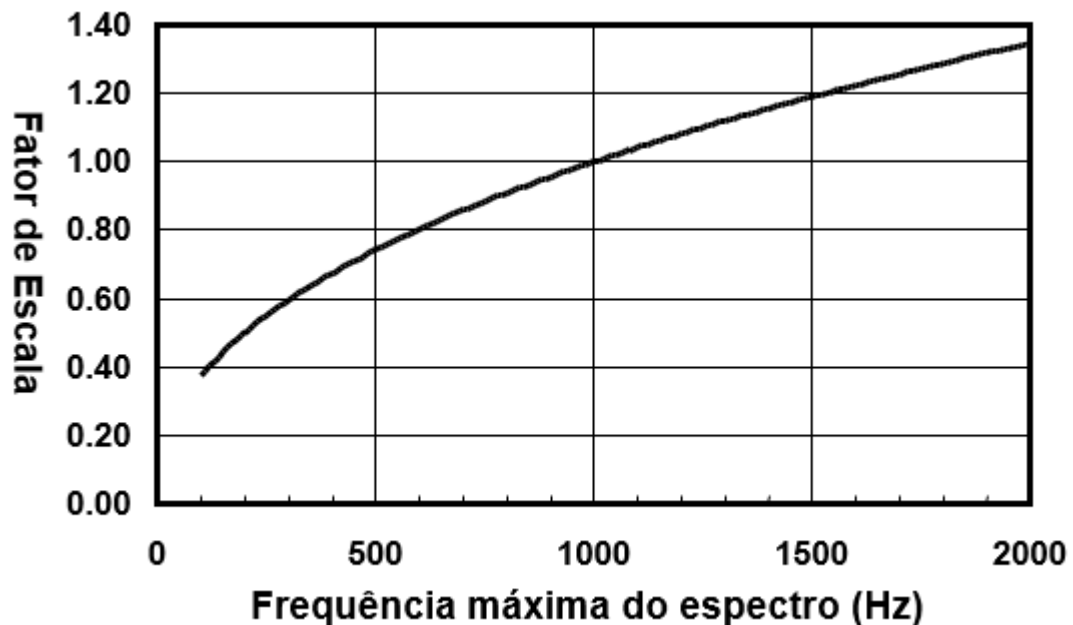
(Escala é 1/3 da Escala de Perigo)
Alarme 1 - Alerta (gE)



Fonte: SKF, 2004.

Para os valores encontrados na tabela anterior devemos aplicar um fator de escala para a frequência máxima utilizada na configuração do espectro de frequências, aplicando a seguinte tabela.

Tabela 7- Fator de escala para o Envelope de Aceleração.



Fonte: SKF, 2004.

2.16 Transdutores

Um transdutor é um instrumento que transforma os dados de grandezas físicas como som, temperatura, pressão, deslocamento em sinais elétricos equivalentes. Consiste em converter uma forma de energia em outra. No mercado existem vários tipos de transdutores, alguns deles são menos úteis que outros em razão da sua não linearidade ou resposta lenta. Alguns transdutores que costumam ser usados para medição de vibração são apresentados a seguir (RAO, 2008).

2.16.1 Transdutores de Resistência Variável

Nesses transdutores, um deslocamento causa uma alteração na resistência elétrica, a qual, provoca uma mudança na tensão ou corrente de saída. Um extensômetro de resistência elétrica é feito de um arame fino cuja resistência se altera quando ele é sujeito à deformação mecânica. Quando é preso a uma estrutura, o extensômetro sofre o mesmo deslocamento que a estrutura e, por consequência, a mudança em sua resistência dá o esforço aplicado à estrutura. Rao (2008) afirma que o arame é colocado entre duas folhas de papel fino, como um sanduíche, e o extensômetro é fixado à superfície na qual a deformação deve ser medida.

2.16.2 Transdutores Piezelétricos

Certos materiais naturais e fabricados, como sal de Rochelle, sulfato de lítio, turmalina e o quartzo, geram carga elétrica quando sujeitos a uma deformação ou tensão mecânica. A carga elétrica desaparece quando a carga mecânica é eliminada. Tais materiais são denominados piezelétricos, e os transdutores que utilizam o efeito piezelétrico são conhecidos como transdutores piezelétricos.

2.16.3 Transdutores Eletrodinâmicos

Quando um condutor elétrico, na forma de solenoide, movimenta-se em um campo magnético, uma tensão é gerada no condutor.

2.16.4 Transdutor Transformador Diferencial Linear Variável

O transdutor transformador diferencial linear variável consiste em uma bobina primária no centro, duas bobinas secundárias nas extremidades e um núcleo magnético que pode movimentar-se livremente dentro das bobinas no sentido axial. Quando uma tensão de entrada é aplicada à bobina primária, a tensão de saída será igual à diferença entre as tensões induzidas nas bobinas secundárias. Essa tensão de saída depende do acoplamento magnético entre as bobinas e o núcleo que, por sua vez, depende do deslocamento axial do núcleo. Contanto que o núcleo não se afaste muito do centro da bobina, a tensão de saída varia linearmente com o deslocamento do núcleo, daí o nome transformador diferencial variável linear (RAO, 2008).

2.16.5 Sensores de Vibração

Quando um transdutor é usado em conjunto com outro dispositivo para medir vibrações, ele é denominado sensor de vibração. Os sensores de vibração comumente utilizados são conhecidos como instrumentos sísmicos. Um instrumento sísmico consiste em um sistema massa-mola-amortecedor montado sobre o corpo vibratório é medido pela determinação do deslocamento da massa em relação à base na qual está montada (RAO, 2008).

2.16.6 Transdutor de Deslocamento

Um transdutor de deslocamento é um instrumento que mede o deslocamento de um corpo vibratório. O deslocamento relativo entre a massa e a base é, em essência, o mesmo que o deslocamento da base (RAO ao, 2008).

2.16.7 Acelerômetro

Um acelerômetro é um instrumento que mede a aceleração de um corpo vibratório. Acelerômetros são amplamente usados para medir vibração e para registrar terremotos. Pelo registro do acelerômetro, obtemos a velocidade e os deslocamentos por integração (RAO, 2008).

A condição para o dispositivo de base móvel funcionar como acelerômetro é ter alta frequência natural. A forma construtiva que permitiu grande sucesso e disseminação no mercado é o acelerômetro piezolétrico que acumula muitas vantagens inerentes à sua concepção de projeto (FUPAI, 2003).

Dentre as principais vantagens do acelerômetro piezolétrico, temos: o cristal piezolétrico é de alta dureza e possui alta resistência; o cristal permite medições de baixíssimos níveis; larga faixa de frequência. Podem medir de 1 mHz a 100 kHz; possui pequena massa.

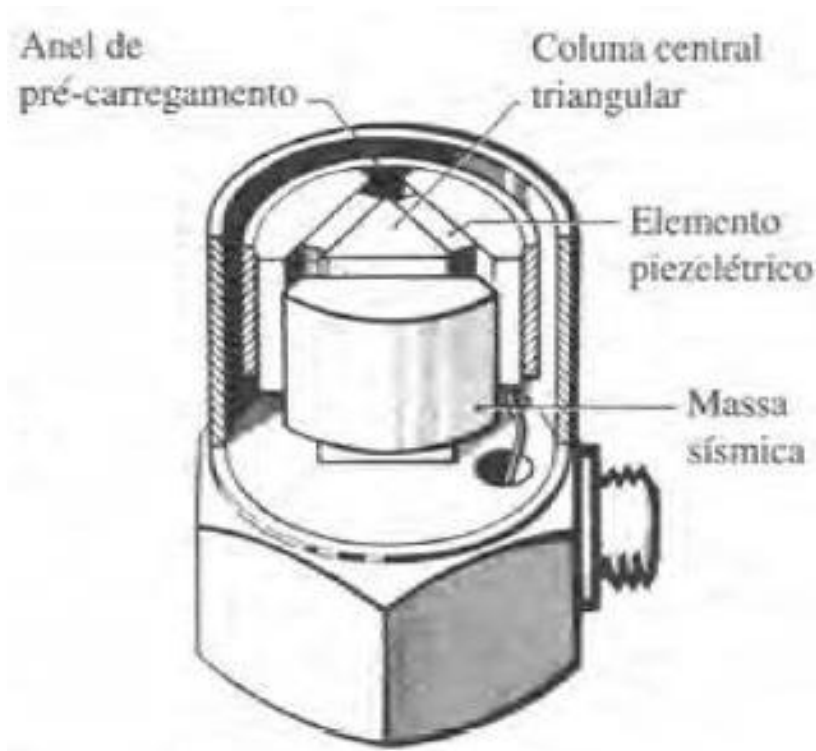


Figura 45- Acelerômetro piezolétrico.

Fonte: Rao, 2008.

2.17 Montagem dos sensores

A NBR 10082:2011 são apontados os detalhes sobre os pontos de medida de vibração nas máquinas. Nela são indicados que: as medições devem ser realizadas nas partes expostas da máquina; as medidas sejam realizadas de tal forma que represente o nível de vibração no mancal da melhor forma possível, sem interferência de qualquer ressonância.

2.17.1 Localização dos Transdutores

Assim como apontado pela NBR 10082:2011, as medições deverão ser realizadas na carcaça do pedestal ou mancal do equipamento, colocando o sensor em uma direção axial e no mínimo duas direções radiais ortogonais entre si, dando preferência para a escolha das direções verticais e horizontais, assim como mostrado nas figuras a seguir.

