

Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba

**MANUTENÇÃO PREDITIVA POR ANÁLISE
DE VIBRAÇÃO**

Estudo sobre Análise de Falhas em Rolamentos de um Moinho de Facas

Guilherme Rodrigo Salgado Santos

**Pindamonhangaba - SP
2014**

Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba

MANUTENÇÃO PREDITIVA POR ANÁLISE DE VIBRAÇÃO

Estudo sobre Análise de Falhas em Rolamentos de um Moinho de Facas

Guilherme Rodrigo Salgado Santos

Monografia apresentada à Faculdade de
Tecnologia de Pindamonhangaba para
graduação, no Curso Superior de
Tecnologia em Manutenção Industrial.

Área de Concentração: Manutenção
Industrial

Orientador(a): Prof. Geraldo Cesar Novaes
Miranda

Pindamonhangaba - SP

2014

S237m

Santos, Guilherme Rodrigo Salgado.

Manutenção preditiva por análise de vibração: Estudo sobre Análise de Falhas em Rolamentos de um Moinho de Facas / Guilherme Rodrigo Salgado Santos / FATEC Pindamonhangaba, 2014.
55f.: il.; 30 cm.

Orientador : Professor Geraldo Cesar Novaes Miranda
Monografia (Graduação) – FATEC – Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba. 2014

1. Monitoramento. 2. Análise de vibração. 3. Análise de falhas em rolamentos 4. Manutenção preditiva. I. Santos, Guilherme Rodrigo Salgado. II. Miranda, Geraldo Cesar Novaes. III. Título.

CDD 658.5j

Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba

**“MANUTENÇÃO PREDITIVA POR ANÁLISE
DE VIBRAÇÃO: ESTUDO SOBRE ANÁLISE
DE FALHAS EM ROLAMENTOS DE UM
MOINHO DE FACAS”**

GUILHERME RODRIGO SALGADO SANTOS

Monografia apresentada à Faculdade de
Tecnologia de Pindamonhangaba para
graduação, no Curso Superior de Tecnologia em
Manutenção Industrial

Comissão Examinadora

Orientador – Prof. MSC. Geraldo César Novaes Miranda

Membro Interno – Prof. MSC. Amir Rivaroli Júnior

Membro Externo – Tecnólogo Paulo Roberto Melo Júnior

Pindamonhangaba, 04 de Dezembro de 2014.

DEDICATÓRIA

Dedico a minha família, meus pais e irmã e especialmente a minha esposa e filha, que me apoiaram em todos os momentos, bons e ruins, onde me deram força durante meus estudos.

AGRADECIMENTO

Primeira a Deus, que acredito que sempre me manteve em pé nos momentos de dificuldades.

Aos meus pais Wilson e Odete, que contribuíram para que eu pudesse estar indo às aulas, enquanto eu e minha esposa íamos estudar.

A minha filha Thayla que mesmo ficando o dia todo longe dela, me recebia todas as noites sorridente e carinhosa.

Aos professores que formam o corpo docente do curso de Manutenção Industrial, que de alguma forma contribuíram para o meu desenvolvimento pessoal e profissional.

Aos meus colegas que durante esses anos caminharam juntos para concluir esta graduação, em especial ao Nilson e Reginaldo que mesmo quando eu não estava disposto a frequentar algumas aulas me deram força para ficar.

Agradeço especialmente a minha esposa que me deu apoio e me incentivou a iniciar esta graduação, e mesmo em momentos que eu pensei em desistir esteve ao meu lado dando força para que não desistisse.

Guilherme Rodrigo Salgado Santos

SANTOS, G. R. S. **MANUTENÇÃO PREDITIVA POR ANÁLISE DE VIBRAÇÃO: Estudo sobre Análise de Falhas em Rolamentos de um Moinho de Facas**. 2014. Trabalho de Graduação (Curso de Manutenção Industrial). Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba. Pindamonhangaba. 2014.

RESUMO

Este trabalho tem o objetivo de apresentar os princípios básicos da análise de falha dos rolamentos de um moinho de facas, onde trata-se de um equipamento essencial para o processo industrial de reciclagem alumínio.

Os rolamentos são elementos de máquina mais importantes e um dos mais utilizados como meio de ligação entre componentes com movimentos relativos de rotação. Os mesmos estão presentes nos mais diversos tipos de aplicação, rotação, tamanho e ambiente.

Os rolamentos são geralmente construídos de aço combinado com cromo e suas dimensões estão submetidas a um sistema de normalização, os mesmos são compostos por dois anéis separados por uma ou mais fileiras de elementos rolantes, que podem ser esferas ou rolos. Esses elementos rolantes são mantidas equidistantes por meio de uma gaiola a fim de distribuir os esforços e manter os anéis concêntricos. O anel externo (ou como conhecido pista externa) é fixado na peça ou no mancal e o anel interno (pista interna) é fixado diretamente ao eixo.

Para que uma melhor confiabilidade dos rolamentos a manutenção preditiva se propõe, por meio de técnicas de monitoramento, estabelecer diagnósticos, além de parâmetros confiáveis para a avaliação do estado real dos rolamentos do moinho e, com isso, prever um defeito ou falha, ao invés de apenas presumi-lo.

Desta forma, o trabalho utilizou-se dos conceitos e metodologias das técnicas de análise de vibração no monitoramento para diagnosticar possíveis defeitos ou falhas dos rolamentos antes das suas ocorrências.

Palavras-chave: Monitoramento, análise de vibração, análise de falhas em rolamentos, manutenção preditiva.

SANTOS, G. R. S. **MANUTENÇÃO PREDITIVA POR ANÁLISE DE VIBRAÇÃO: Estudo sobre Análise de Falhas em Rolamentos de um Moinho de Facas**. 2014. Trabalho de Graduação (Curso de Manutenção Industrial). Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba. Pindamonhangaba. 2014.

ABSTRACT

This paper aims to present the basic principles of failure analysis of the roller bearings of a knife mill, where it is an essential equipment for the industrial aluminum recycling process. The bearings are the most important machine elements and one of the most used as means of connection between components with relative movements of rotation. They are present in the most diverse types of application, rotation, size and environment.

The bearings are generally constructed of steel combined with chromium and their dimensions are subjected to a normalization system, they are composed of two rings separated by one or more rows of rolling elements, which may be balls or rollers. These rolling elements are kept equidistant by means of a cage in order to distribute the stresses and keep the rings concentric. The outer ring (or as known outer ring) is attached to the part or the bearing and the inner ring (inner ring) is fixed directly to the shaft.

For a better reliability of the bearings, the predictive maintenance is proposed, through monitoring techniques, to establish diagnoses, as well as reliable parameters for the evaluation of the real state of the mill bearings, and with this, to predict a defect or failure, instead of just presuming it.

In this way, the work used the concepts and methodologies of the vibration analysis techniques in the monitoring to diagnose possible defects or failures of the bearings before their occurrences.

Keywords: monitoring, vibration analysis, failure analysis bearings, predictive maintenance.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Diagrama de Ishikawa	18
Figura 2 - Pontos de Coleta de Vibração.	23
Figura 3 - Modelos de coletores de dados de vibração.	23
Figura 4 - Modelos de sensores de vibração.	24
Figura 5 - Representação de um movimento harmônico.	26
Figura 6 - Forma de onda senoidal ou harmônica pura.	26
Figura 7 - Formas de onda senoidal	27
Figura 8 - Representação dos três sinais ocorrendo simultaneamente no tempo.	28
Figura 9 - Representação dos três sinais sobrepostos simultaneamente no tempo.	29
Figura 10 - Representação dos três sinais no domínio da frequência.	29
Figura 11 - Representação da Defasagem dos Parâmetros de Vibração.	32
Figura 12 - Representação de Deslocamento, Velocidade e Aceleração.	33
Figura 13 - Curva de Tendência.	34
Figura 14 - Forma de onda no tempo.	34
Figura 15 - Espectro no domínio da frequência.	35
Figura 16 - Representação da Ressonância no domínio da frequência	36
Figura 17 - Fórmulas para cálculo das frequências de defeitos em rolamentos.	38
Figura 18 - Espectro de vibração – presença de múltiplos altos da BPFI.	39
Figura 19 - Espectro de vibração – progressão do defeito – aparecimento de múltiplas bandas laterais da rotação em torno dos harmônicos da BPFI.	39
Figura 20 - Espectro de vibração- aparecimento da frequência fundamental da BPFI.	40
Figura 21 - Espectro de vibração – aumento do ruído e elevação do piso.	40
Figura 22 - Processo de Obtenção do Envelope (Demodulação).	41
Figura 23 - Procedimento adotado na técnica de Envelope (BEZERRA, 2004).	42
Figura 24 - Mancal do Moinho de Facas	44
Figura 25 - Rolamentos do Moinho de Facas	45
Figura 26 - Conjunto de Facas.	46
Figura 27 - Espectro de Vibração em Velocidade (mm/s).	47
Figura 28 - Faca montada no rotor do moinho.	47
Figura 29 - Espectro Vibração do Rolamento – Falha devido a falta de lubrificação.	48
Figura 30 - Dispositivos de Monitoramento <i>on-line</i>	49
Figura 31 - Supervisório PI Processbook.	49
Figura 32 - Espectro de Vibração - Defeito Devido a Passagem de Corrente Elétrica.	50
Figura 33 - Corrosão Elétrica na Pista Externa do Rolamento.	51
Figura 34 - Espectro de tendência (gE – envelope de aceleração).	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Carta de Severidade de Vibrações - ISO 10816-3	24
Tabela 2 - Grandezas de medição.....	31
Tabela 3 - Catálogo NSK Bearing Doctor - Diagnóstico Rápido de Ocorrências em Rolamentos.	45
Tabela 4 - Limites para Vibração em Rolamentos.....	50
Tabela 5 - Catálogo NSK Bearing Doctor - Diagnóstico Rápido de Ocorrências em Rolamentos.	51

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
1.1. Conceitos de Manutenção	13
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1. Tipos de Manutenção	14
2.1.1. Manutenção Preventiva	14
2.1.2. Manutenção Corretiva.....	15
2.1.3. Manutenção Preditiva	15
2.2. Conceitos Básicos da Análise de Falhas	17
2.2.1. Definição de Falha	17
2.2.2. Objetivos da Abordagem por Análise de Falhas	17
2.2.3. Diagrama de Ishikawa (espinha de peixe)	17
2.3. Monitoramento dos Equipamentos.....	19
2.4. Acompanhamento Preditivo	20
2.4.1. Monitoração Subjetiva	21
2.4.2. Monitoração Objetiva	21
2.4.3. Monitoração Contínua.....	21
2.4.4. Determinação dos Pontos de Medição.....	22
2.4.5. Software para Monitoramento	23
2.5. Análise de Vibração	25
2.5.1. Vibração	25
2.5.2. Princípios da Análise Espectral.....	25
2.5.3. Fundamento do Movimento Harmônico	26
2.5.4. Técnicas de Medições e Parâmetros	31
2.5.4.1. Escolha do Parâmetro de Vibração	32
2.5.5. Sinais Vibratórios	33
2.5.5.1. Ressonância	35
2.6. Técnica de Envelope	36
2.6.1. Defeitos em Rolamentos.....	37
2.6.2. Estágios de Falhas em Rolamentos.....	38
2.6.3. Demodulação de Sinais para a Detecção de Defeitos em Rolamentos (Envelope)	41
2.6.4. Fundamentos da Técnica de Envelope	42
3. ANÁLISE E RESULTADOS	43
3.1. Histórico.....	43

3.2. Sistema de Lubrificação.....	43
3.2.1. Detecção	43
3.2.2. Diagnóstico	44
3.2.3. Origem da Falha	44
3.3. Desbalanceamento do Moinho.....	45
3.3.1. Detecção	45
3.3.2. Diagnóstico	46
3.3.3. Origem da Falha	47
3.4. Sistema de Monitoramento	48
3.4.1. Detecção	48
3.4.2. Diagnóstico	48
3.4.3. Origem da Falha	49
3.5. Considerações	50
4. CONCLUSÕES.....	52
REFERÊNCIAS	54

1. INTRODUÇÃO

Atualmente as indústrias estão atrás de métodos de manutenção que possam garantir com que seus equipamentos tenham melhoras substanciais de confiabilidade, disponibilidade e baixos custos operacionais decorrentes de quebra. Para que isso ocorra é necessário que alguns equipamentos essenciais, tais como bombas, ventiladores, compressores, motores, correias transportadoras, etc., que em sua maioria utilizam mancais de rolamentos, sejam acompanhados regularmente através de um monitoramento periódico.

O monitoramento de uma máquina é capaz de detectar um defeito na sua fase inicial quando não há riscos de quebra, permitindo um melhor planejamento na manutenção do equipamento.

Devido às tecnologias anteriormente utilizadas nos equipamentos de monitoramento as análises eram limitadas em função da rotação, dificultando a análise de rolamentos submetidos a baixas rotações.

Com a evolução das técnicas de análise de vibração tem permitido a detecção dos defeitos em estágios iniciais em toda escala de velocidade, auxiliando a manutenção no planejamento dos reparos e reduzindo os custos devido a uma eventual parada emergencial dos equipamentos.

No estudo de caso a ser apresentado demonstrará que durante um período ocorreram algumas quebras de rolamentos do equipamento, para obter uma melhor confiabilidade e evitar paradas de máquinas inesperadas por motivos de quebra repentinas, a manutenção preditiva através das técnicas de monitoramento em conjunto de ferramentas como a análise de falhas auxiliou nas tomadas de decisão para efetuar mudanças necessárias e assim melhorar a confiabilidade e disponibilidade do equipamento.

1.1. Conceitos de Manutenção

A Associação Brasileira de Normas Técnicas, em uma versão revisada, designada como NBR-5462, define manutenção como a combinação de todas as ações técnicas e administrativas, incluindo as de supervisão, destinadas a manter e recolocar um item em um estado no qual possa desempenhar uma função requerida (ABNT, 1994).