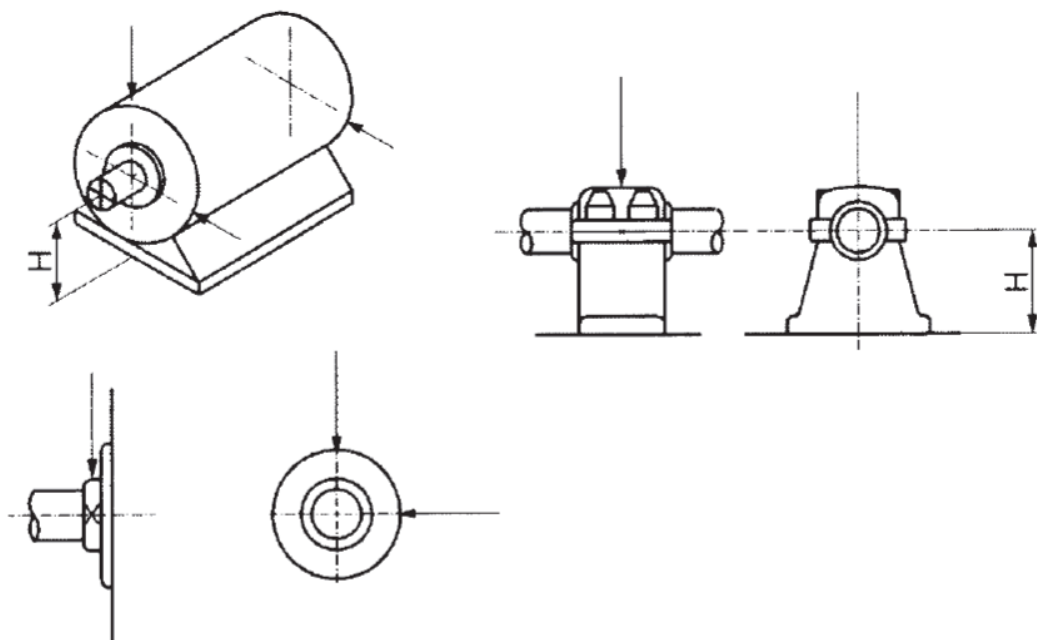


Figura 46- Recomendação para a fixação dos sensores.

Fonte: NBR10082:2011.

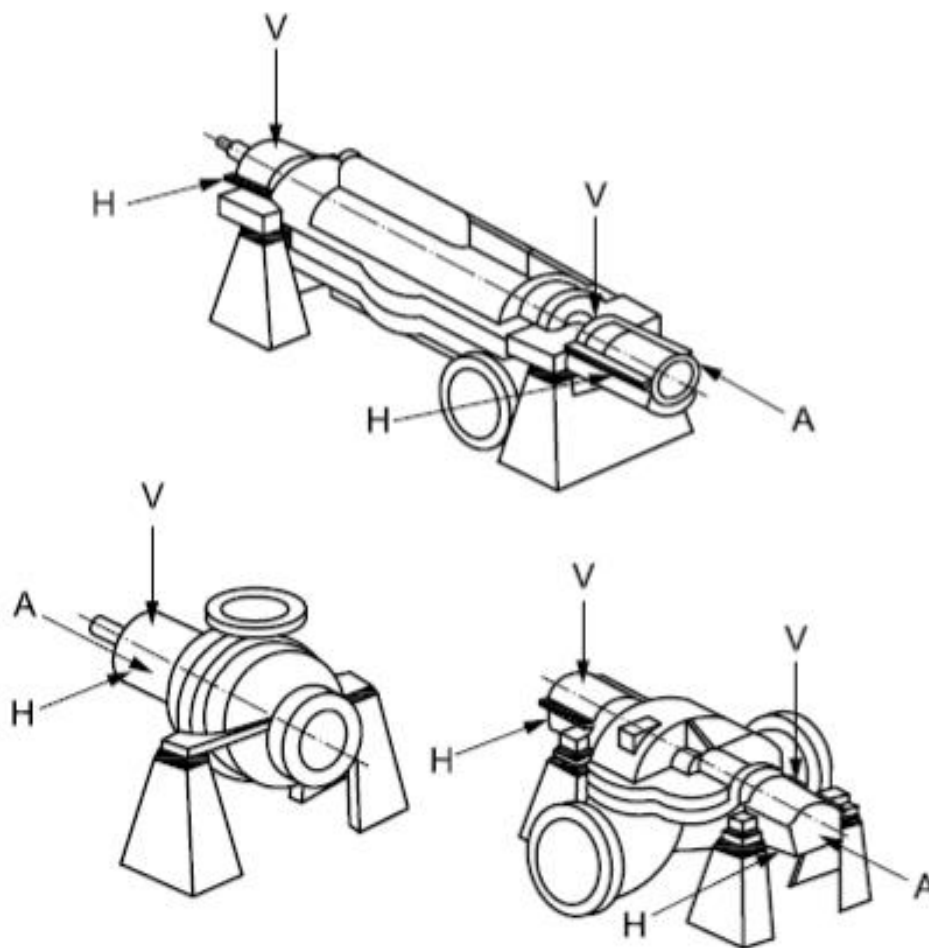


Figura 47- Locais de medição em bombas horizontais

Fonte: ISO 10816-7:2009.

2.17.2 Tipos de fixação

Os transdutores exigem certos cuidados para obter a performance desejada e sua forma de fixação interfere diretamente na resposta do sinal que será aferido (FUPAI, 2003). O range de frequência e o range de amplitude do sinal coletado, proibições de temperatura e acessibilidade são alguns dos fatores que devem ser considerados para a montagem dos sensores (SKF, 2004). Uma maior superfície de contato de montagem entre transdutor e equipamento reflete em uma maior precisão e resposta de alta frequência conforme indicado na imagem a seguir.

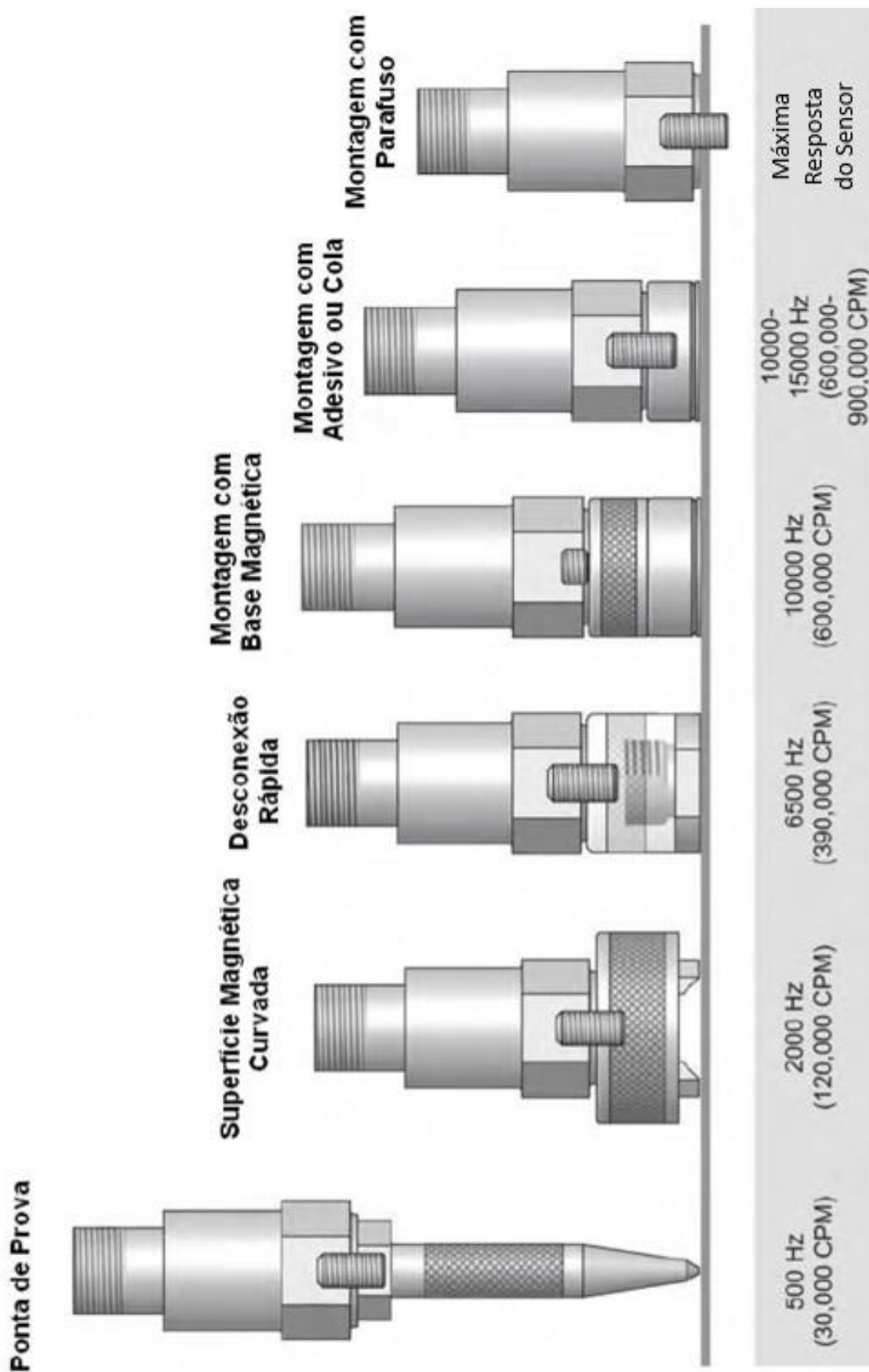


Figura 48- Relação entre máxima frequência de resposta e tipos de montagem dos sensores.

Fonte: CTC, 2010.

2.18 Analisadores de sinal

Um analisador de vibração é o equipamento responsável por decompor e filtrar os sinais obtidos pelos transdutores para a verificação da condição do funcionamento das máquinas (FUPAI, 2003). O analisador mais comumente empregado é identificado como analisador de transformada rápida de Fourier (FFT), que recebe os sinais de tensão, que representam força, deformação, aceleração, velocidade e deslocamento, para executar os cálculos (RAO, 2008).

3 METODOLOGIA

Fluxo de Implantação de um Sistema Online			
Item	Oque?	Como?	Por quê?
1.	Identificação dos equipamentos críticos da planta ↓	Por meio de desenhos da planta, visita no local e avaliação da criticidade dos ativos.	Para identificar quais os equipamentos serão monitorados pelo sistema.
2.	Detalhamento das características construtivas dos ativos ↓	Consultando desenhos dos ativos, cadastros já existentes, através de contato com o fornecedor ou visita no local.	Para a parametrização das máquinas a serem monitoradas.
3.	Definição dos níveis de alarme ↓	Observando normas existentes e enquadrando os equipamentos de acordo com suas características construtivas.	Para identificar a condição de funcionamento do ativo pelo seu nível global de vibração.
4.	Definição dos pontos de monitoramento ↓	Observando as recomendações das normas existentes e pontos possíveis para fixação do sensor na superfície da máquina.	Indicar os locais onde deverão ser fixados os sensores para a realização do monitoramento
5.	Cadastro dos equipamentos	Cadastrando no software do sistema as informações construtivas levantadas e	Parametrizar e configurar os sinais coletados e limites de alarme

3.1 Identificação dos equipamentos críticos da planta

Para necessitar de um sistema de monitoramento da sua condição a máquina deve possuir um certo grau de importância para a linha de produção. Para a definição desses equipamentos deve ser realizada uma avaliação das consequências causadas pela falha do ativo. Para isso, devem ser levantados todos os ativos presentes na planta e os efeitos causados pela ocorrência de parada repentina. Nessa etapa são levantados os impactos gerados na qualidade, produtividade, manutenibilidade, segurança, saúde e meio ambiente, por exemplo.