A manutenção é definida como um conjunto de ações que permitem manter ou restabelecer um bem a um estado operacional específico ou, ainda, assegurar um determinado serviço (ARATO JUNIOR, 2004).

De acordo com Kardec (2002), a missão da manutenção é garantir a disponibilidade da função dos equipamentos e instalações de modo a atender a um processo de produção ou de serviço, com confiabilidade, segurança, preservação do meio ambiente e custo adequados.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Tipos de Manutenção

2.1.1. Manutenção Preventiva

Sabe-se que o método de manutenção programada ou preventiva, é uma forma organizada e sistemática de manutenção. Este método consiste em parar grupos de máquinas semelhantes em espaço regular de tempo. Nestas paradas, são trocados todos os componentes sujeitos ao desgaste e falha deste grupo de máquinas. Normalmente, as falhas que ocorrem nesse intervalo de tempo, entre uma intervenção e outra, são corrigidas da forma estabelecida no método de manutenção corretiva, isto é, o conserto é executado de tal modo a manter o fluxo de produção. Os critérios para determinar os intervalos de parada são estabelecidos: de forma estatística; baseada em históricos e/ou recomendações técnicas de fabricantes. Este método traz algumas desvantagens, os índices de falha de máquinas e/ou equipamentos não são reduzidos através da substituição regular de componentes, ao contrário a performance de um dado equipamento pode ser reduzido temporariamente, em função da interferência humana. A máquina parada custa caro (SILVA, 1998).

Segundo Silva (1998) para este tipo de manutenção a determinação do intervalo entre as intervenções deverá observar dois aspectos:

- Intervalo pequeno, as máquinas não quebram, mas o custo de estoques sobressalentes fica enorme;
- Intervalo longo, o risco de falhas imprevistas é eminente e os custos das paradas igualam-se ao método de manutenção corretiva.

No dia a dia de um sistema de manutenção preventiva tem-se observado que durante a substituição dos componentes, geralmente, muitos deles poderiam permanecer em funcionamento por mais tempo, pois estão praticamente novos, mas devido ao padrão pré-estabelecido, para determinados grupos de máquinas, são sumariamente trocados (SILVA, 1998).

2.1.2. Manutenção Corretiva

A manutenção corretiva baseia-se na falha propriamente dita da máquina. A parada ocorre de forma imprevista, porque esse método consiste basicamente em não fazer manutenção. Geralmente, o equipamento é instalado em sua posição de operação, dá-se a partida e opera até que esse não consiga mais produzir de maneira adequada. Quando isto ocorre submete-se este equipamento a alguma intervenção. Muito raramente há preocupação com as condições específicas, por exemplo: a lubrificação ou a inspeção do equipamento. As paradas ocorrem em épocas imprevistas, sem nenhum tipo de programação. Quando a linha de produção para, é porque máquina apresentou alguma falha, normalmente o reparo é feito de forma parcial ou pelo método da tentativa e erro. Ficam evidentes as desvantagens da prática desta manutenção, que infelizmente ainda é comum no terceiro mundo. Os custos deste método de manutenção são catastróficos, pois em muitos casos há perda da produção e da perda matéria-prima que estava no processo de fabricação no momento da falha. Na prática, comprova-se que uma parada executada sem planejamento ou programação, pode custar, no mínimo, três vezes mais que uma parada planejada (SILVA, 1998).

2.1.3. Manutenção Preditiva

Como a manutenção preventiva, a manutenção preditiva tem muitas definições. Para os mecânicos, a manutenção preditiva monitora a vibração da maquinaria rotativa numa tentativa de detectar problemas incipientes e evitar falha catastrófica. Para os eletricitistas, é o monitoramento através de imagens infravermelhas de circuitos, de chaves elétricas, motores, e outros equipamentos elétricos para detectar problemas em desenvolvimento. A premissa comum da manutenção preditiva é que o monitoramento regular da condição mecânica real, o rendimento operacional, e outros indicadores da condição operação das máquinas e sistemas de processo fornecerão os dados necessários para assegurar o intervalo máximo entre os reparos. Ela também minimizaria o número e os custos de paradas não programadas criadas por falhas da máquina (ALMEIDA, 2013).

A manutenção preditiva não substitui totalmente os métodos mais tradicionais de gerência de manutenção. Entretanto, esta filosofia é uma valiosa adição para constituir um abrangente programa de gerência de **manutenção total da planta industrial**. Ao passo que os programas tradicionais de gerência de manutenção se baseiam em serviços de rotina de toda a maquinaria e resposta rápida a falhas inesperadas, um programa de manutenção preditiva programa tarefas específicas de manutenção, somente quando elas forem de fato necessárias. Ela não elimina totalmente todos os aspectos dos programas tradicionais preventivos e corretivos, porém a manutenção preditiva pode reduzir o número

de falhas inesperadas, bem como fornecer uma ferramenta de programação mais confiável para tarefas rotineiras de manutenção preventiva (ALMEIDA, 2013, grifo do autor).

Conforme Almeida (2013), desde que a maioria das fábricas de manufatura e de processo baseia-se em equipamentos mecânicos para a maior parte de seus processos, a manutenção preditiva baseada em vibração é a técnica dominante usada para a maioria dos programas de gerência de manutenção. Entretanto, a capacidade em monitorar todas as máquinas críticas, equipamentos, e sistemas em uma planta industrial típica não pode se limitar a uma única técnica.

O autor ainda afirma que:

“(…) as técnicas de monitoramento preditivas, ou seja, baseadas em condições, incluem: análise de vibração, ultrassom, ferrografia, tribologia, monitoria de processo, inspeção visual, e outras técnicas de análise não destrutivas. A combinação destas técnicas de monitoramento e de análise oferece os meios de monitoramento direto de todos os equipamentos e sistemas críticos em sua fábrica”. (ALMEIDA, 2013).

Ainda segundo Almeida (2013) a manutenção preditiva que utiliza análise da assinatura de vibração é predicada em dois fatos básicos: (1) todos os modos de falha comuns possuem componentes distintos de frequência de vibração que podem ser isolados e identificados, e (2) a amplitude de cada componente distinto de vibração permanecerá constante a menos que haja uma mudança na dinâmica operacional da máquina.

É também importante ressaltar a importância econômica da manutenção no parque industrial. Embora muitas vezes esse aspecto seja negligenciado em empresas menores, é sabido que os custos de manutenção são de extrema importância e muitas vezes determinam o sucesso de todo um empreendimento. Ainda de acordo com Almeida (2013), “os custos de manutenção podem representar entre 15% a 30% do custo dos bens produzidos”. Isso faz com que a importância econômica da gerência de manutenção seja vital para o desempenho financeiro de uma planta fabril. O autor ainda cita que nas indústrias siderúrgicas, de papel e celulose, e outras indústrias pesadas, a manutenção pode representar até 30% dos custos totais de produção.

Por isso é de extrema importância que verifique com dados e fatos que quantifiquem claramente a necessidade e quais os métodos necessários para se realizar a manutenção, e também qual o caminho a ser seguido pela manutenção seja a corretiva, a preventiva ou preditiva, pois os custos envolvidos no mesmo variam.

2.2. Conceitos Básicos da Análise de Falhas

2.2.1. Definição de Falha

Conforme Pinto (2004) falha é toda perda de função ou de performance de um equipamento. A análise RCM (Manutenção Centrada em Confiabilidade) avalia as falhas sob diversos níveis: sistema, subsistemas, dos componentes, e em determinadas situação das peças. O sucesso de uma organização eficiente de manutenção reside em assegurar o desempenho requerido pelo sistema ao menor custo possível. Isto significa que os métodos de manutenção devem estar baseados, sobretudo no claro entendimento das falhas que incidem sobre os diversos níveis do sistema. Ainda segundo Pinto (2004), um modo de falha é definido como sendo toda e qualquer falha que seja inerente a um equipamento ou componente, e que resulte em uma perda funcional sobre um sistema ou um subsistema.

2.2.2. Objetivos da Abordagem por Análise de Falhas

Segundo Pinto (2004) os objetivos principais da metodologia de análise de falhas são:

- Estruturar a planificação das manutenções preventivas, preditivas e pró-ativas de acordo com os modos de falha predominantes em cada equipamento e a análise dos riscos representativos ao sistema.
- Assegurar o controle das causas fundamentais identificadas para cada modo de falha, e minimizar seu impacto sobre o funcionamento do sistema (aumento do tempo médio entre falhas de um equipamento).
- Amparar as análises de confiabilidade e as tomadas de decisões em trabalhos de planejamento da manutenção e eliminação de perdas produtivas.
- Auxiliar as estratégias de formação dos efetivos de manutenção através da observação das necessidades observadas durante as análises das falhas já vivenciadas ou potenciais.

2.2.3. Diagrama de Ishikawa (espinha de peixe)

Para desenvolver este trabalho, foi utilizado o *Brainstorming* como ferramenta para preencher o Diagrama de Ishikawa como forma de aquisição de fatores que possa ser relacionadas à causa raiz.

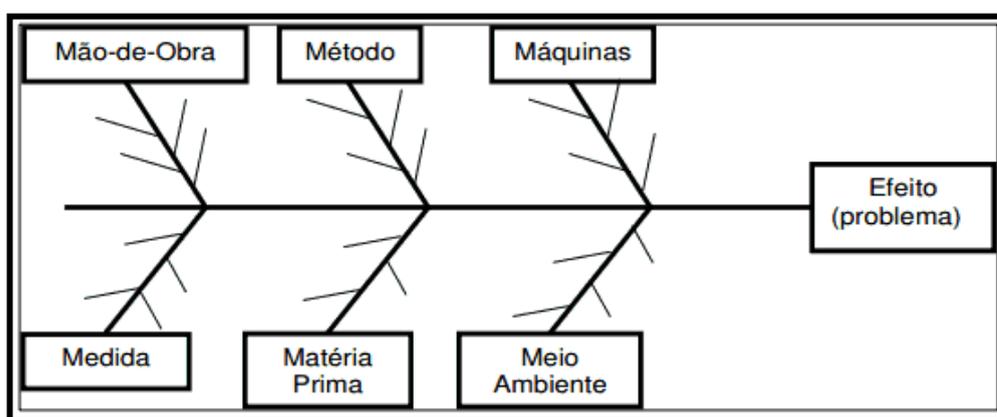
Segundo Brassard (1985), *Brainstorming* é utilizado para auxiliar um grupo a criar tantas ideias conforme elas surgem em suas mentes. Isto tende a criar uma atmosfera

mais relaxada, mas também há o risco de dominação pelos participantes mais extrovertidos. São aceitas as seguintes regras gerais:

- Nunca criticar ideias;
- Escrever num *flip-chart* ou em um quadro todas as ideias. A exposição das ideias a todos ao mesmo tempo evita mau entendimento e serve de estímulo para novas ideias;
- Todos devem concordar com uma questão ou então esta deve ser repensada;
- Reescrever a nova redação;
- Escrever as palavras do participante, sem realizar interpretações;
- Fazer um *Brainstorming* rápido entre 5 a 15 minutos

Para Ramos (2000), o diagrama de Ishikawa é uma figura composta de linhas e símbolos, que representam uma relação significativa sobre um efeito e suas possíveis causas. Este diagrama descreve situações complexas, que seriam muito difíceis de serem descritas e interpretadas somente por palavras. Ainda segundo Ramos (2000), existe provavelmente varias categorias de causas principais. Frequentemente estas recaem sobre um das seguintes categorias: Mão de obra, Máquina, Método, Materiais, Meio Ambiente, conhecidas como 6 Ms, conforme figura abaixo.

Figura 1 - Diagrama de Ishikawa



Fonte: RAMOS, R. W. CEP para processos contínuos e em bateladas, São Paulo, 2000.

A construção do diagrama pode ser feito apenas por uma pessoa, mas em grupo as identificações das causas permite ter uma exploração maior dos diversos aspectos do problema, pois para isso utiliza-se o *Brainstorming* como ferramenta no auxílio da construção do diagrama, onde é necessário desenvolver alguns passos (FILIPPE, 2005):

- Identificar o problema;
- Colocar o problema a investigar
- Conduzir uma sessão com um grupo para formular e classificar todas as causas e fatores que potencialmente influenciam o problema;

- Verificar se identificaram verdadeiras causas e não apenas sintomas;
- Reformular as causas e efeitos identificados de modo a garantir que são variáveis do processo;
- Organizar as variáveis em grupos que as relacionam entre si;
- Colocar as variáveis no diagrama, de acordo com os grupos a que foram atribuídas;
- Rever cada ramo do diagrama, verificando se cada variável pode ser decomposta em sub-causas;
- Apresentar o diagrama a outros grupos, incentivando críticas, complementos e revisões.

Filipe (2005) cita que para que seja construído um diagrama de Ishikawa deve-se questionar quando a causa deve ser dividida em sub-causas ou for considerada como causa “última”. Esta decisão tem que ser tomada de modo que a procura de sub-causas leve a uma resposta suficiente, por alguma razão, seja ela por:

- A causa já foi analisada anteriormente e concluiu-se não ser possível eliminá-la (Ex.: por exigir um investimento muito alto, por políticas da empresa, por legislação, etc).
- A causa é eliminável (Ex.: peça defeituosa facilmente substituível, fornecedor de pouca qualidade para o qual há alternativas, falta de formação dos colaboradores).

2.3. Monitoramento dos Equipamentos

A importância do monitoramento das máquinas e equipamentos é conhecer a sua condição operacional real, podendo ter aumento de confiabilidade, disponibilidade, conseqüentemente alta produtividade, proporcionando lucratividade para a empresa.

Para Davies (1998) monitoramento da condição é uma técnica de administração que usa a avaliação regular da atual condição operacional do equipamento, para otimizar a operação total da planta. Segundo Souza (2002), entende-se por monitoramento de máquinas todo e qualquer processo, onde se possam acompanhar parâmetros indicadores das reais condições da máquina, tais como:

- Monitoramento de vibração
- Monitoramento de espessura
- Monitoramento de temperatura
- Monitoramento das grandezas elétricas
- Monitoramento por análise de óleo

Davies (1998) ainda comenta que, estas técnicas citadas, usadas juntas, ou seja, monitoramento de vibração com ensaios não destrutivos (monitoramento de espessura, temperatura) podem proporcionar aos gestores de manutenção, informações efetivas que os permitirá alcançar disponibilidade e confiabilidade de máquinas e equipamentos da planta.