3.2 Detalhamento das características construtivas dos ativos

As características técnicas de cada equipamento são informações primordiais para a avaliação da sua condição e o funcionamento do sistema proposto. Nesta etapa são consultados desenhos, fornecedores, cadastro de sobressalentes ou é realizada uma visita no local para investigação dessas informações. Esse detalhamento possibilita a configuração dos pontos a serem monitorados e parametrização dos níveis de alarme da condição dos ativos.

3.3 Definição dos níveis de alarme

Os limites de alarme são responsáveis por indicar a severidade do nível de vibração aferido nos equipamentos monitorado, sendo utilizados para indicar a necessidade de intervenção da manutenção. Quando não existirem recomendação específica do fabricante para os limites de vibração são adotados os limites recomendados em normas, realizando o enquadrando os equipamentos de acordo com suas características construtivas.

3.4 Definição dos pontos de monitoramento

A correta indicação dos locais para a fixação dos sensores e aferição da vibração proveniente do equipamento é fundamental para o funcionamento do sistema. Transdutores mal instalados geram ruídos ou erros nos sinais, ocasionando falha do sistema ou falsos diagnósticos.

Nessa etapa devem ser apontados os tipos de fixação que permita uma boa leitura do sinal. Também deve ser realizada uma verificação da forma construtiva dos equipamentos para identificação das direções e mancais onde serão fixados os sensores.

3.5 Cadastro dos equipamentos

Comumente os locais de medição de vibração são identificados com letras H, V e A que correspondem aos planos de aquisição de dados para as direções horizontais, verticais e axiais respectivamente. Além disso, essas letras recebem um prefixo numérico correspondente ao mancal que está sendo monitorado. A numeração desse mancal segue o raciocínio de fluxo de transmissão potência do conjunto que compõem o equipamento, conforme exemplo a seguir.

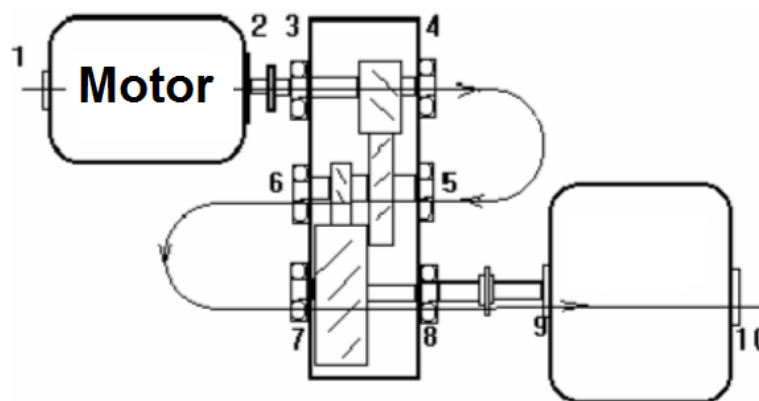


Figura 49- Numeração dos pontos de medição seguindo o fluxo de energia.

Fonte: SKF, 2004.

4 DESENVOLVIMENTO

4.1 Identificação dos equipamentos críticos da planta

Com o auxílio da tabela a seguir podemos classificar do grau de criticidade do equipamento.

Tabela 8- Matriz de criticidade para definição do grau de importância do ativo industrial.

A PARADA REPENTINA DO EQUIPAMENTO PODERÁ PROVOCAR:				
CÓDIGO	ENFOQUE	NÍVEL DE CRITICIDADE		
		ALTA (A)	MÉDIA (B)	BAIXA (C)
SMS	Segurança, Saúde e Meio-Ambiente	Acidentes Pessoais, Agressões ao Meio-Ambiente e Danos Materiais	Exposição a Riscos de Acidentes ao Meio-Ambiente ou ao Patrimônio	Nenhum Risco
QP	Qualidade e Produtividade	Produtos com Defeito, Redução da Velocidade e Redução da Produção	Variação da Qualidade ou da Produtividade	Não Afeta
OP	Oportunidade de Produção	Cessa todo o Processo	Cessa Parte do Processo	Não Afeta
TO	Taxa de Ocupação	24 horas por dia	Dois Turnos ou Horário Administrativo	Ocasionalmente ou não faz Parte do Processo Produtivo
FQ	Frequência de Quebra	Intervalo Menor que 6 Meses	Em Média Uma Vez por Ano	Raramente Ocorre
MT	Mantenabilidade	O Tempo e/ou Custo do Reparo são Elevados	O Tempo e/ou Custo do Reparo são Suportáveis	O Tempo e/ou Custo do Reparo são Irrelevantes

Fonte: CEFET-AL.

Realizada a classificação do grau de criticidade do ativo industrial em cada enfoque, utiliza-se o fluxograma contido na imagem a seguir para definir o tipo de manutenção e conjunto de sistemas e intervenções que consolidarão os planos de manutenção.

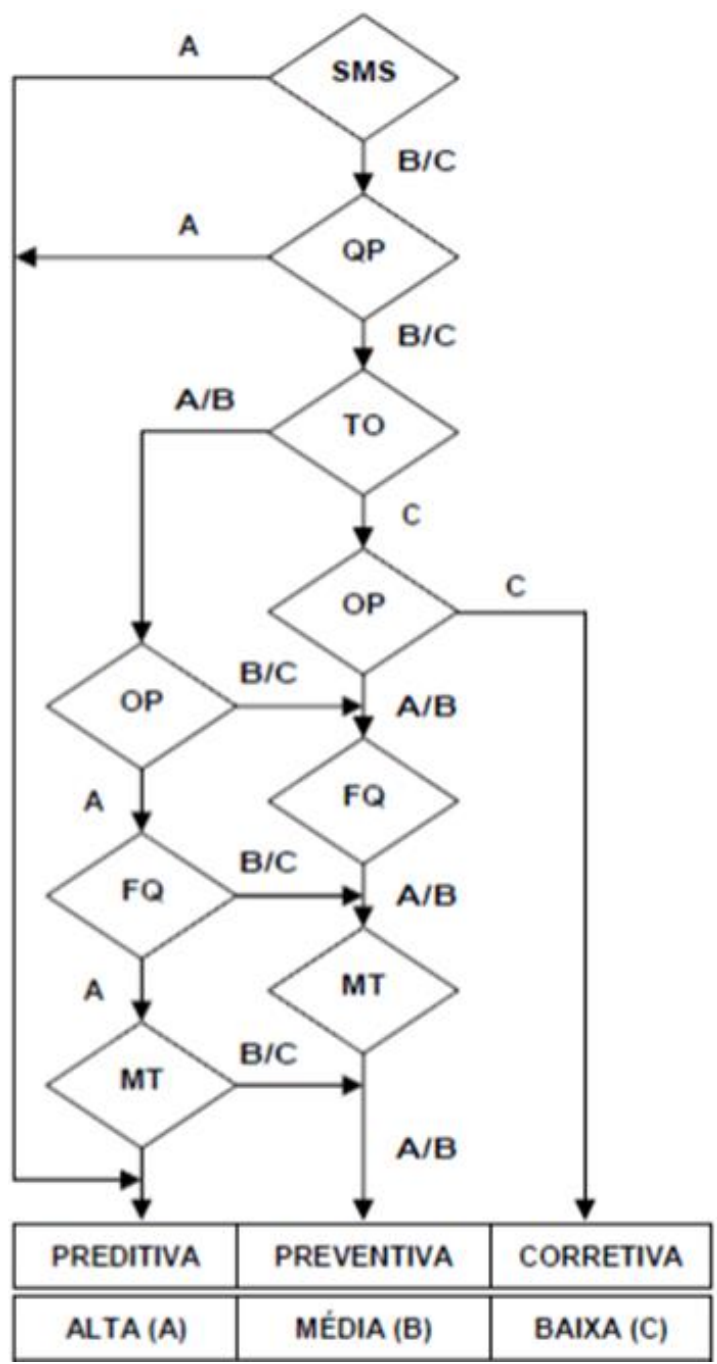


Figura 50- Fluxograma para definição do tipo de manutenção a ser empregada.

Fonte: CEFET-AL.

Por gerarem a redução da produção do produto final, em decorrência da falha dos seus equipamentos, a torre de resfriamento e seus principais ativos são

classificados com nível de criticidade alta, fundamentando assim a implantação de técnicas preditivas na manutenção dos seus principais equipamentos.

Os sistemas que constituem a torre de resfriamento são divididos da seguinte forma: Bombeamento de Água para Torre, Resfriamento de Água e Bombeamento de Água Fria para o LTQ. A localização dos principais ativos que compõem esses sistemas segue destacada, em amarelo, na imagem a seguir.

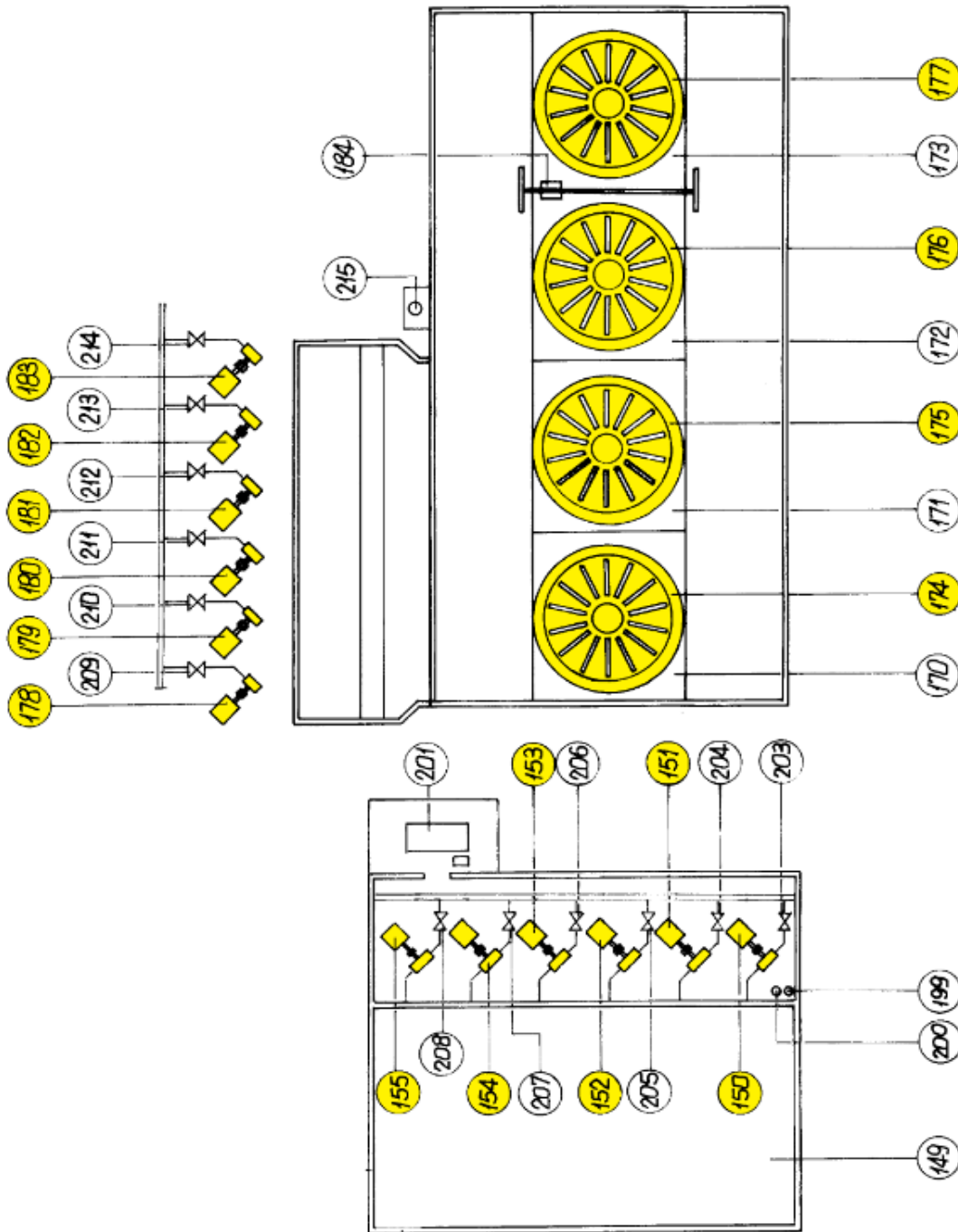


Figura 51- Localização dos equipamentos que integram a torre de resfriamento.

Fonte: Empresa metalúrgica em questão.

Nas tabelas abaixo estão identificados individualmente cada ativo e o código de localização.

Tabela 9- Identificação dos equipamentos que compõem o Sistema de Bombeamento de Água para a Torre.

BOMBEAMENTO DE AGUA PARA A TORRE	
LOCALIZAÇÃO	ATIVO
150	BOMBA APT#1
	MOTOR DA BOMBA APT#1
151	BOMBA APT#2
	MOTOR DA BOMBA APT#2
152	BOMBA APT#3
	MOTOR DA BOMBA APT#3
153	BOMBA APT#4
	MOTOR DA BOMBA APT#4
154	BOMBA APT#5
	MOTOR DA BOMBA APT#5
155	BOMBA APT#6
	MOTOR DA BOMBA APT#6

Fonte: Empresa metalúrgica em questão.

Tabela 10- Identificação dos equipamentos que compõem o Sistema de Resfriamento de Água.

RESFRIAMENTO DE ÁGUA	
LOCALIZAÇÃO	ATIVO
174	CAIXA REDUTORA DO EXAUSTOR 1
	MOTOR DO EXAUSTOR 1
175	CAIXA REDUTORA DO EXAUSTOR 2
	MOTOR DO EXAUSTOR 2
176	CAIXA REDUTORA DO EXAUSTOR 3
	MOTOR DO EXAUSTOR 3
177	CAIXA REDUTORA DO EXAUSTOR 4
	MOTOR DO EXAUSTOR 4

Fonte: Empresa metalúrgica em questão.

Tabela 11- Identificação dos equipamentos que compõem o Sistema de Bombeamento de Água Fria para o LTQ.

BOMBEAMENTO AGUA FRIA PARA O LTQ	
LOCALIZAÇÃO	ATIVO
178	BOMBA AFPL#1
	MOTOR BOMBA AFPL#1
179	BOMBA AFPL#2
	MOTOR BOMBA AFPL#2
180	BOMBA AFPL#3
	MOTOR BOMBA AFPL#3
181	BOMBA AFPL#4
	MOTOR BOMBA AFPL#4
182	BOMBA AFPL#5
	MOTOR BOMBA AFPL#5
183	BOMBA AFPL#6
	MOTOR BOMBA AFPL#6

Fonte: Empresa metalúrgica em questão.

4.2 Detalhamento das características construtivas dos ativos

Na empresa em questão foi possível identificar todas as características técnicas construtivas de cada ativo por meio de um cadastro já existente no banco de dados contido no software de gestão da manutenção, utilizado pela empresa. Nas tabelas a seguir, identificados de acordo com seu tipo e sistema, estão as informações técnicas de cada equipamento rotativo da torre de resfriamento.

Tabela 12- Características Técnicas do Sistema de Bombeamento de Água para a Torre.

BOMBEAMENTO DE ÁGUA PARA TORRE	
BOMBA	
ROTAÇÃO	1174 RPM
POTÊNCIA DA BOMBA	350 CV
ROLAMENTO LA	NU319
ROLAMENTO LOA	7319
TIPO	CENTRIFUGA
POSIÇÃO DE MONTAGEM	HORIZONTAL
DIREÇÃO DE FLUXO	AXIAL
ESTÁGIO	SIMPLES
FLUIDO BOMBEADO	AGUA RECIRCULADA
TEMPERATURA DO FLUIDO	35 GRAUS CELSIUS
VAZÃO MÁXIMA	303 M ³ /H
ALTURA MANOMÉTRICA	105 MCA
NÚMERO DE PÁS	6
MOTOR	
ROTAÇÃO	1174 RPM
POTÊNCIA NOMINAL	350 CV
ROLAMENTO LA	NU322-C3
ROLAMENTO LOA	6319-C3
TIPO	ASSINCRONO DE INDUCAO
ALIMENTAÇÃO	CORRENTE ALTERNADA
ROTOR	GAIOLA
TENSÃO DE ALIMENTAÇÃO	2300 V
CORRENTE NOMINAL	84,5 A
FREQUÊNCIA	60 HZ
NÚMERO DE POLOS	6 POLOS

Fonte: Empresa metalúrgica em questão.

Tabela 13- Características Técnicas do Sistema de Resfriamento de Água.

RESFRIAMENTO DE ÁGUA	
MOTOR	
ROTAÇÃO	1750 RPM
POTÊNCIA NOMINAL	200 CV
ROLAMENTO LA	NJ319
ROLAMENTO LOA	6319
TIPO	ASSINCRONO DE INDUCAO
ALIMENTAÇÃO	CORRENTE ALTERNADA
ROTOR	GAIOLA
TENSÃO DE ALIMENTAÇÃO	460 V
CORRENTE NOMINAL	NÃO INFORMADO
FREQUÊNCIA	60 HZ
NÚMERO DE POLOS	4 POLOS
REDUTOR	
ROTAÇÃO DE ENTRADA	1750 RPM
POTÊNCIA	200 HP
RELAÇÃO TRANSMISSÃO	1:13,67
Z1	25
Z2	46
Z3	14
Z4	104
ROLAMENTO 1	6559C/6536
ROLAMENTO 2	90040/749A
ROLAMENTO 3	HH224335/HH224310
ROLAMENTO 4	943/932
ROLAMENTO 5	99600/99100
ROLAMENTO 6	99600/99100
VENTILADOR	
NÚMERO DE PÁS	6

Fonte: Empresa metalúrgica em questão.

Tabela 14- Características Técnicas do Sistema de Bombeamento de Água Fria para o LTQ.

BOMBEAMENTO AGUA FRIA PARA O LTQ	
BOMBA	
ROTAÇÃO	1150 RPM
POTÊNCIA DA BOMBA	585 CV
ROLAMENTO LA	NU321-C3
ROLAMENTO LOA	7321
TIPO	CENTRIFUGA
POSIÇÃO DE MONTAGEM	HORIZONTAL
DIREÇÃO DE FLUXO	RADIAL
ESTÁGIO	SIMPLES
FLUIDO BOMBEADO	AGUA INDUSTRIAL
TEMPERATURA DO FLUIDO	32 GRAUS CELSIUS
VAZÃO MÁXIMA	2887 M ³ /H
ALTURA MANOMÉTRICA	45 MCA
NÚMERO DE PÁS	7
MOTOR	
ROTAÇÃO	1175 RPM
POTÊNCIA NOMINAL	650 CV
ROLAMENTO LA	6324
ROLAMENTO LOA	6322
TIPO	ASSINCRONO DE INDUCAO
ALIMENTAÇÃO	CORRENTE ALTERNADA
ROTOR	GAIOLA
TENSÃO DE ALIMENTAÇÃO	2300 V
CORRENTE NOMINAL	156 A
FREQUÊNCIA	60 HZ
NÚMERO DE POLOS	6 POLOS

Fonte: Empresa metalúrgica em questão.

4.3 Definição dos níveis de alarme

4.3.1 Níveis de alarme para os motores

Utilizaremos os valores descritos a seguir para os motores dos sistemas de Bombeamento de Água para a Torre e de Resfriamento de Água que possuem as seguintes potências de 257 kW e 147 kW, respectivamente.

Tabela 15- Níveis de alarme para os motores dos sistemas de Bombeamento de Água para a Torre e de Resfriamento de Água.