Souza (2002) comenta que o monitoramento dos equipamentos pode ser realizado de três maneiras:

- Monitoramento periódico portátil *off-line* – Executado com coletor-analisadores portáteis de sinais dinâmicos que podem ser: vibrações, temperatura, etc.. Neste caso é realizado um cadastramento prévio dos dados em *software* específico, estabelecidas às rotas de acompanhamentos e sua periodicidade (semanais, mensais, trimestrais, etc..), conforme o grau de importância da máquina no processo produtivo. As rotas são carregadas no *software* do coletor, então adquirem-se os dados experimentais das máquinas e posteriormente descarrega-se estes dados medidos no *software* de gerenciamento onde estão armazenados todos os gráficos disponíveis para análise das máquinas. Este monitoramento é o mais usual por ter relação custo/benefício muito satisfatório.

- Monitoramento periódico *on-line* – São instalados sensores nas máquinas, cabos e um sistema de gerenciamento. Neste caso o sistema varre periodicamente e de maneira automática cada ponto de medição instalado e vai armazenando parâmetros, traçando curvas de tendências, gerenciando automaticamente o sistema, alertando o usuário sobre a condição de cada ponto.

- Monitoramento *on-line* contínuo – São instalados sensores nas máquinas, cabos e um sistema de gerenciamento com acompanhamento em tempo integral de cada ponto de medição. Importante neste monitoramento é ter sensores de alarmes sonoros e de segurança para proteger a máquina, quando ocorrer um defeito.

Para Xavier (2013) a avaliação do estado do equipamento na manutenção preditiva se dá através da medição, acompanhamento ou monitoramento subjetivo, objetivo e contínuo.

2.4. Acompanhamento Preditivo

Conforme Xavier (2013) a avaliação do estado do equipamento se dá através de medição, acompanhamento ou monitoração de parâmetros. Esse acompanhamento pode se feito de três formas:

- Acompanhamento ou monitoração subjetiva;
- Acompanhamento ou monitoração objetiva;

- Monitoração Contínua.

2.4.1. Monitoração Subjetiva

A monitoração subjetiva é aquela exercida pelo pessoal de Manutenção utilizando os sentidos, ou seja, tato, olfato, audição e visão. Quando um mecânico coloca a palma da mão sobre uma caixa de mancal, pode perceber a temperatura e a vibração. Evidentemente quanto mais experiente, mais confiáveis serão os diagnósticos; no entanto esta monitoração não deve ser adotada como base para decisão por ser extremamente subjetiva (XAVIER, 2013).

2.4.2. Monitoração Objetiva

A monitoração objetiva é o acompanhamento feito através de equipamentos ou instrumentos específicos. É objetiva, pois fornece um valor de medição do parâmetro que está sendo acompanhado e o valor medido independe do operador ou do instrumento, desde que utilizado o mesmo procedimento (Xavier, 2013).

Segundo Spamer (2009) para a utilização de qualquer meio de acompanhamento do estado de equipamentos por meio de instrumentos é fundamental que a pessoa que opera os instrumentos seja treinada e habilitada, os instrumentos estejam aferidos e calibrados e que haja pessoal capaz de interpretar os dados coletados e emitir diagnósticos.

2.4.3. Monitoração Contínua

Monitoração contínua nada mais é do que o acompanhamento *on line* das variáveis através de sensores instalados no equipamento.

A monitoração contínua, que é também um acompanhamento objetivo, foi inicialmente adotada em situações onde o tempo de desenvolvimento do defeito era muito curto e em equipamentos de alta responsabilidade. Isso significa uma excelente proteção, desde que a monitoração contínua venha associada a dispositivos que alarmem e desligue o equipamento, uma vez atingido o valor limite estipulado. (Spamer, 2009).

Spamer (2009) afirma que é possível monitorar variáveis típicas de processo como densidade, vazão e pressão e variáveis mais relacionadas diretamente com os equipamentos, como vibração, temperatura de mancais. Outros aspectos importantes da monitoração contínua são:

- Independe de pessoal;

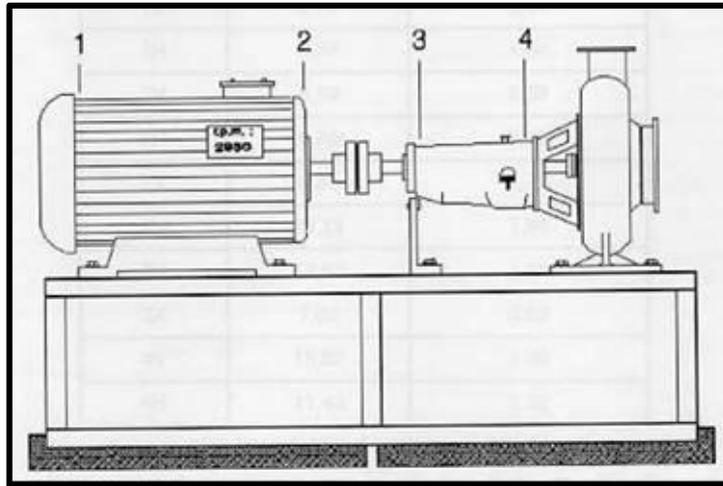
- Pode enviar os dados em tempo real *on line* para as unidades lógicas de processamento ou computadores com programas especialistas;
- Pode ser configurada de acordo com as necessidades, fornecendo redundância onde se exija alta confiabilidade e saídas para acoplamento de instrumentos e processadores visando análise mais profundas;
- Alguns fenômenos, particularmente na área de equipamentos rotativos, somente podem ser detectados pelo acompanhamento permanente de determinadas variáveis;
- Alguns dados só podem ser levantados em situação de parada ou partida das máquinas, por serem muito rápidos ou por ocorrerem em horários e condições que inviabilizam o levantamento manual de dados;
- A existência de sistemas de monitoração é fator de economia em relação a prêmios de seguros e tempo de parada.

Segundo Spamer (2009) para ser feito a monitoração é instalado no local um sensor que pode ser de contato ou não, dependendo do tipo de medição. Esse sensor é ligado a um transdutor que faz a decodificação do sinal para que ele possa ser traduzido em valores no indicador instalado no painel. Os sinais de condição mecânica, elétrica ou de processo transmitidos pelos sensores são levados até os transmissores, que são capazes de realizar cálculos complexos, detecção de alarme e verificação de erros, onde comunica essas condições para um PLC (Controlador Lógico Programável – dispositivo de computador que controla equipamentos em indústrias) ou SDCD (Sistema Digital de Controle Distribuído – este sistema controla e supervisiona o processo produtivo da unidade). O autor ainda cita que em termos práticos a manutenção preditiva deve seguir pelo menos os seguintes requisitos básicos: (1) permitir a coleta de dados com o equipamento em funcionamento, com o mínimo de interferência possível no processo de produção, e (2) permitir a coleta dos dados que possibilitem a análise de tendência.

2.4.4. Determinação dos Pontos de Medição

Para se coletar os dados de vibração em máquinas deve-se ter uma boa definição dos pontos de coleta. Feito isso, devemos coletar os dados sempre no mesmo ponto, garantindo assim que o sinal possa ser sempre referenciado ao sinal tido como assinatura de vibração naquele ponto. Devemos procurar sempre os pontos mais próximos aos rolamentos para obtermos a melhor resposta dos mesmos. Feito isso, coletamos o sinal nas direções radiais (vertical e horizontal) e na direção axial, pois um mancal de rolamento muitas vezes está sujeito à ação de forças cujas resultantes podem ser mais evidentes em sentidos radiais ou axiais (PAIVA, 2000). A Figura 2 mostra os pontos ideais para coletar dados em um conjunto motor bomba:

Figura 2 - Pontos de Coleta de Vibração.



Fonte: PAIVA, O. G., Análise das Vibrações Mecânicas: Iniciação ao Estudo das Vibrações Mecânicas, 2000.

2.4.5. Software para Monitoramento

Encontra-se no mercado vários fabricantes de *softwares*, coletores e analisadores de dados para processamento como demonstrado nas figuras 3 e 4, o monitoramento requer investimentos e treinamentos especializados para capacitar as pessoas a utilizarem estes equipamentos. Quando adquirido deverá estabelecer critérios para o cadastro dos equipamentos a serem monitorados, visando as máquinas que possuem índices de confiabilidade, horas paradas... Enfim dados que venham a contribuir para um bom levantamento do histórico da planta a ser monitorada.

Figura 3 - Modelos de coletores de dados de vibração.



Fonte: SKF, Apostila de Analista de Máquinas II – SKF Reliability Systems , 2004.

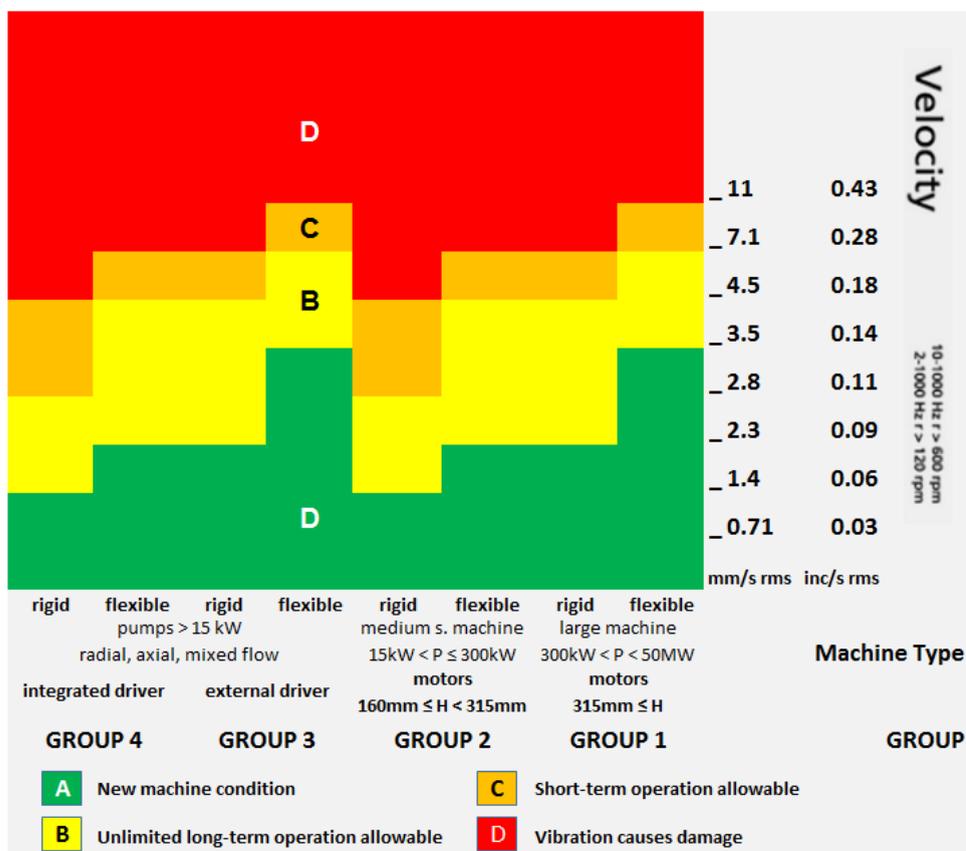
Figura 4 - Modelos de sensores de vibração.



Fonte: SKF, Apostila de Analista de Máquinas II – SKF Reliability Systems , 2004.

Também se deve atentar para as especificações de cada elemento a ser cadastrado assim como os níveis de alarmes a serem definidos, respeitando o histórico de cada equipamento e como referência as cartas de severidade conforme normas, conforme a tabela 1.

Tabela 1 - Carta de Severidade de Vibrações - ISO 10816-3



Fonte: SKF, Apostila de Analista de Máquinas II – SKF Reliability Systems , 2004.

2.5. Análise de Vibração

2.5.1. Vibração

Vibração é definida como qualquer movimento cíclico ou as oscilações de uma máquina, ou de seus componentes, em torno da posição de repouso.

Conforme Rao (2008) pode-se definir como vibração todo movimento que se repete após um intervalo de tempo. O balanço de um pêndulo e o movimento do dedilhar de uma corda é exemplos típicos de vibração. O número de ciclos de movimento em um segundo é chamado de frequência, medido em Hertz (Hz).

A fundamentação desse tipo de análise é baseada na ideia de que cada elemento de uma máquina, excitado pelos esforços dinâmicos provenientes do funcionamento dessa máquina, tem de liberar energia seja por calor, som ou vibração. Quando a forma de liberação dessa energia é a vibração, é possível fazer a leitura desses sinais vibratórios cuja frequência é idêntica aquela dos esforços que os provocam (ARATO JUNIOR, 2004).

2.5.2. Princípios da Análise Espectral

O domínio da frequência é tudo ao redor de nós. Entretanto, algumas vezes nós chamamos frequência por outros nomes. Por exemplo, luz é frequência. A cor vermelha é frequência. Som é frequência. Nós não referimos a estes itens como frequências, nós apenas os chamamos de luz, cor e som. O corpo humano está limitado a um determinado “range” de frequência (Ex.: conseguimos identificar sons entre 20 e 20.000 Hz – para pessoa jovem), indicando desta forma que nós não podemos identificar certos tipos de defeitos em máquinas, ou ainda que estes defeitos em máquinas possam estar mascarados por outros fora de nosso range de detecção. (SILVA, 2008)

Segundo o mesmo autor quando analisamos alguns destes problemas no domínio do tempo, podem-se diagnosticar alguns tipos de defeitos. Entretanto os sinais no domínio do tempo para máquinas rotativas se mostram bastante complexos, por isso, a análise de vibração é necessário dominar diagnósticos no domínio do Tempo e da Frequência para uma análise completa e precisa.

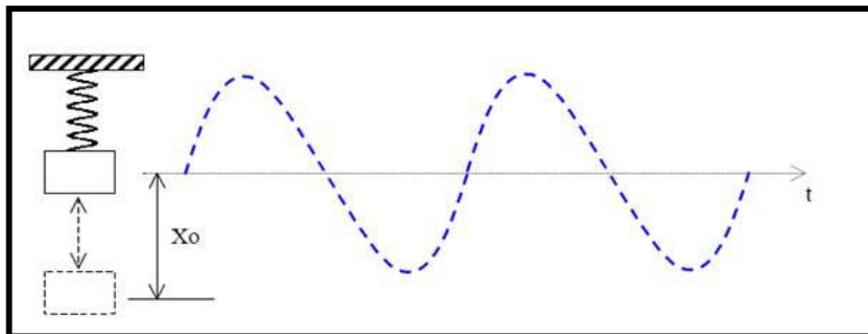
Para mover do domínio do tempo para o domínio da frequência, é necessário aplicar a Transformada de Fourier ao sinal. A sigla FFT é abreviatura da expressão inglesa *Fast Fourier Transform*, que em português quer dizer “Transformada Rápida de Fourier”. O matemático francês Barão Jean-Baptist Joseph Fourier, estabeleceu que qualquer função periódica (incluindo a vibração mecânica) pode ser representada matematicamente como uma série de senos e cossenos. Em outras palavras é possível medir a forma de onda da vibração, sendo ela simples ou complexa, e matematicamente calcular as frequências

presentes nessa forma de onda, com suas respectivas amplitudes. Esse processo é chamado de Transformada de Fourier (SILVA, 2008).

2.5.3. Fundamento do Movimento Harmônico

Paiva (2000) definiu que a forma mais simples de movimento periódico é o movimento harmônico. Para exemplificá-lo, consideremos a figura 5 abaixo: Uma massa suspensa por uma mola, e então deslocada de sua posição de equilíbrio, irá oscilar em torno desse equilíbrio com um movimento harmônico simples. Se construirmos um gráfico que relaciona a distância da massa à posição de equilíbrio e ao tempo, a curva obtida será uma senóide, a representação de um movimento harmônico por excelência.

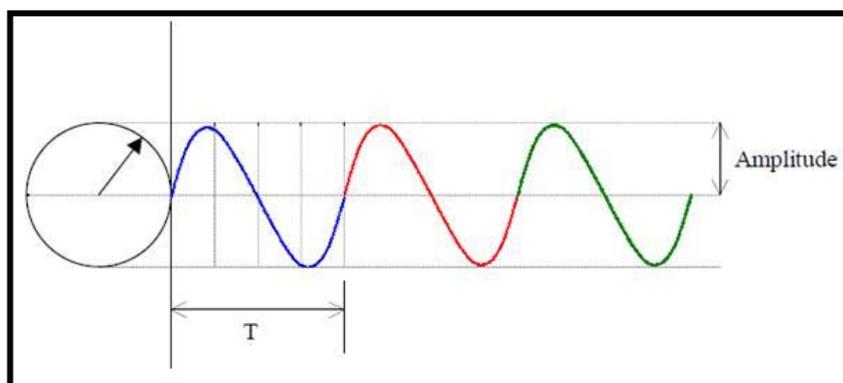
Figura 5 - Representação de um movimento harmônico.



Fonte: PAIVA, O. G., Análise das Vibrações Mecânicas: Iniciação ao Estudo das Vibrações Mecânicas, 2000.

Com isso, estudos mais profundos no campo das variações ondulatórias causadas por vibrações mostram que qualquer forma de onda no tempo pode ser decomposta em uma série de senóides puras. Os sinais harmônicos representam perfeitamente a maioria dos sinais de uma máquina. Assim sendo uma componente de vibração é essencialmente um movimento harmônico, uma senóide como mostrado na figura 6:

Figura 6 - Forma de onda senoidal ou harmônica pura.

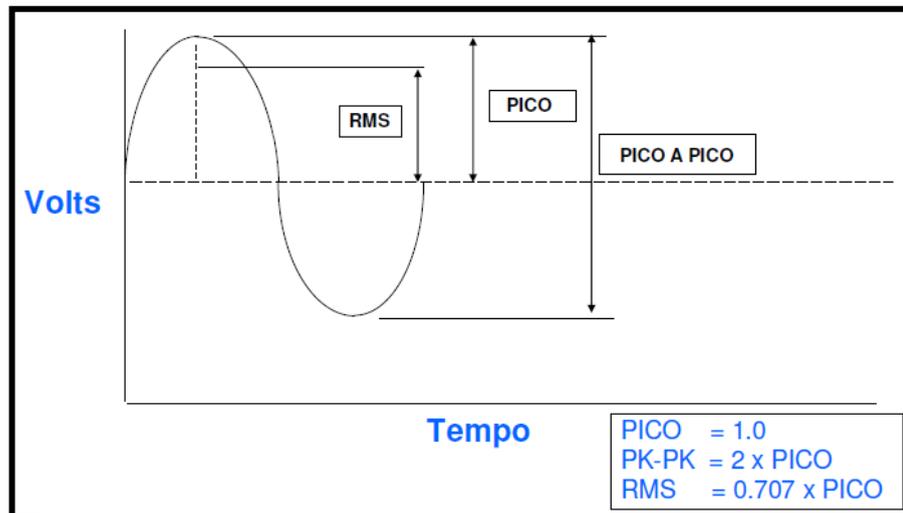


Fonte: PAIVA, O. G., Análise das Vibrações Mecânicas: Iniciação ao Estudo das Vibrações Mecânicas, 2000.

As principais características fundamentais da vibração são:

Amplitude: O valor medido do nível zero até o pico do sinal. A amplitude de vibração pode ser expressa de várias formas: como raiz média quadrática (RMS), pico (p), e pico-a-pico (p-p), conforme figura 7.

Figura 7 - Formas de onda senoidal



Fonte: PAIVA, O. G., Análise das Vibrações Mecânicas: Iniciação ao Estudo das Vibrações Mecânicas, 2000.

A amplitude pico-a-pico é medida na forma de onda de tempo a partir dos picos adjacentes positivos e negativos. Para uma forma de onda harmônica (senoidal) simples como aquela mostrada na figura 6, estes valores podem ser expressos em termos de RMS ou pico, onde RMS é igual a 0,707 de pico e o pico-a-pico é duas vezes o pico (ALMEIDA, 2012).

Segundo Spamer (2009), o valor de Pico é utilizado para identificar choques de curta duração, porém indica somente a ocorrência do pico e não leva em consideração o histórico no tempo da onda. Já o Pico a Pico indica o percurso total da onda, onde é utilizado para identificar falhas seja no início e ou final de estágio, não levando em consideração o histórico no tempo da onda. Enquanto o valor RMS (*Root Mean Square*) é a medida de nível mais relevante, por levar em consideração o histórico da onda no tempo e registrar a severidade da energia contida no sinal, ou seja, a capacidade destrutiva da vibração.

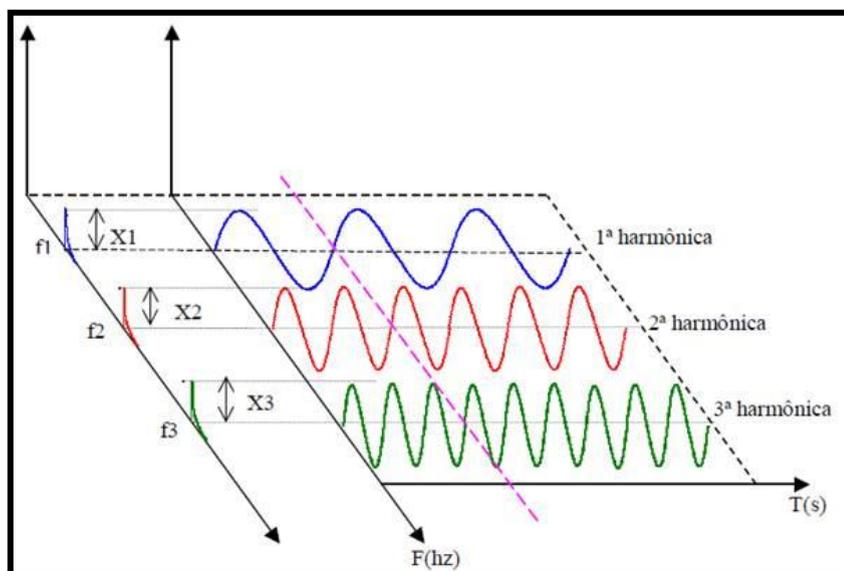
Frequência: Número de vezes que o ciclo se repete por unidade de tempo, expressa em Hertz (quando ciclos por segundo).

Período: Tempo de execução de um ciclo completo do sinal, dado em segundos. É o inverso da frequência.

Defasagem: Indica o avanço ou atraso de um sinal em relação a outro sinal qualquer. Geralmente é expresso em graus. A resposta de uma máquina é sempre atrasada em relação à excitação.

Segundo Paiva (2000) normalmente um equipamento em funcionamento está sujeitas a vibrações que ocorrem nas mais diversas frequências, oriundas da própria rotação do equipamento, de seus elementos de máquina, ou mesmo de fontes externas. Como todos estes sinais ocorrem simultaneamente, torna-se muito difícil avaliá-los no tempo, pois teríamos diversas frequências e amplitudes sobrepostas. No entanto, se avaliarmos estes sinais no domínio da frequência, teremos a separação exata de cada sinal, podendo assim conhecer e avaliar separadamente a consequência de cada um no comportamento do equipamento. O sinal assim obtido é chamado espectro de frequência.

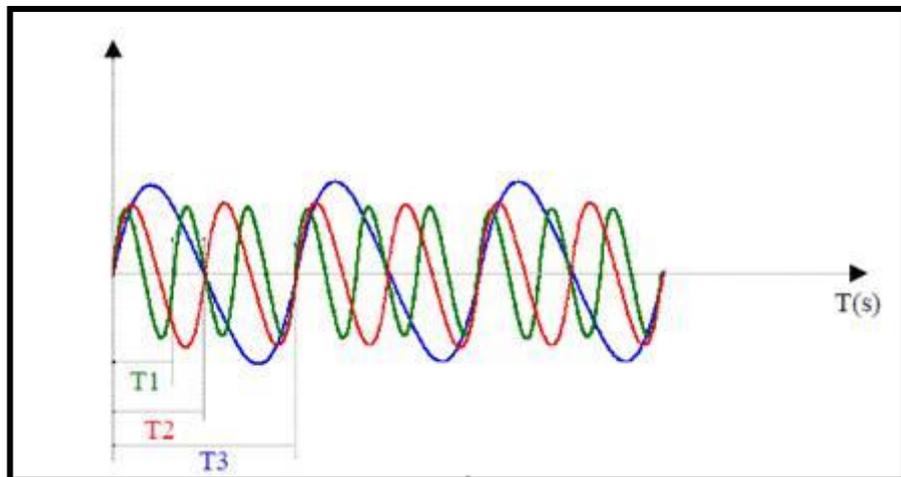
Figura 8 - Representação dos três sinais ocorrendo simultaneamente no tempo.



Fonte: PAIVA, O. G., Análise das Vibrações Mecânicas: Iniciação ao Estudo das Vibrações Mecânicas, 2000.

Observe a figura 8 que no mesmo intervalo de tempo tomado, o primeiro sinal se repete 3 vezes, o segundo 6 vezes e o terceiro 9 vezes. Observe que a linha rocha que cruza o eixo de tempo assinala um período da forma de onda azul, que corresponde a dois períodos da forma de onda vermelha, que corresponde a três períodos da forma de onda verde. Concluímos assim que estes três sinais são harmônicos entre si, sendo que dois ocorrem em frequências múltiplas do primeiro. Assim sendo, se a frequência do primeiro sinal fosse 20 Hz, o segundo estaria ocorrendo em 40 Hz e o terceiro em 60 Hz, simultaneamente. O sinal de 20 Hz seria a componente de primeira ordem ou fundamental, os sinais em 40 e 60 Hz corresponderiam às componentes de segunda e terceira ordem, ou seja, a segunda e terceira harmônicas. Estes sinais vistos em um eixo cartesiano estariam sobrepostos, conforme figura 9.

Figura 9 - Representação dos três sinais sobrepostos simultaneamente no tempo.



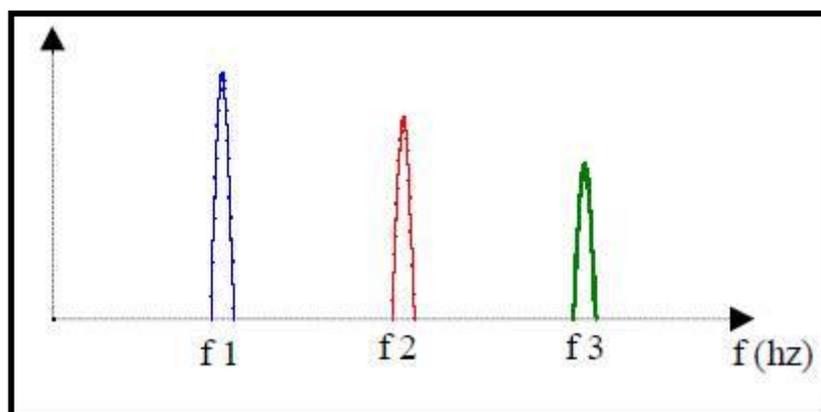
Fonte: PAIVA, O. G., Análise das Vibrações Mecânicas: Iniciação ao Estudo das Vibrações Mecânicas, 2000.

Pode-se ver claramente como as três formas de onda têm períodos diferentes e, conseqüentemente frequências diferentes. A de menor período é a de maior frequência, pois se repete mais vezes em um mesmo intervalo de tempo.

$$T1 = 1/3 T3 \text{ e } f1 = 3f3.$$

No domínio da frequência estas três formas de onda seriam representadas como na figura 10:

Figura 10 - Representação dos três sinais no domínio da frequência.