Classificação de Severidade para máquinas grande com potência nominal superior a 15kW até ou igual a 300 kW, máquinas elétricas com altura de eixo $160 \text{ mm} \geq H < 315 \text{ mm}$. Rotação entre 120 RPM e 15.000 RPM			
Tipo de Suporte	Limites de Alarme	Deslocamento - RMS (μm)	Velocidade - RMS (mm/s)
Rígido	A/B	22	1,4
	B/C	45	2,8
	C/D	71	4,5
<ul style="list-style-type: none">▪ A – Excelente (máquinas recém comissionadas/ recém-instaladas);▪ B – Bom ou Aceitável (equipamento em condição de funcionamento por um longo período de tempo sem restrições);▪ C – Atenção (o equipamento não deverá operar por um longo período de tempo – planejar ação);▪ D – Risco de Falha (tomar ação imediatamente).			

Fonte: ISO 10816-3:2009.

Já para os motores do Sistema de Bombeamento de Água Fria para o LTQ que possui uma potência nominal de 478 kW, aplicaremos os limites descritos a seguir.

Tabela 16- Níveis de alarme para os motores do Sistema de Bombeamento de Água Fria para o LTQ.

Classificação de Severidade para máquinas grande com potência nominal superior a 300 kW e inferior a 50 MW, máquinas elétricas com altura de eixo H ≥ 315 mm. Rotação entre 120 RPM e 15.000 RPM			
Tipo de Suporte	Limites de Alarme	Deslocamento - RMS (µm)	Velocidade - RMS (mm/s)
Rígido	A/B	29	2,3
	B/C	57	4,5
	C/D	90	7,1
<ul style="list-style-type: none"> ▪ A – Excelente (máquinas recém comissionadas/ recém-instaladas); ▪ B – Bom ou Aceitável (equipamento em condição de funcionamento por um longo período de tempo sem restrições); ▪ C – Atenção (o equipamento não deverá operar por um longo período de tempo – planejar ação); ▪ D – Risco de Falha (tomar ação imediatamente). 			

Fonte: ISO 10816-3:2009.

4.3.2 Níveis de alarme para as bombas

As bombas dos sistemas de Bombeamento de Água para a Torre e Bombeamento de Água Fria para o LTQ serão classificadas conforme tabela a seguir, por apresentarem as respectivas potências de 257 kW e 430 kW.

Tabela 17- Níveis de Alarme para as bombas dos sistemas de Bombeamento de Água para a Torre e Bombeamento de Água Fria para o LTQ.

Limites de vibração para medições em partes não rotativas de bombas com rotores, com potência superior a 1 kW, aplicável para rotores com número de pás igual ou superior a 3.		
Zona de Alarme	Descrição	Limite de Velocidade de Vibração – r.m.s (mm/s)
		Categoria II
		>200 kW
A	Máquinas recém comissionadas	4,2
B	Operação irrestrita em longo prazo, na faixa de operação.	6,1
C	Operação Limitada (Planejamento de intervenção)	9,5
D	Risco de Falha (Ação imediata)	>9,5
Categoria II – Bombas para aplicações gerais ou aplicação menos crítica.		

Fonte: ISO 10816-7:2009.

4.3.3 Níveis de alarme para os redutores

Como não possuímos recomendações do fabricante, iremos definir os níveis de alarme utilizando a recomendação da norma NBR 10082:2011 e classificar os redutores do Sistema de Resfriamento da Água conforme tabela a seguir.

Tabela 18- Níveis de Alarme para os redutores do Sistema de Resfriamento da Água.

Máquinas rotativas que operam entre 600 RPM e 15000 RPM, com potência acima de 15 kW e frequência de vibração entre 10 Hz e 1000 Hz, através da medição de vibrações mecânicas na carcaça do mancal ou do pedestal que suporta o mancal.		
Classe de suporte	Limite entre zonas	GRUPO II
		Valor eficaz mm/s-RMS
Rígido	A/B	1,8
	B/C	2,8
	C/D	4,5
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Grupo II: máquinas com potência entre 15 kW até 300 kW. 		
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Zona A: valores de vibração recomendados para máquinas novas ou recentemente comissionadas; ▪ Zona B: máquinas com níveis de vibração classificados dentro desta zona são consideradas aceitáveis para operação contínua para longo período de operação, sem restrição. ▪ Zona C: máquinas com níveis de vibração classificadas dentro desta zona são normalmente consideradas insatisfatórias para a operação contínua por um longo período. Geralmente, podem continuar operando por um período limitado de tempo e deve-se programar sua correção. 		

Fonte: NBR 10082:2011.

4.3.4 Níveis de alarme para os exaustores

Os níveis de alarme dos exaustores do Sistema de Resfriamento da Água são classificados da seguinte maneira.

Tabela 19- Classificação dos exaustores do Sistema de Resfriamento da Água.

Aplicação	Exemplos	Limites de Potência do Acionamento (kW)	Categoria de Aplicação de Ventiladores
Processos Industriais, Geração de Energia, etc.	Baghouse, lavador, mina, transporte, caldeiras, ar de combustão, controle de poluição, túneis de vento.	≤300	BV-3
		>300	Vide ISO10816-Parte 3

Fonte: ISO 14694:2003

Tabela 20- Níveis de alarme para os exaustores do Sistema de Resfriamento da Água.

Condição	Categoria de Aplicação de Ventiladores	Base Rígida (mm/s)	
		Pico	RMS
Startup	BV-3	6,4	4,5
Alarme	BV-3	10,2	7,1
Shutdown (Desarme)	BV-3	12,7	9,0

Nota 1: Os níveis para desarme para ventiladores em aplicações de grau BV-1 e BV-2, devem ser estabelecidas com base em seu histórico de dados.

Fonte: ISO 14694:2003

Como as pás dos exaustores estão no eixo vertical de saída das redutoras, onde os limites de alarme são inferiores, esses valores encontrados para os níveis de alarme de viração dos exaustores não serão aplicados. Para a garantia da integridade de todos os componentes da máquina, serão utilizados os limites de alarme definidos para os redutores.

4.4 Definição dos pontos e montagem dos sensores

Na montagem dos sensores foi escolhido o método de fixação com adesivo ou cola, que dispensa a necessidade de realização de furos nas máquinas e possui uma boa faixa de resposta (com frequência máxima entre 10 kHz a 15 kHz). Nesse tipo de fixação são colados em cada ponto um disco metálico onde são rosqueados os sensores.

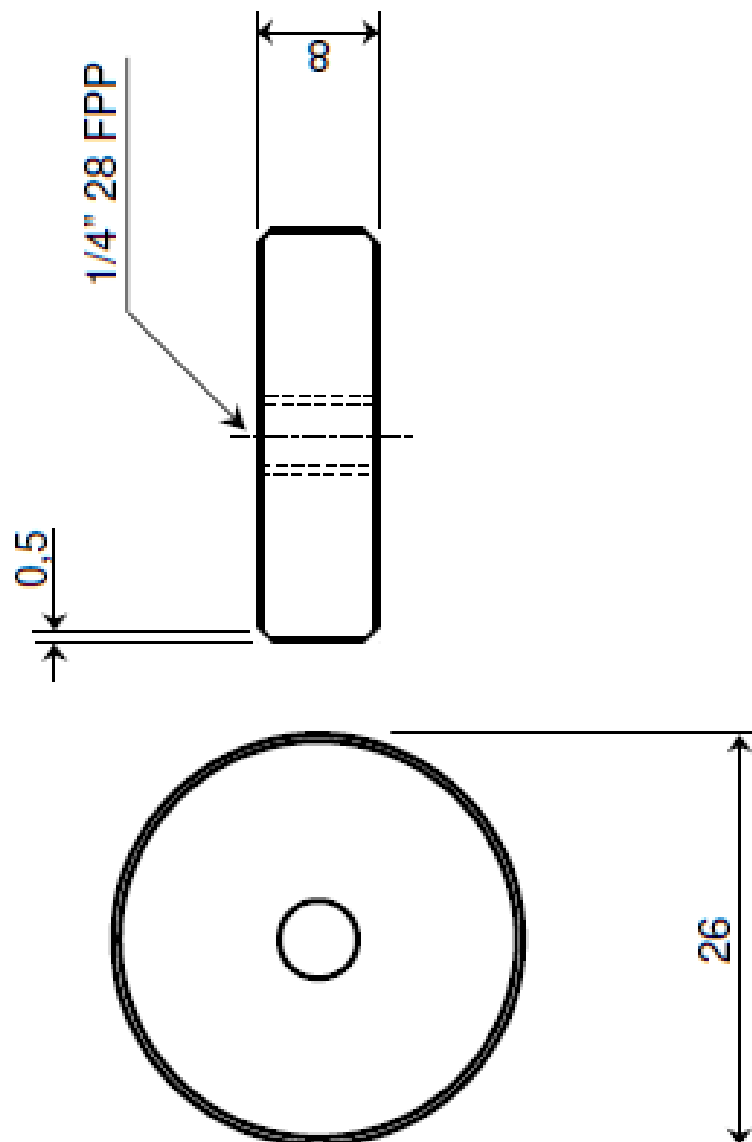


Figura 52- Dimensões da base metálica utilizada para a fixação de sensores.

Fonte: Elaborado pelos autores.

Para fixar essa base é necessário limpar a superfície antes da aplicação da cola, de preferência a base de cianocrilato.

Com a intenção de proteger os discos contra a penetração de óleo ou outras impurezas na parte inferior se faz necessário a aplicação de cola de forma que gere filetes adesivos nas bordas do disco conforme figura a seguir.