Fonte: PAIVA, O. G., Análise das Vibrações Mecânicas: Iniciação ao Estudo das Vibrações Mecânicas, 2000.

Sinais harmônicos entre si são muito comuns no campo das vibrações mecânicas, por isso é de extrema importância que saibamos identificar os sinais presentes em uma máquina e estabelecer as relações entre os mesmos. Em outras palavras, é necessário saber se um determinado sinal acontece na frequência fundamental de um evento ou se é a conseqüência harmônica de outro sinal qualquer.

Ainda segundo Paiva (2000), o movimento vibratório de uma máquina é o resultado das forças dinâmicas que a excitam. Essa vibração se propaga por todas as partes da

máquina, bem como para as estruturas interligadas a ela. Geralmente uma máquina vibra em várias frequências e com amplitudes correspondentes. Os efeitos de uma vibração severa são o desgaste e a fadiga, que certamente são responsáveis por quebras definitivas dos equipamentos.

Então quando uma máquina apresenta algum nível de ruído ou de vibração durante sua operação, estas vibrações na maioria das vezes são devido a pequenos defeitos mecânicos ou excitação secundária. Quando o nível/amplitude de vibração tende a aumentar deve-se verificar qual é origem da vibração, para que seja feita uma intervenção na máquina antes que aja uma quebra inesperada do equipamento ou de seus componentes.

As forças geradas dentro de uma máquina podem causar vários tipos de vibrações, dentre os problemas mais comuns que causam a vibração em uma máquina estão:

- Desalinhamento em acoplamento, mancais e engrenagens;
- Desbalanceamento de massa em componentes rotativos;
- Excentricidade ou empenamento de eixo;
- Desgaste de rolamentos;
- Problemas de fluxo hidráulico ou aerodinâmico;
- Defeito em motores elétricos;
- Ressonância;
- Desgaste ou folgas e engrenagens;
- Folgas mecânicas entre componentes;
- Dentre outras.

Quanto aos efeitos das vibrações, temos como consequências:

- Altos riscos de acidentes.
- Desgaste prematuro de componentes.
- Quebras inesperadas.
- Aumento dos custos de manutenção.
- Perda de energia.
- Fadiga estrutural.
- Desconexão de partes.
- Baixa qualidade dos produtos.
- Ambiente de trabalho inadequado.

De acordo com Paiva (2000), todo fenômeno vibratório pode ser controlado por três tipos de procedimentos diferenciados.

- **Eliminação das fontes:** balanceamento, alinhamento, substituição de peças defeituosas, aperto de bases soltas, etc..

- **Isolamento das partes:** colocação de um meio elástico/amortecedor de modo a reduzir a transmissão da vibração a níveis toleráveis.
- **Atenuação da resposta:** alteração da estrutura (reforços, massas auxiliares, mudança de frequência natural, etc.).

2.5.4. Técnicas de Medições e Parâmetros

As grandezas de medições de vibração são: Deslocamento, Velocidade, Envelope e Aceleração. Essas grandezas são referentes cada uma ao seu tipo de técnica, pois cada uma tem um comportamento característico em função da frequência. Como mostra tabela 2.

Tabela 2 - Grandezas de medição.

Unidade	Métricas	Inglesa
Deslocamento	[μm]	[mils]
Velocidade	[mm/s]	[in/s]
Envelope	[gE]	[gE]
Aceleração	[g]	[g]

Fonte: SKF, Apostila de Analista de Máquinas II – SKF Reliability Systems , 2004.

Deslocamento é a medida de quão longe o objeto se move de um pico a outro da onda, em relação a uma referência. Sua unidade é mensurada em “mícron”, no sistema métrico. Deslocamento é relacionado à frequência. Ex.: 3mm a 1200 RPM é equivalente a 5mm/s de velocidade. Entretanto 3mm a 3600 RPM é equivalente a 15mm/s de velocidade.

Segundo Silva (2008), o deslocamento realça componentes de baixa frequência, sendo geralmente utilizado como indicação de desbalanceamento em partes de máquinas rotativas, em função de amplitude de vibração ocorrer na frequência de rotação do rotor desbalanceado.

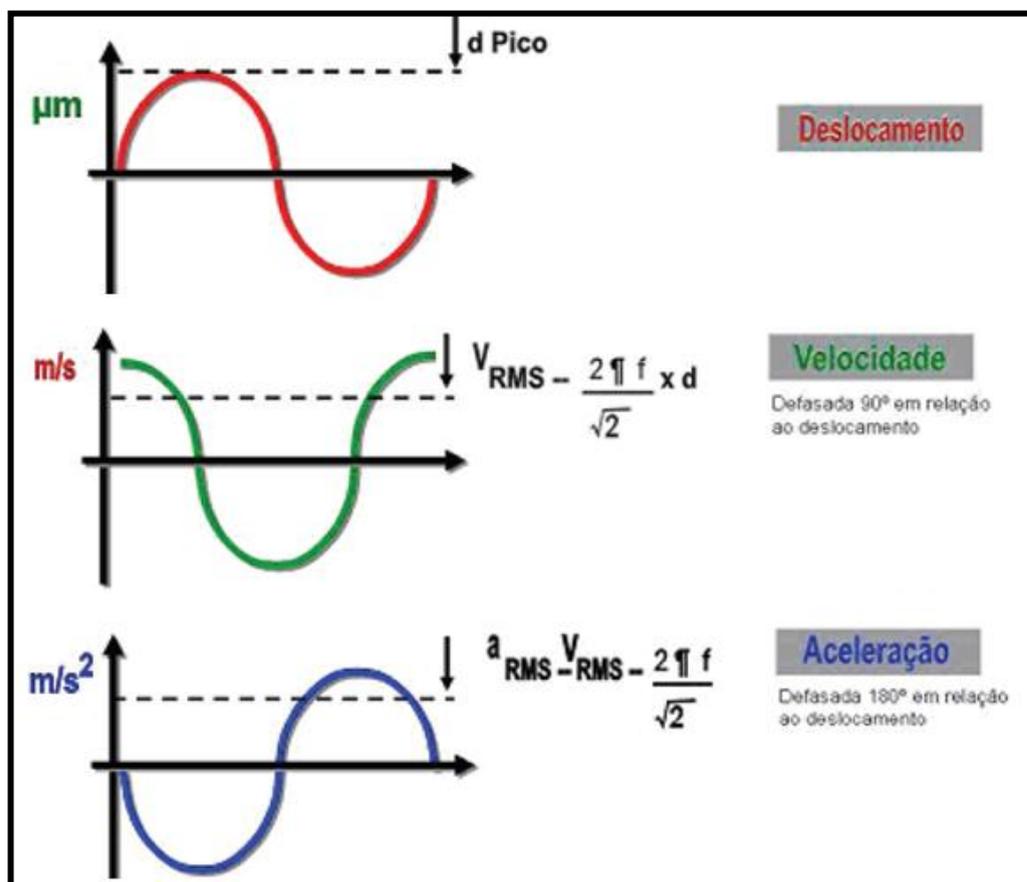
Para máquinas com rotação média, é recomendável utilizar medições de velocidade de vibração RMS, detectando falhas que se identificam nas frequências próximas da frequência de rotação. Como referência para valores coletados em velocidade (RMS), temos algumas normas para classificação e comparação para avaliação, devendo permanecer dentro de faixas admissíveis, o que gera parâmetros para solicitar uma manutenção, classificando as máquinas de acordo com suas características e vibrações.

Componentes de alta frequência são bem representados com o uso de aceleração como grandeza de medição, sendo recomendada sua aplicação em engrenamento e rolamentos. Falhas que apresentam através de impactos são identificadas a através do

envelope, aplicando filtros que detectam eventos de impactos repetitivos. A velocidade de vibração é influenciada por ruídos de baixa ou alta frequência, sendo geralmente escolhido para avaliação da severidade da vibração.

Qualquer que seja o parâmetro considerado, deslocamento, velocidade ou aceleração, a forma e o período de vibração permanecem similares. A divergência principal é que existe uma diferença de fase entre os três parâmetros.

Figura 11 - Representação da Defasagem dos Parâmetros de Vibração.



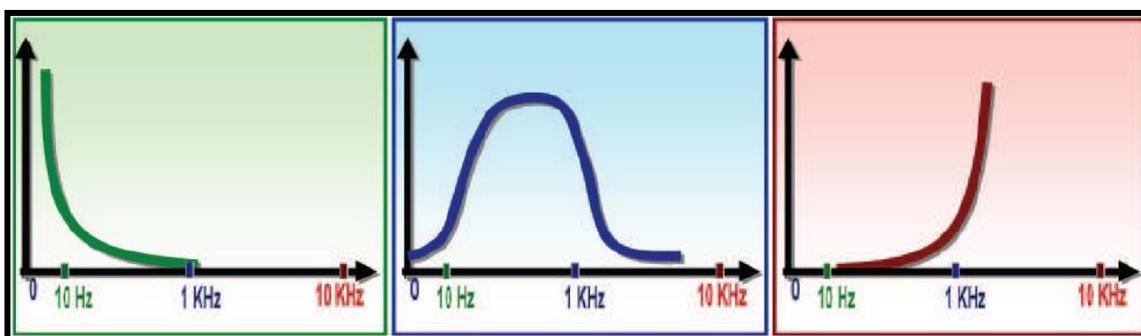
Fonte: SILVA, J. A., “Aplicação da Manutenção Preditiva por Análise de Vibrações – Estudo de Caso”, 2008.

2.5.4.1. Escolha do Parâmetro de Vibração

Os sensores de vibração utilizados para a medição de vibração é o que faz a conversão da vibração mecânica para um sinal elétrico, onde depois o analista possa interpretá-lo através de equipamentos e softwares de análise de vibração.

Os coletores de dados podem medir qualquer um dos parâmetros de vibração, onde através de integradores eletrônicos faz a conversão do sinal medido pelo sensor para o parâmetro que o analista queira analisar. Cada parâmetro tem um comportamento característico em função da frequência, conforme Figura 12.

Figura 12 - Representação de Deslocamento, Velocidade e Aceleração.



Fonte: SPAMER, F. R., “Técnicas Preditivas de Manutenção de Máquinas Rotativas”, 2009.

Conforme Spamer (2009), o deslocamento evidencia as energias de vibração que ocorrem em baixa frequência (até 10 Hz, ou seja, 600 RPM). O deslocamento é utilizado para identificação de desbalanceamento em partes de máquinas rotativas com amplitudes elevadas na frequência de rotação de um eixo.

A velocidade de vibração é o parâmetro menos influenciado por ruídos de baixa ou alta frequência, se mostrando num espectro a mais aplainada das curvas, sendo por isso, o parâmetro normalmente escolhido para avaliação da severidade de vibração entre 10 Hz e 1000 Hz dos seguintes problemas: Falta de rigidez mecânica, desbalanceamento, desalinhamento paralelo e angular, empenamento, folgas, desgastes em acoplamento, passagem de pás, etc.

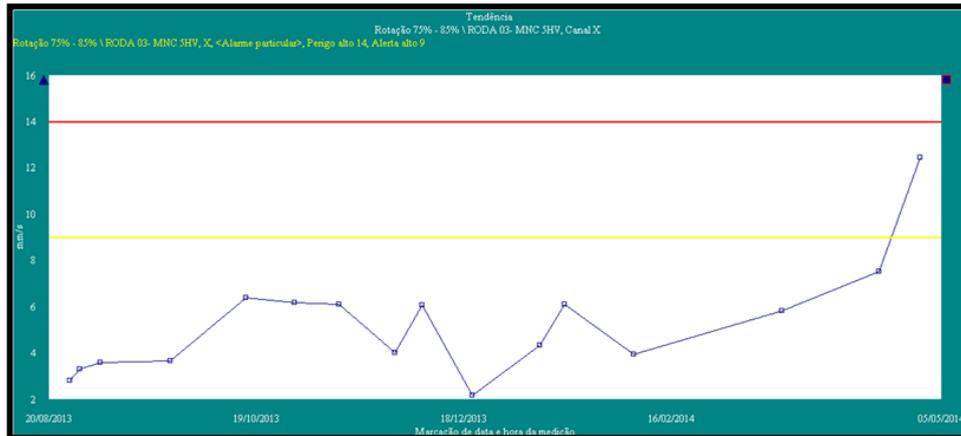
A aceleração de vibração é o parâmetro que representa melhor os componentes de alta frequência, ou seja é a rapidez que a velocidade de um corpo varia. Sua aplicação é recomendada na monitoração de frequências entre 1000 Hz e 10.000 Hz para identificar os seguintes problemas: Engrenamento, falhas em rolamentos, cavitação e frequências de ranhuras em motores elétricos.

2.5.5. Sinais Vibratórios

A vibração existe devido a efeitos dinâmicos, tolerâncias de fabricação, folgas, atrito entre partes em contato, folgas desequilibradas em elementos rotativos, ficando em níveis admissíveis enquanto as condições de projeto são mantidas. Como o aumento do nível de vibração está relacionado com alterações ocorridas em um ou mais elementos da máquina, isto tende a influenciar também outros componentes por estarem interligados. Uma pequena vibração pode excitar frequências de ressonância de outras partes estruturais e ser amplificada para um nível maior de vibração, que geralmente será percebido na estrutura e não diretamente na fonte de vibração.

De acordo com a SKF (2004), a curva de tendência é o gráfico que registra os níveis globais registrados ao longo do tempo. Através dessa curva, pode-se extrapolar com resultados obtidos, realizando uma previsão da data de ocorrência de níveis de falha programando-se assim as intervenções com antecedência.