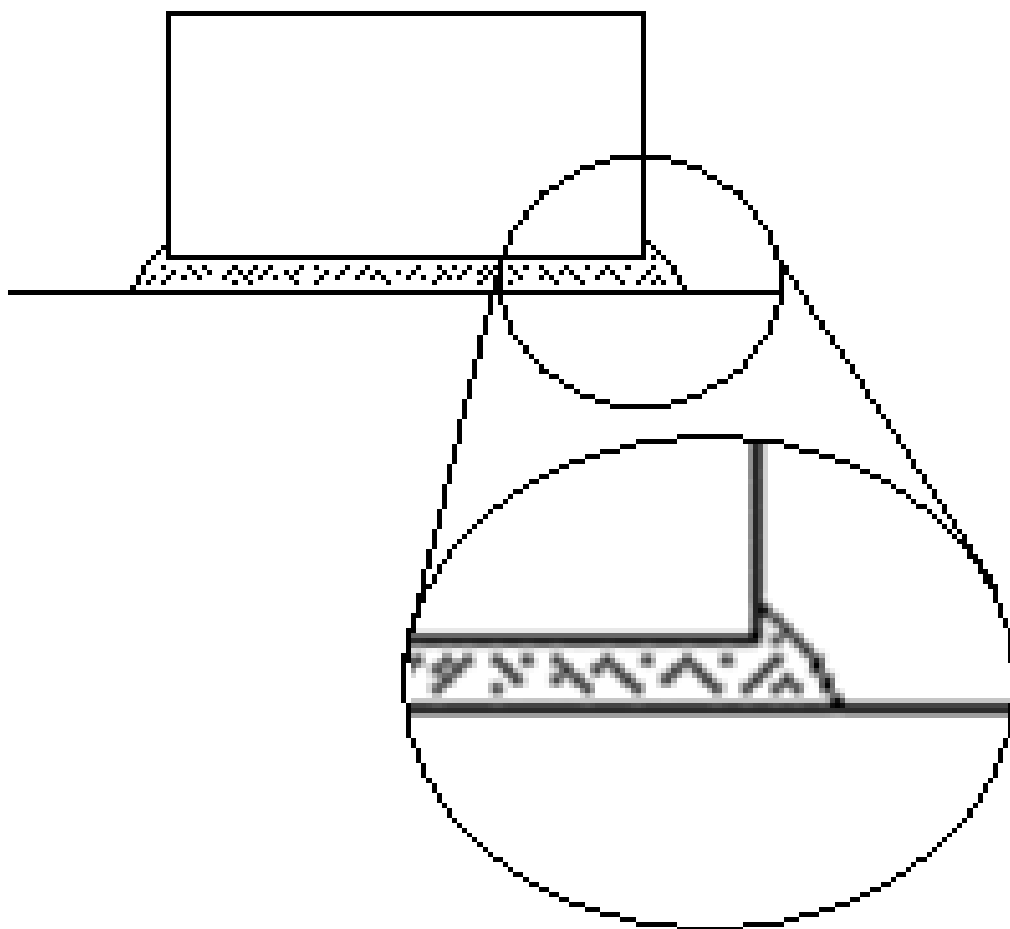


Figura 53- Detalhe do filete adesivo protegendo a borda do disco de fixação do sensor.

Fonte: Elaborado pelos autores.

4.4.1 Fixação dos sensores nos motores

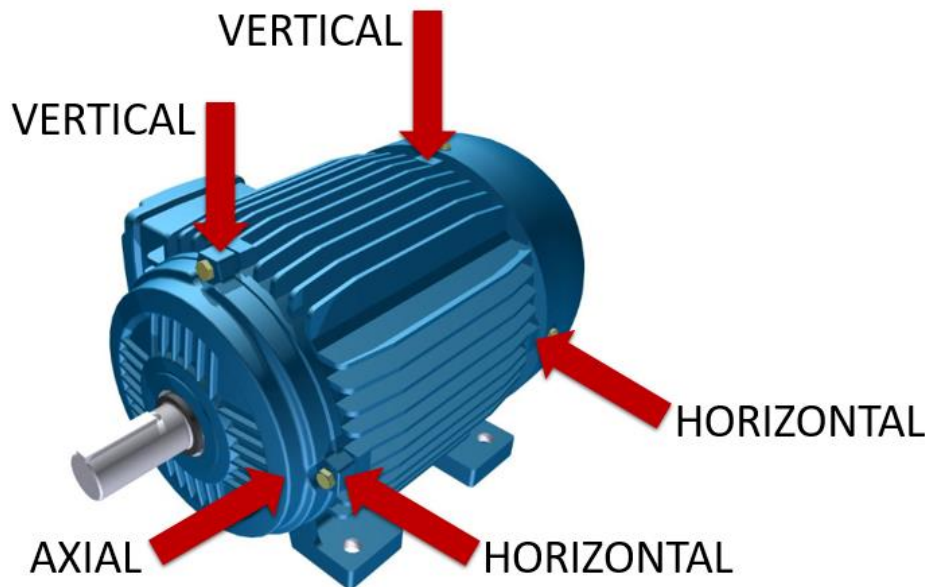


Figura 54- Localização dos sensores fixados nos motores.

Fonte: Elaborado pelos autores.

4.4.2 Fixação dos sensores nas bombas

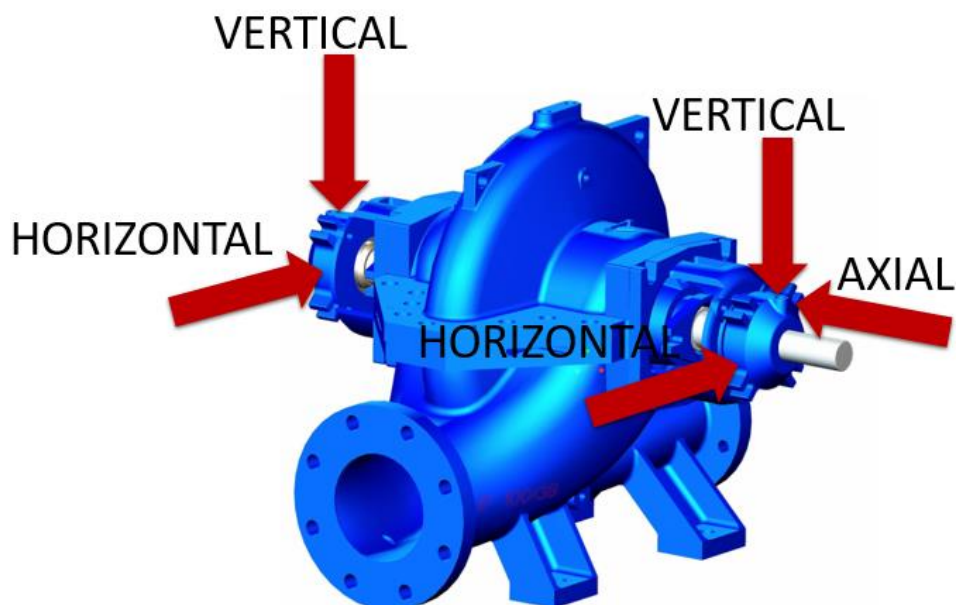


Figura 55- Localização dos sensores fixados nas bombas.

Fonte: Elaborado pelos autores.

4.4.3 Fixação dos sensores nas redutoras e exaustores

Devido a sua forma construtiva, por existir vazios em sua carcaça e ter seus mancais internos bem próximos, os redutores terão sensores apenas nos mancais de entrada e saída, da seguinte maneira. Como as pás dos exaustores são fixadas na ponta do eixo vertical de saída do redutor, os mesmos acelerômetros serão utilizados para análise do exaustor e redutor.

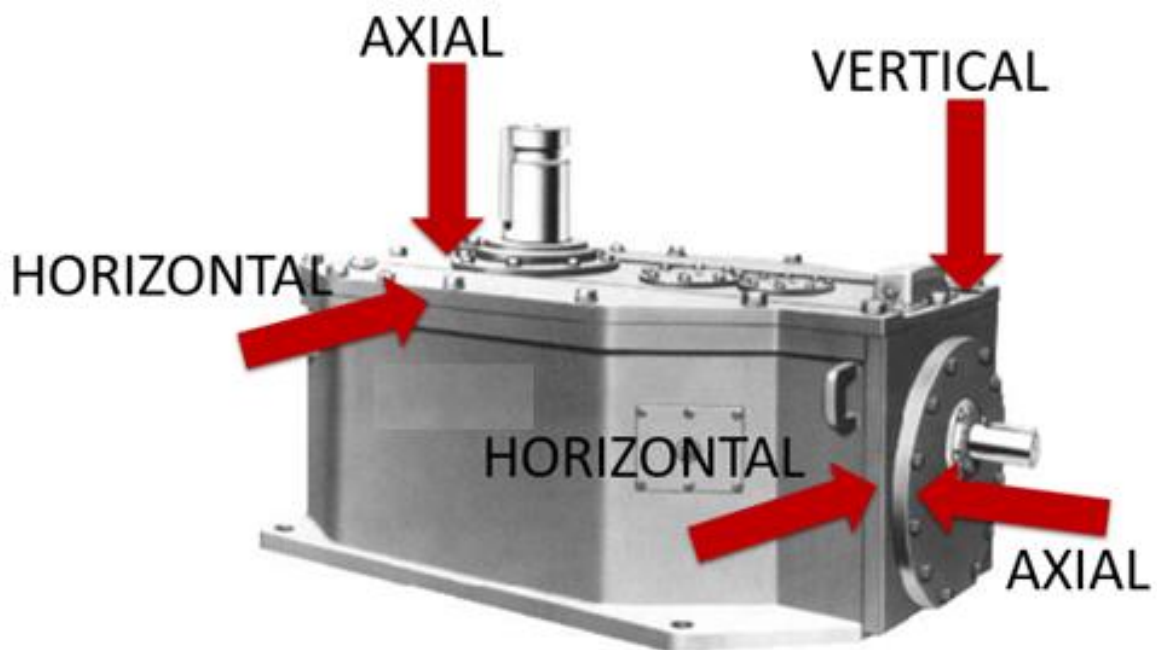


Figura 56- Localização dos sensores fixados nas redutoras.

Fonte: Elaborado pelos autores.

4.5 Cadastro dos equipamentos

O cadastro dos equipamentos, independente de qual seja o software aplicado, deve ser organizado em sua estrutura. É aconselhável que cada ativo seja cadastrado respeitando uma hierarquia do local onde está instalado. Para esse trabalho iremos adotar a seguinte ordem para cadastro dos ativos: primeiro o setor, segundo o

sistema, terceiro o local e em quarto os ativos. Sendo assim, o banco de dados terá a seguinte estrutura.

Tabela 21- Estrutura do banco de dados do sistema online.

SETOR	SISTEMA	LOCAL	ATIVO
TORRE DE RESFRIAMENTO DA ETE LTQ	BOMBEAMENTO DE ÁGUA PARA TORRE	BOMBA APT 01	MOTOR DA BOMBA APT 01
			BOMBA APT 01
		BOMBA APT 02	MOTOR DA BOMBA APT 02
			BOMBA APT 02
		BOMBA APT 03	MOTOR DA BOMBA APT 03
			BOMBA APT 03
		BOMBA APT 04	MOTOR DA BOMBA APT 04
			BOMBA APT 04
		BOMBA APT 05	MOTOR DA BOMBA APT 05
			BOMBA APT 05
	RESFRIAMENTO DE ÁGUA	EXAUSTOR 01	CAIXA REDUTORA DO EXAUSTOR 01
			MOTOR DO EXAUSTOR 01
		EXAUSTOR 02	CAIXA REDUTORA DO EXAUSTOR 02
			MOTOR DO EXAUSTOR 02
		EXAUSTOR 03	CAIXA REDUTORA DO EXAUSTOR 03
			MOTOR DO EXAUSTOR 03
		EXAUSTOR 04	CAIXA REDUTORA DO EXAUSTOR 04
			MOTOR DO EXAUSTOR 04
	BOMBEAMENTO AGUA FRIA PARA O LTQ	BOMBA AFPL 01	MOTOR DA BOMBA AFPL 01
			BOMBA AFPL 01
		BOMBA AFPL 02	MOTOR DA BOMBA AFPL 02
			BOMBA AFPL 02
		BOMBA AFPL 03	MOTOR DA BOMBA AFPL 03
			BOMBA AFPL 03
BOMBA AFPL 04		MOTOR DA BOMBA AFPL 04	
		BOMBA AFPL 04	
BOMBA AFPL 05		MOTOR DA BOMBA AFPL 05	
		BOMBA AFPL 05	
BOMBA AFPL 06		MOTOR DA BOMBA AFPL 06	
		BOMBA AFPL 06	

Fonte: Elaborado pelos autores.

4.5.1 Cadastro dos pontos de medição

Cada equipamento terá o parâmetro de velocidade cadastrado em todos os sensores. Esse parâmetro será responsável pela indicação da condição do ativo por meio da avaliação do nível global de vibração e os limites de alarme apontados nesse trabalho. Sendo assim, cada ponto deve possuir as seguintes configurações no parâmetro de velocidade:

Tabela 22- Configuração do parâmetro de velocidade.

PARÂMETRO DE VELOCIDADE	
FREQUÊNCIA MÁXIMA	1000 Hz
FREQUÊNCIA MÍNIMA	5 Hz
JANELA	Hanning
NÚMERO DE LINHAS	1800
NÚMERO DE MÉDIAS	3
UNIDADE DE AMPLITUDE	mm/s em RMS

Fonte: Elaborado pelos autores.

A partir daí são cadastradas as características técnicas de cada equipamento já identificadas nesse trabalho. De maneira geral, os softwares dedicados para análise de vibrações configuram os parâmetros para a coleta dos sinais, de acordo com as informações técnicas dos ativos cadastrados. O parâmetro de aceleração ficará configurado nos sensores fixados na direção horizontal. Configurando também os alarmes por banda de frequência, conforme demonstrado a seguir.

Tabela 23- Parâmetros de análise por banda de frequência para os motores.

Descrição	Faixa de Frequência	Grandeza Medida
Nível Global	0 - Limite do instrumento	velocidade
Sub - Harmônico	0.30-0.80xRPM	velocidade
1 X RPM	0.80 - 1.50xRPM	velocidade
2 X RPM	1.50 - 2.50xRPM	velocidade
3 - 5 X RPM	2.50 - 5.50xRPM	velocidade
6 -10 X RPM	5.50 - 10.50xRPM	velocidade
11-25 X RPM	10.50 - 25.50xRPM	velocidade
Freq.Nat.ROL.1	800.0 - 2500.0 Hz	aceleração
Freq.Nat.ROL.2	2500.0 - 5000.0 Hz	aceleração
Cond. Rolamento	> 5.0 kHz	aceleração
120 HZ	119.9 - 125.0 Hz	velocidade
240 HZ	239.9 - 245.0 Hz	velocidade
360 HZ	359.9 - 365.0 Hz	velocidade

Fonte: Elaborado pelos autores.

Tabela 24- Parâmetros de análise por banda de frequência para as bombas com 6 pás.

Descrição	Faixa de Frequência	Grandeza Medida
Nível Global	0 - Limite do instrumento	velocidade
Sub - Harmônico	0.30-0.80xRPM	velocidade
1 X RPM	0.80 - 1.50xRPM	velocidade
2 X RPM	1.50 - 2.50xRPM	velocidade
3 - 5 X RPM	2.50 - 5.50xRPM	velocidade
6 -10 X RPM	5.50 - 10.50xRPM	velocidade
11-25 X RPM	10.50 - 25.50xRPM	velocidade
Freq.Nat.ROL.1	800.0 - 2500.0 Hz	aceleração
Freq.Nat.ROL.2	2500.0 - 5000.0 Hz	aceleração
Cond. Rolamento	> 5.0 kHz	aceleração
Freq. Passagem Pás	5.50 - 6.50xRPM	velocidade

Fonte: Elaborado pelos autores.

Tabela 25- Parâmetros de análise por banda de frequência para as bombas com 7 pás

Descrição	Faixa de Frequência	Grandeza Medida
Nível Global	0 - Limite do instrumento	velocidade
Sub - Harmônico	0.30-0.80xRPM	velocidade
1 X RPM	0.80 - 1.50xRPM	velocidade
2 X RPM	1.50 - 2.50xRPM	velocidade
3 - 5 X RPM	2.50 - 5.50xRPM	velocidade
6 -10 X RPM	5.50 - 10.50xRPM	velocidade
11-25 X RPM	10.50 - 25.50xRPM	velocidade
Freq.Nat.ROL.1	800.0 - 2500.0 Hz	aceleração
Freq.Nat.ROL.2	2500.0 - 5000.0 Hz	aceleração
Cond. Rolamento	> 5.0 kHz	aceleração
Freq. Passagem Pás	6.50 - 7.50xRPM	velocidade

Fonte: Elaborado pelos autores.

Tabela 26- Parâmetros de análise por banda de frequência para os redutores com 25 dentes no pinhão.

Descrição	Faixa de Frequência	Grandeza Medida
Nível Global	0 - Limite do instrumento	velocidade
Sub - Harmônico	0.30-0.80xRPM	velocidade
1 X RPM	0.80 - 1.50xRPM	velocidade
2 X RPM	1.50 - 2.50xRPM	velocidade
3 - 5 X RPM	2.50 - 5.50xRPM	velocidade
6 -10 X RPM	5.50 - 10.50xRPM	velocidade
11-25 X RPM	10.50 - 25.50xRPM	velocidade
Freq. Engrenam.	21.5 - 28.50xRPM	velocidade
2 x Freq. Engrenam.	34.5 - 41.50xRPM	velocidade
3 x Freq. Engrenam.	53.5 – 60,5xRPM	velocidade

Fonte: Elaborado pelos autores.

4.6 Interpretação dos resultados

Os sistemas on-line para o monitoramento da condição de ativos são variados e contam com diversas ferramentas para auxiliar a realização de análises complexas, para indicação de alarmes simples e geração de relatórios de maneira automática para facilitar a interpretação dos resultados e diagnóstico da condição do ativo monitorado.

Nas figuras a seguir está representado a identificação de um defeito na pista externa do rolamento NU319 (BPFO), aplicado na Bomba 01 do Sistema de Bombeamento de Água para a Torre da Estação de Tratamento de Efluentes do LTQ.

É possível notar no gráfico de tendência do equipamento que o nível global de vibração atingiu valores superiores aos limites de alarme para o parâmetro de envelope de aceleração.

No espectro do mesmo parâmetro notamos a correspondência dos picos do sinal com o curso de BPFO do rolamento NU319.

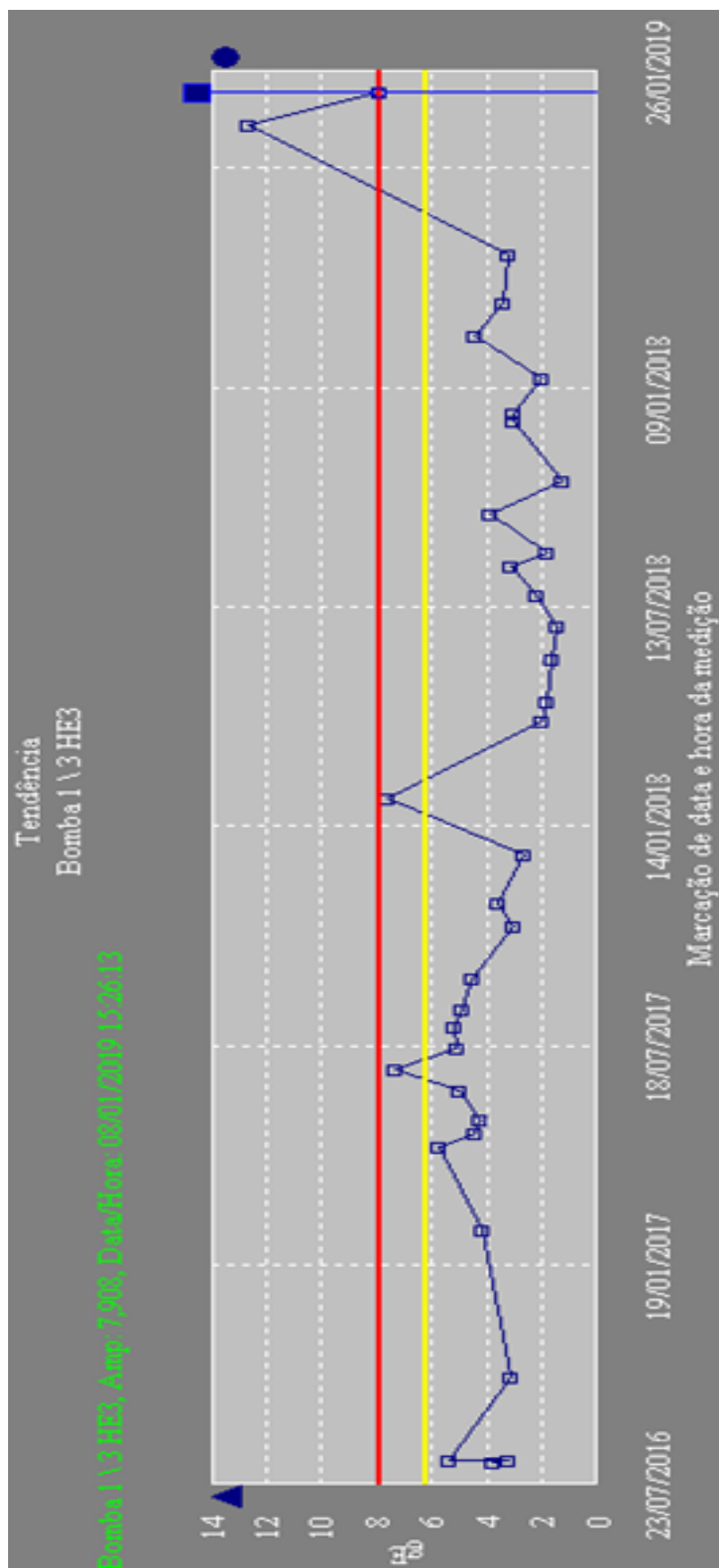


Figura 57- Gráfico de tendência do nível global de vibração do equipamento.