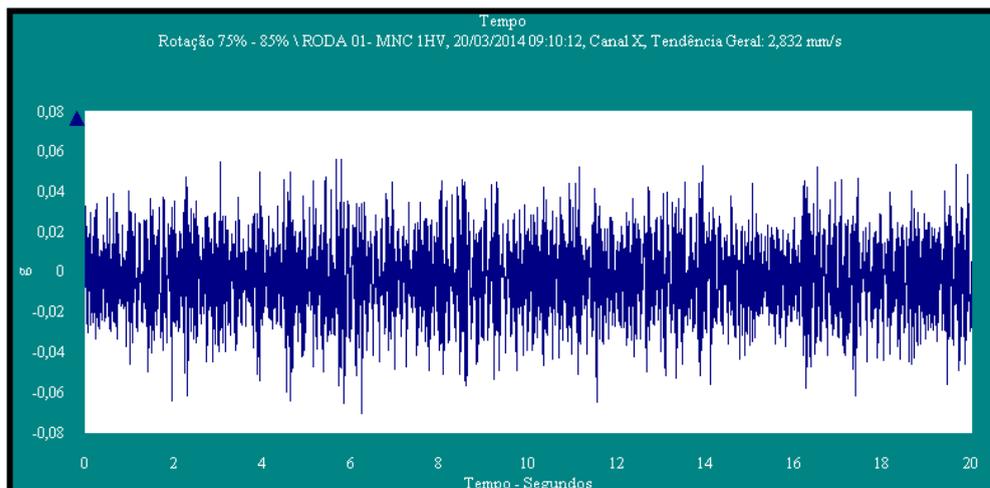
Figura 13 - Curva de Tendência.



Fonte: Software de Análise de Vibração

Segundo Almeida (2012) os sinais de vibrações na prática consistem usualmente de muitas frequências que ocorrem simultaneamente, tanto que nós podemos analisá-las imediatamente pela amostragem amplitude x tempo. Ainda segundo o autor a forma de onda no tempo é um gráfico da amplitude de vibração x tempo. Ela reflete o comportamento físico da máquina no sinal de vibração, além de ser útil na identificação de eventos únicos em uma máquina e a taxa na qual eles são repetidos. A extensão (em segundos) do display de dados da forma de onda no tempo depende da informação procurada, onde ela esta tipicamente relacionada com o período operativo τ da máquina.

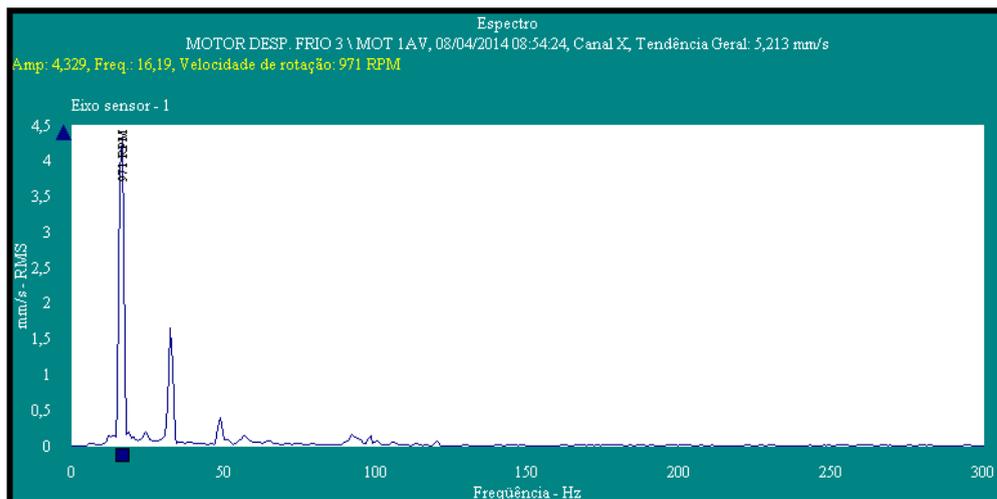
Figura 14 - Forma de onda no tempo.



Fonte: Software de Análise de Vibração

Precisamos determinar as componentes existentes no sinal, e em que frequências eles ocorrem. As componentes são reveladas através de um gráfico no domínio da frequência, onde plota-se a amplitude de vibração x frequência. O gráfico utilizado para apresentar o nível de vibração como função da frequência é chamado de espectro de frequência.

Figura 15 - Espectro no domínio da frequência.



Fonte: Software de Análise de Vibração

Com a decomposição dos sinais de vibração em componentes individuais na frequência, poderá então ser feita a análise de frequência, uma técnica fundamental no diagnóstico de vibrações. Com análise de frequência, fica muito facilitado o trabalho de descobrir quais são as fontes de vibrações indesejáveis.

2.5.5.1. Ressonância

De acordo com Spamer (2009), a ressonância ocorre quando a frequência de excitação coincide com uma das frequências naturais da máquina. E frequência natural é definida como aquela na qual uma determinada massa vibra, após sofrer um deslocamento do seu ponto de equilíbrio.

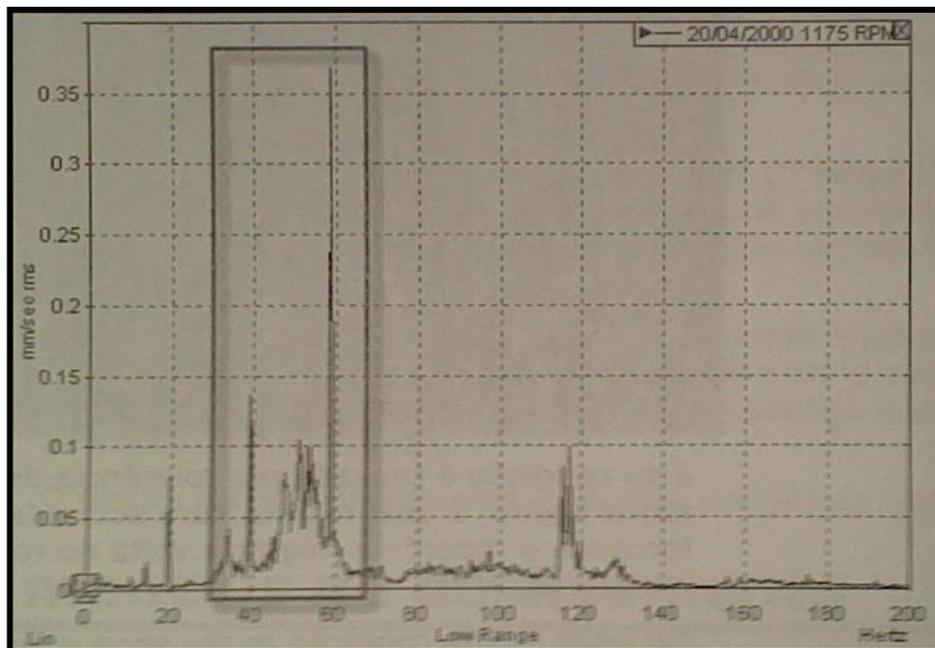
Há varias maneiras de corrigir um problema de ressonância, uma delas é variar a frequência da força excitadora de modo a afastá-la das frequências naturais da estrutura da máquina. Isto pode ser feito variando a rotação (RPM) da máquina. Se a força de excitação não pode ser variada, o problema poderá ser corrigido alterando a frequência natural da estrutura, isto é feito alterando a rigidez ou massa do sistema. Aumentar a quantidade de amortecimento do sistema reduz as amplitudes da vibração, porém não resolve o problema.

Esta ressonância pode ser identificada através de um pico no qual a frequência é constante mesmo que a velocidade seja alterada, este pico poderá ser mais nítido ou mais

largo, dependendo da quantidade de amortecimento efetivo que a estrutura tem a essa frequência específica.

Quando a frequência de ressonância coincide com frequências a 1x e a 2x a rotação, ou até mesmo a frequência de passagem de pás, então os níveis de vibração aumentarão, onde aparecerá como um pico muito elevado em cima de um monte de pequenos picos, como mostra a figura 16 a seguir:

Figura 16 - Representação da Ressonância no domínio da frequência



Fonte: ALMEIDA, M. T. Apostila de Análise de Vibrações I – Princípios de Diagnósticos de Defeitos em Máquinas Rotativas, 2012.

É possível determinar as frequências naturais de uma estrutura por meio de teste de impactos. A ideia do teste é a de que quando um objetivo sofre um impacto, as frequências naturais ou ressonantes são excitadas. Se um espectro é levantado enquanto o objeto está vibrando devido ao impacto, picos espectrais aparecem definindo as frequências naturais do objeto.

2.6. Técnica de Envelope

A demodulação de sinais de alta frequência ou técnica de Envelope é a ferramenta de análise de vibrações para detecção e diagnóstico de falhas em rolamentos é tido como uma das mais poderosas armas na avaliação das condições mecânicas destes elementos. Sua grande vantagem consiste na detecção de defeitos, mesmo incipientes, permitindo o acompanhamento da condição do rolamento mesmo a partir do início da falha (SKF, 2004).

2.6.1. Defeitos em Rolamentos

Falhas em rolamentos podem ser previstas através da análise de vibrações, detectando-se componentes espectrais com frequências características dos defeitos e suas harmônicas e bandas laterais. O prognóstico da falha se baseia não só na intensidade dessas componentes, como também no padrão de distribuição de energia pelas diversas bandas espectrais, o que permite identificar o estágio de degradação do rolamento (PONCI, 2013).

Ainda segundo Ponci (2013), as causas mais comuns de defeitos em rolamentos são: seleção incorreta, sobrecarga, defeito de fabricação, desalinhamento, montagem incorreta, estocagem inadequada, lubrificação inadequada, excessiva ou insuficiente, falha de vedação e descargas elétricas através dos mancais. Geralmente, os defeitos em rolamentos evoluem com certa lentidão e emitem sinais com bastante antecedência da falha final, que pode ocorrer por travamento ou ruptura dos componentes. Defeitos típicos que evoluem dessa forma são: riscos nas pistas, roletes ou esferas, *pitting*, corrosão, erosão e contaminação do lubrificante. O processo de degradação de um rolamento pode se iniciar na pista externa ou interna, num dos elementos rolantes (rolos ou esferas) ou na gaiola, alastrando-se depois para os demais componentes. Esse processo pode ser dividido em três estágios básicos de evolução até a falha final: inicial, intermediário ou avançado.

O autor cita que quando monitorando a falha com frequência adequada, e acompanhando com segurança a localização e a extensão dos defeitos detectados a cada instante é possível evitar-se uma substituição precipitada, logo após a detecção do defeito, podendo-se programar a troca do rolamento na ocasião mais oportuna do ponto de vista da produção e da manutenção.

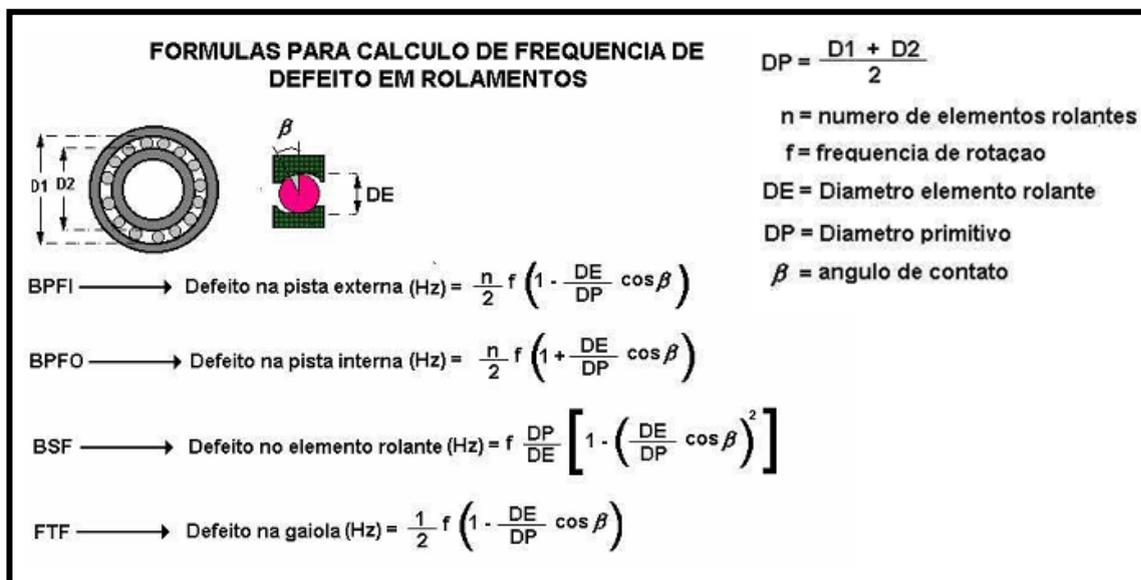
As frequências características de falha de rolamentos possuem uma peculiaridade especial: elas são não síncronas, isto é, não são múltiplas inteiras da velocidade de rotação do eixo. Isso pode permitir a sua identificação, mesmo quando não se conhece qual o rolamento instalado na máquina monitorada. As quatro frequências básicas geradas por defeitos de rolamentos são relacionadas com o comportamento dinâmico de seus principais componentes, ou seja:

- a) Frequência de passagem de elementos rolantes por um ponto da Pista Interna (*BPMI- Ball Pass Frequency Inner Race*), associada a defeitos na pista interna;
- b) Frequência de passagem de elementos rolantes por um ponto da Pista Externa (*BPMO- Ball Pass Frequency Outer Race*), associada a defeitos na pista externa;
- c) Frequência de giro dos elementos (*BSP- Ball Spin Frequency*), associada a defeitos nos elementos rolantes (rolos ou esferas);

- d) Frequência de giro da gaiola ou do conjunto (trem) de elementos rolantes (*FTF-Fundamental Train Frequency*), associada a defeitos nos elementos rolantes (rolos ou esferas).

As expressões utilizadas para o cálculo estão mostradas na figura 17.

Figura 17 - Fórmulas para cálculo das frequências de defeitos em rolamentos.



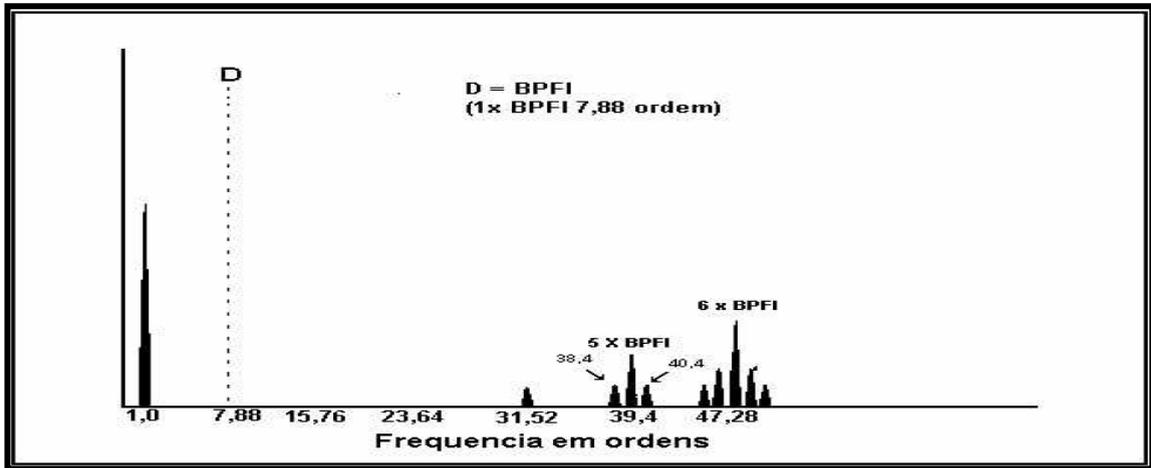
Fonte: PONCI, L. P., Previsão de Falhas de Rolamentos por Análise Espectral e de Envelope. 2013.

É importante ressaltar que, ao contrario da maioria das frequências de vibração geradas por componentes mecânicos, essas frequências são verdadeiramente frequências de defeito. Isto é, elas só estarão presentes nos espectros de vibração quando os rolamentos estiverem realmente defeituosos ou, pelo menos, quando seus componentes estiverem sujeitos a tensões e deformações excessivas que poderão induzir uma falha.

2.6.2. Estágios de Falhas em Rolamentos

Segundo Paiva (2000), os desgastes em rolamentos evoluem em quatro fases: inicialmente os problemas aparecem em frequências ultrassônicas (entre 20 e 60 KHz). Os primeiros sinais de um rolamento defeituoso aparecerão no espectro em altas frequências nos múltiplos das frequências fundamentais de defeito. A razão para estas altas frequências aparecerem primeiro é devido a excitação das frequências naturais dos mancais ou da estrutura, a frequência fundamental (1 X BPFI) não aparece nesta fase. Figura 18.

Figura 18 - Espectro de vibração – presença de múltiplos altos da BPFI.

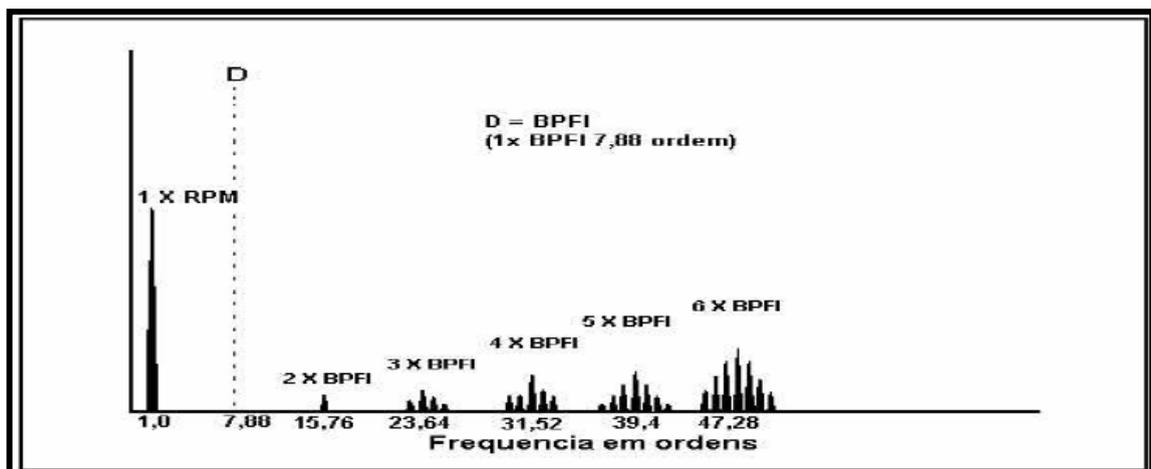


Fonte: PAIVA, O. G., Análise das Vibrações Mecânicas: Iniciação ao Estudo das Vibrações Mecânicas, 2000.

Num segundo estágio pequenos defeitos excitam frequências naturais dos componentes do rolamento (devido aos impactos causados pela passagem das esferas) na faixa de frequência de 500 Hz a 2 kHz.

Com isso, mais harmônicos da frequência de defeito aparecerão no espectro. Continuando a degradação muitas vezes aparecerá a rotação do eixo modulando as frequências de defeito. A amplitude das bandas laterais relativas aos múltiplos da frequência de defeito é importante neste ponto. Amplitude das bandas laterais que excede a amplitude dos múltiplos da frequência de defeito pode indicar um dano significativo. Na medida em que o rolamento degrada, as frequências de defeito que aparecerão no espectro não serão exatamente iguais às calculadas. Isto porque a degradação do rolamento causará mudança da geometria interna do rolamento.

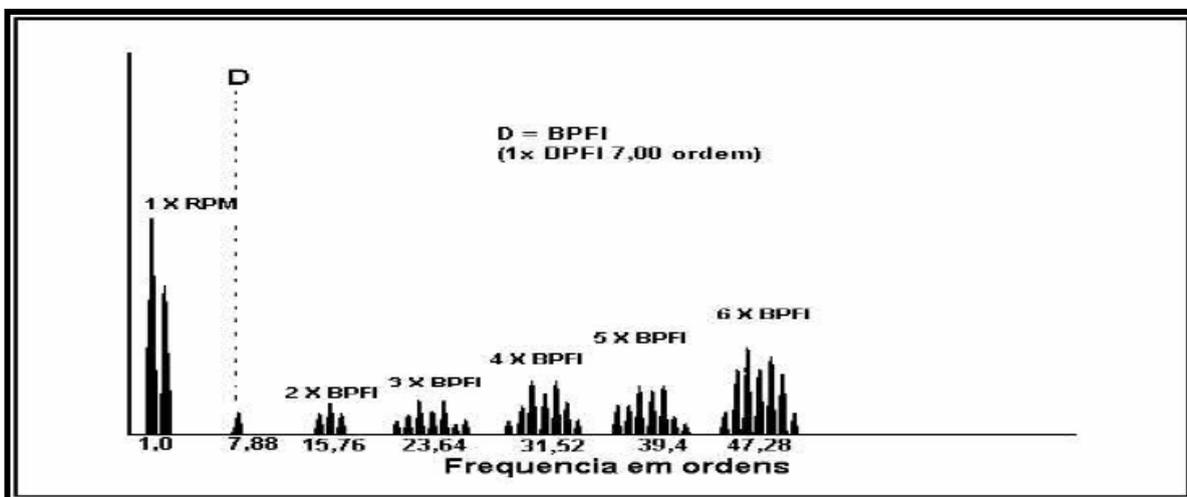
Figura 19 - Espectro de vibração – progressão do defeito – aparecimento de múltiplas bandas laterais da rotação em torno dos harmônicos da BPFI.



Fonte: PAIVA, O. G., Análise das Vibrações Mecânicas: Iniciação ao Estudo das Vibrações Mecânicas, 2000.

Nesta fase pode ser identificada a presença da frequência fundamental de defeito e seus múltiplos e também as bandas laterais. Além disso, bandas laterais da frequência de defeito dos elementos rolantes e da gaiola podem aparecer em torno das frequências de defeito da pista interna ou externa. Esta situação é usualmente encontrada após uma degradação avançada do rolamento. A expectativa de sobrevivência do rolamento dependerá da rotação do eixo e da carga do mancal.

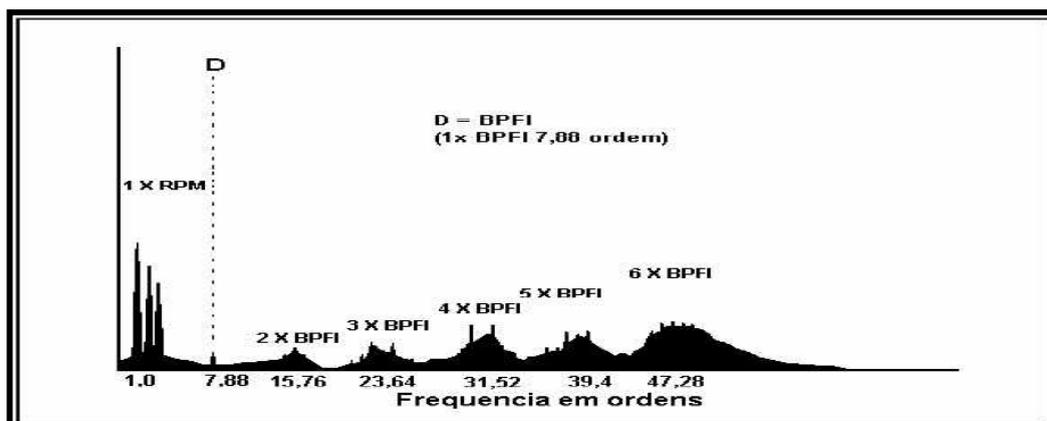
Figura 20 - Espectro de vibração- aparecimento da frequência fundamental da BPFI.



Fonte: PAIVA, O. G., Análise das Vibrações Mecânicas: Iniciação ao Estudo das Vibrações Mecânicas, 2000.

Como o rolamento continua a degradar as folgas internas podem aumentar, acelerando ainda mais a deterioração dos componentes do rolamento. Isto permitirá a ocorrência de mais impactos dentro do rolamento. O aumento dos impactos aparecerá no espectro como uma elevação do piso. Os picos podem ser vistos diminuindo em amplitude e tornando menos distintos quando o piso aumenta. A falha é eminente neste ponto. É importante entender que cada rolamento pode desenvolver modos de falha diferentes.

Figura 21 - Espectro de vibração – aumento do ruído e elevação do piso.

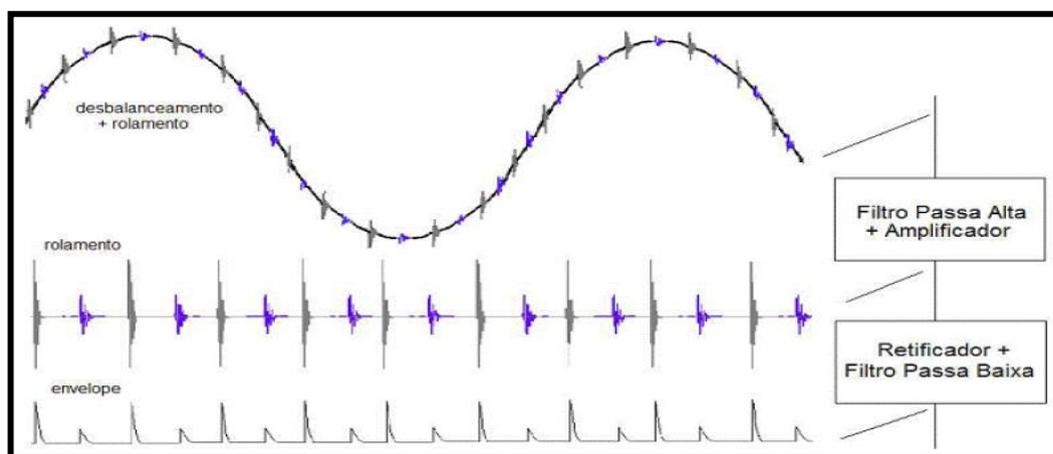


Fonte: PAIVA, O. G., Análise das Vibrações Mecânicas: Iniciação ao Estudo das Vibrações Mecânicas, 2000.

2.6.3. Demodulação de Sinais para a Detecção de Defeitos em Rolamentos (Envelope)

As vibrações livres de alta frequência geradas pelos defeitos de rolamentos possuem intensidade bastante reduzida em comparação com as amplitudes das componentes de baixa frequência, relacionadas com defeitos de alta energia como: desbalanceamento, desalinhamento, folgas, etc. (PONCI, 2013), assim como mostra a figura 22.

Figura 22 - Processo de Obtenção do Envelope (Demodulação).



Fonte: PONCI, L. P., Previsão de Falhas de Rolamentos por Análise Espectral e de Envelope. 2013.

Segundo Ponci (2013), a grande vantagem do processo de demodulação é eliminar essas componentes de alta energia, permitindo detectar com maior precisão e antecedência só os defeitos de rolamentos. Além disso, as análises dos espectros de envelope permitem determinar as taxas de repetição dos impactos que geram as ondas de tensão, identificando a sua origem, ou seja, os componentes defeituosos do rolamento. Este processo de demodulação é geralmente realizado por um circuito analógico composto por:

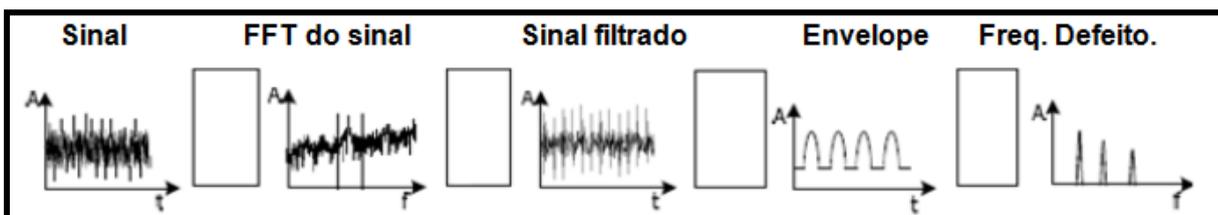
- Um filtro passa - alta (denominado pré-filtro), cuja função é remover as componentes de grande amplitude que dificultam a detecção das componentes moduladas de baixas amplitudes.
- Um retificador e um filtro passa-baixa, que extraem a envoltória das vibrações livres de alta frequência. Esse processo é ilustrado na Figura 22.