Fonte: Elaborado pelos autores.

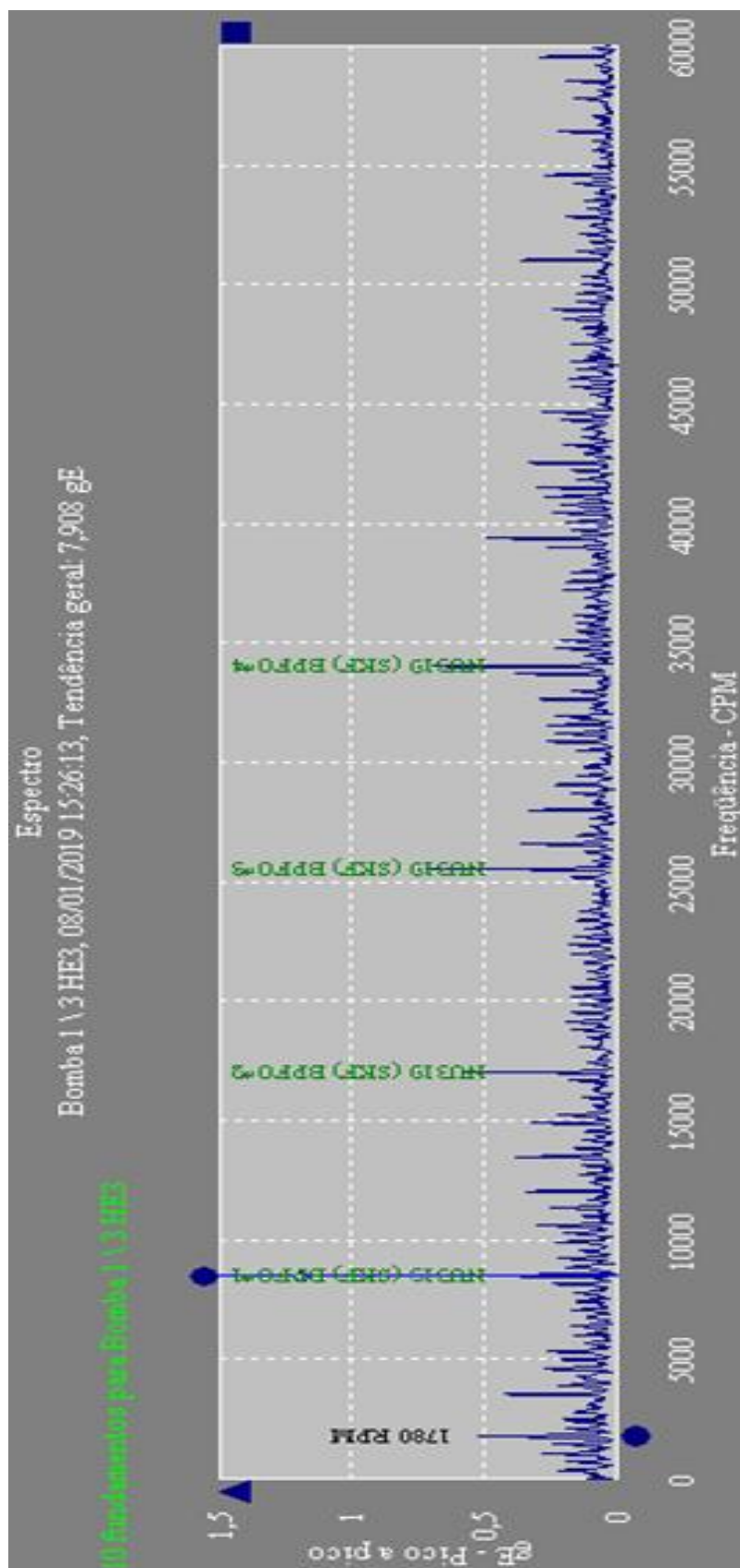


Figura 58- Espectro de Envelope de Aceleração da Bomba 01 do Sistema de Bombeamento de Água para a Torre.

Fonte: Elaborado pelos autores.

5 CONCLUSÃO

No passo da 4ª Revolução Industrial o sistema proposto nesse trabalho se apresenta como um instrumento importante, quando temos a necessidade de maior supervisão do processo produtivo e dos equipamentos da planta. O controle da condição dos equipamentos possibilita a criação de um histórico de manutenção confiável e a otimização dos recursos.

As informações que foram detalhadas nesse trabalho e o enquadramento das máquinas, nas normas existentes, possibilitaram caracterizar as condições operacionais dos equipamentos da planta em tempo real. Por ser um sistema online, o gestor pode consultar gráficos e relatórios imediatamente disponíveis quando processados e armazenados.

A identificação dos ativos que apresentam anormalidades contribui para uma melhor gestão dos recursos. A flexibilidade dos dados gerados permite a integração com os sistemas de gestão da manutenção. Eles propiciam o aprimoramento de indicadores, assim como a redução do tempo de programação das atividades de manutenção, possibilitando também uma automação do sistema para tomada de decisões, como lançamentos de pedidos de compra.

A técnica de análise de vibrações se apresenta como uma ótima ferramenta para conquista de bons indicadores de performance. É notório que a utilização dessa técnica em um sistema online apoia a gestão da manutenção de ativos, possibilitando um melhor controle dos recursos para a manutenção da planta.

6 REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

BUENO, Márcio Antônio Torres. **Vibrações mecânicas: minha caderneta de campo**. 1.ed. Volta Redonda: Editora do Autor, 2010.

MOBLEY, R. Keith. **Vibration fundamentals**. 1.ed. Boston: Butterworth-Heinemann, 1999.

PINTO, Alan Kardec; XAVIER, Júlio Aquino Nascif. **Manutenção: função estratégica**. 2.ed. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2001.

MACINTYRE, Archibald Joseph. **Equipamentos Industriais e de Processo**. 1.ed. Rio de Janeiro: LTC, 2011.

RAO, Singiresu. **Vibrações Mecânicas**. 4.ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008.

VIANA, Herbert Ricardo Garcia. **PCM, Planejamento e controle da manutenção**. 1.ed. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10082: Ensaio não destrutivo – Análise de vibrações – Avaliação da vibração mecânica de máquinas com velocidade de operação de 600 rpm a 15000 rpm**. Rio de Janeiro: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2002.

INTERNATIONAL STANDARD. **ISO14694: Industrial fans — Specifications for balance quality and vibration levels.** International Organization for Standardization. Geneva: INTERNATIONAL STANDARD, 2003.

INTERNATIONAL STANDARD. **ISO10816-3: Mechanical Vibration - Evaluation of machine vibration by measurements on non-rotating parts - Part 3 - Industrial machines with nominal power above 15 kW and nominal speeds between 120 r/min and 15 000 r/min when measured in situ.** International Organization for Standardization. Geneva: INTERNATIONAL STANDARD, p. 20. 2009.

INTERNATIONAL STANDARD. **ISO 10816-7: Mechanical vibration — Evaluation of machine vibration by measurements on non-rotating parts — Part 7: Rotodynamic pumps for industrial applications, including measurements on rotating shafts.** Geneva: INTERNATIONAL STANDARD, P.17. 2009.

ALMEIDA, Marcio Tadeu; GÓZ, Ricardo Damião Sales. **Análise de vibrações 1-Medidas e Diagnóstico.** Itajubá: FUPAI, 2003.

Technical Associates Of Charlotte. **Technical Associates Level II.** Carolina do Norte: Technical Associates Of Charlotte, 1997.

SKF. **Tecnologia de Vibrações.** São Paulo: SKF Reliability Systems, 2004.

ALS Global. **Análise de óleo: tudo o que você precisa saber sobre o assunto.**
Manutenção Preditiva. Disponível em:

<https://www.manutencaopreditiva.com/destaque/analise-de-oleo-tudo-o-que-voce-precisa-saber-sobre-o-assunto>. Acesso em: 02 fev. 2019

MMtec. **Conheça as Principais Técnicas de Manutenção Preditiva**. MMtec. Disponível em: <http://www.mmtec.com.br/conheca-as-principais-tecnicas-de-manutencao-preditiva/>. Acesso em 04 mar. 2019

Machinery Lubrication. **Used Grease Wear Debris Analysis**. Disponível em: <https://www.machinerylubrication.com/Read/672/grease-analysis-bearings>. Acesso em: 02 fev. 2019

Globoend. **Inspeção de partícula magnética**. Disponível em: <https://globoend.com.br/portofolio-item/inspecao-de-particula-magnetica/>. Acesso em: 02 fev. 2019

Maintworld. **Ten Things Vibration Analysts Should Do**. Disponível em: <https://www.maintworld.com/Cmms/Ten-Things-Vibration-analysts-Should-Do-But-Often-Don-t>. Acesso em: 02 fev. 2019

PRIMETALS. **Laminador de Tiras a Quente**. Disponível em: <https://www.primetals.com/pt/portofolio/laminacao-a-quente-de-planos/laminador-de-tiras-a-quente/>. Acesso em: 20 maio 2019

NASCIF, Júlio. **Manutenção Inteligente**. Disponível em http://www.tecem.com.br/wp-content/uploads/2018/02/Manutencao_Inteligente_julio_nascif_tecem.pdf. Acesso em: 22 fev. 2019