Resumindo, as frequências presentes no sinal demodulado correspondem às taxas de repetição dos impactos que geram as vibrações livres de curta duração e alta frequência. Essas taxas de repetição são as frequências básicas dos defeitos do rolamento. O valor de pico da sequencia de transitório presente na forma de onda demodulada (o envelope) é uma medida da severidade dos impactos gerados pelo defeito.

2.6.4. Fundamentos da Técnica de Envelope

A técnica de envelope é composta de um conjunto de procedimentos aplicados ao sinal.

Figura 23 - Procedimento adotado na técnica de Envelope (BEZERRA, 2004).



Fonte: MITCHELL, J. S., "Machinery Analysis and Monitoring", Oklahoma: Penn Well Books, U.S.A., 1993.

A transformada de Fourier do sinal de aceleração é o primeiro passo a ser tomado quando vai se usar a técnica de envelope. Após aplicação, o sinal obtido é analisado com o objetivo de se definir a faixa de filtragem. O que se busca, nesta etapa, é localizar uma faixa de frequências onde houve elevação, em relação às medidas anteriores de picos de frequência. Esta elevação ocorre devido à excitação de frequências naturais características do rolamento ou estrutura, devido à falha no rolamento. Em muitos casos, quando não há dados anteriores ou quando a quantidade de energia do sinal de falha é pequena, há certa dificuldade em localizar esta faixa. Uma alternativa é usar um filtro com uma banda de filtragem maior (MITCHELL, 1993).

A segunda etapa é aplicação ao sinal de um filtro passa banda, cujo objetivo é eliminar baixas frequências de alta amplitude, que em geral, estão relacionadas ao desalinhamento e ao desbalanceamento. Nesta primeira etapa, um dos problemas encontrados é a definição do tamanho da banda do filtro, pois alguns especialistas aconselham que a banda de corte tenha que estar em torno de uma região em que ocorreu excitação de frequências naturais características excitadas devido à falha. Muitas vezes, a definição desta faixa é difícil, principalmente, se a falha for incipiente que tem grau de energia baixo. Desta forma não haverá uma elevação, considerável, na região de excitação de frequências naturais. Por outro lado, outros especialistas aconselham que região de filtragem possa ter uma banda maior desde que a frequência inicial do filtro seja no mínimo dez vezes a frequência de rotação da pista girante (MITCHELL, 1993).

Pode-se observar que, se não há um conhecimento prévio das frequências de ressonância do rolamento ou estruturas, que serão excitadas pelo defeito, a escolha das bandas de filtragem passa a ser um método de tentativa e erro (BEZERRA, 2004). A aplicação da transformada de Hilbert é um processo de demodulação. O seu objetivo é a obtenção do envelope do sinal de defeito, que é um sinal de baixa frequência. Portanto,

para cada tipo de defeito, o envelope traz informações características deste defeito (BEZERRA, 2004).

Aplicação da Transformada de Fourier ao Envelope é a última etapa do método de envelope. Após a aplicação da transformada de Fourier ao envelope do sinal, são obtidas as frequências dos defeitos. Se a frequência obtida é f_1 e tem como bandas laterais $2x f_1$, $3x f_1$,... pode-se concluir que a falha ocorreu na pista parada em relação à região de carregamento. Caso a frequência principal obtida seja f_1 e as bandas laterais estejam espaçadas com valores de frequências igual à frequência de rotação, pode-se concluir que a falha está na pista girante em relação à região de carregamento. Se por outro lado à frequência principal tem como bandas laterais frequências com valores iguais à frequência da gaiola, pode-se concluir que o defeito é na esfera (MCFADDEN, 1984).

3. ANÁLISE E RESULTADOS

3.1. Histórico

Durante os últimos anos com o aumento da produção, o Moinho de Facas passou a apresentar desvios nos rolamentos, onde foram trocados cinco rolamentos, sendo dois rolamentos do lado do acoplamento e os outros três rolamentos do lado opostos acoplamento.

Com o objetivo de eliminar as prováveis causas de defeitos, a equipe de preditiva junto com o engenheiro e os técnicos da área de manutenção, reuniu-se para que fosse feita uma análise de falhas dos últimos casos ocorridos no moinho, visando criar um plano de ação para melhorar a confiabilidade e disponibilidade do equipamento.

Utilizando dos dados levantados na análise de falhas do equipamento, identificou-se os principais causadores da degradação prematura dos rolamentos: O sistema de lubrificação, o Desbalanceamento do conjunto e o método utilizado para monitorar os rolamentos, para os quais foram criados ações.

3.2. Sistema de Lubrificação

3.2.1. Detecção

Analisando o sistema de lubrificação foi constatado que o mesmo não estava sendo eficiente, pois por se tratar de um sistema feito através da circulação do óleo o mesmo apresentava algumas anomalias como:

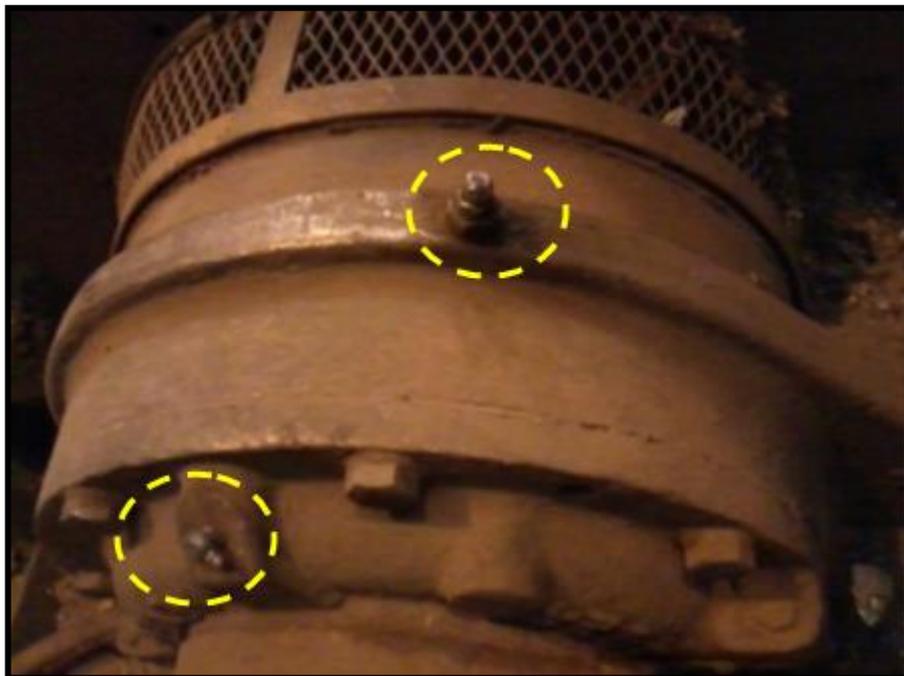
- Aumento de contaminantes e particulados no óleo;
- Vazamento de óleo pelo retentor dos mancais;

- Vazamento de óleo pela tubulação;
- Falha nos sensores de fluxo de óleo;
- Falha e desgaste dos componentes da bomba de lubrificação.

3.2.2. Diagnóstico

Depois de detectado os principais problemas foram alterados o método de lubrificação e o lubrificante dos rolamentos. Onde através de estudos foi substituído o óleo ISO VG 68 e especificada uma graxa especial à base de sulfonato de cálcio para os rolamentos que trabalham com altas cargas, temperaturas elevadas e evita contaminação externa, com isso, a lubrificação passou a ser feita manualmente com uma engraxadeira quando necessário.

Figura 24 - Mancal do Moinho de Facas



Fonte: Fotografia do mancal demonstrando os pontos de lubrificação que passou a ser feito manualmente.

3.2.3. Origem da Falha

Pelas imagens pode-se observar que com a falha no sistema de lubrificação dos mancais do moinho, ocorreu um superaquecimento do rolamento e que ocasionou o travamento do mesmo.

Figura 25 - Rolamentos do Moinho de Facas



Fonte: Imagens dos rolamentos danificados devido à falha do sistema de lubrificação.

A tabela 3 indica quais são as ocorrências, possíveis causas e quais ações quando ocorre falhas dos rolamentos por superaquecimento.

Tabela 3 - Catálogo NSK Bearing Doctor - Diagnóstico Rápido de Ocorrências em Rolamentos.

7.14 Superaquecimento

Ocorrência	Possíveis causas	Ações corretivas
O superaquecimento ocorre durante o trabalho, provocando a alteração na coloração da peça. A quebra ocorre pela alteração dimensional, redução da folga interna e consequentemente, ocorre travamento e a quebra da gaiola.	<ul style="list-style-type: none">• Falha de lubrificação.• Excesso de carga (excesso de pré-carga).• Alta rotação.• Folga interna muito pequena.• Entrada de água e contaminantes.• Precisão do eixo e alojamento deficiente.	<ul style="list-style-type: none">• Reestudar o ajuste e a folga interna do rolamento.• Lubrificar em volume adequado com o lubrificante adequado.• Verificar a precisão do eixo e alojamento.• Melhorar o método de instalação.

Fonte: NSK, Catálogo NSK Bearing Doctor - Diagnóstico Rápido de Ocorrências em Rolamentos. 2011.

3.3. Desbalanceamento do Moinho

3.3.1. Detecção

Alem dos problemas causados por causa da lubrificação, foram verificadas que os rolamentos também sofrem altas cargas decorrentes do desbalanceamento do rotor e dos conjuntos das facas, figura 26.

Figura 26 - Conjunto de Facas



Fonte: Imagens das facas novas e balanceadas do moinho.

3.3.2. Diagnóstico

Primeiramente foi executado o balanceamento do rotor, sem que o conjunto das facas estivesse montada, para verificar a má distribuição da massa do rotor, pois com o decorrer do tempo o material (latas de alumínio) em contato com o rotor ocasionou um desgaste do rotor sendo necessário melhorar a distribuição de massa do mesmo.

Uma vez balanceado o rotor criou-se um procedimento, onde deixou se de fazer a vira das facas após quinze dias e trocas apenas depois de 30 dias, para eliminar o desbalanceamento do conjunto decorrente do desgaste das facas.

Também foram pesadas todas as partes do conjunto das facas (parafusos “tipo prisioneiro”, cunhas laterais e cunhas do centro) e distribuído de maneira balanceada.

Hoje as facas são trocadas a cada 15 dias durante a manutenção preventiva do equipamento, e podemos verificar nos espectros sobrepostos (Figura 27) que a vibração na frequência da rotação (1x RPM) característico de desbalanceamento diminui significadamente após o balanceamento, onde as frequências em amarelo correspondem antes da correção e as frequências em preto depois de corrigido.

Figura 27 - Espectro de Vibração em Velocidade (mm/s).



Fonte: Fonte: Software de Análise de Vibração.

3.3.3. Origem da Falha

A figura 28 mostra as facas com desgastes devido a atrito exercido pelo material (latas de alumínio), onde trabalhando com as facas por um período maior de 15 dias ocorre um aumento significativo no desbalanceamento do equipamento.

Figura 28 - Faca montada no rotor do moinho.



Fonte: Imagens da faca com desgaste e desbalanceada devido ao atrito durante o processo.

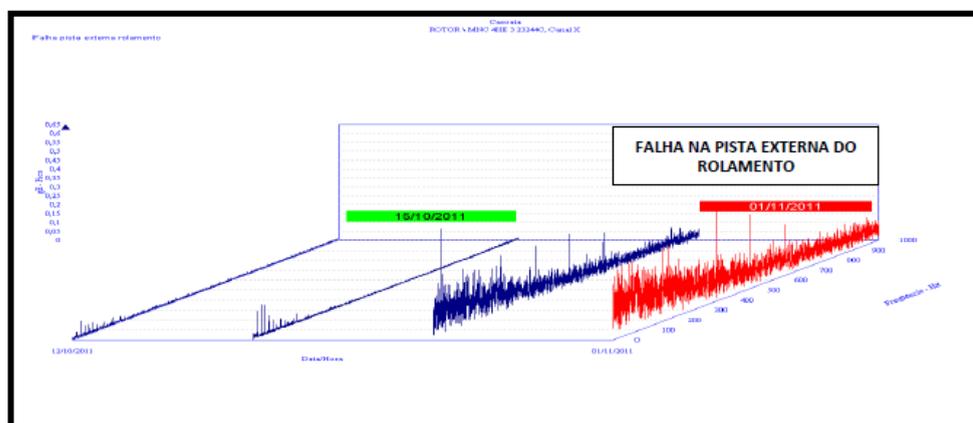
3.4. Sistema de Monitoramento

3.4.1. Detecção

Como foram detectados na análise de falhas os sensores de fluxo de óleo era um dos principais problemas, onde os mesmos não indicavam a falta de óleo dos mancais, como o lubrificante e a maneira de se lubrificar foram alterados para eliminar as deficiências encontradas, mudou-se então o sistema de monitoramento dos rolamentos.

Antes o monitoramento era feito de maneira *off-line* pela preditiva, onde segue uma rota mensal de coleta/análise de vibração, caso ocorresse alguma falha na lubrificação dos rolamentos durante este intervalo de tempo (Figura 29), os mesmos já poderiam estar apresentando algum tipo de defeito devido à falta ou deficiência de lubrificante.

Figura 29 - Espectro Vibração do Rolamento – Falha devido a falta de lubrificação.



Fonte: Fonte: Software de Análise de Vibração.

3.4.2. Diagnóstico

Sabendo do que a falta de lubrificante ocasionaria. Instalou-se um sistema *on-line* de monitoração (SKF cmpt CTU – Figura 30), onde esta ferramenta pode ser usada como parte de um sistema de detecção de falha do equipamento. O CTU mede temperatura e pode medir e analisar três tipos de sinais de vibração – envelope de aceleração (gE), aceleração (g), ou velocidade (mm/s ou pol/s).

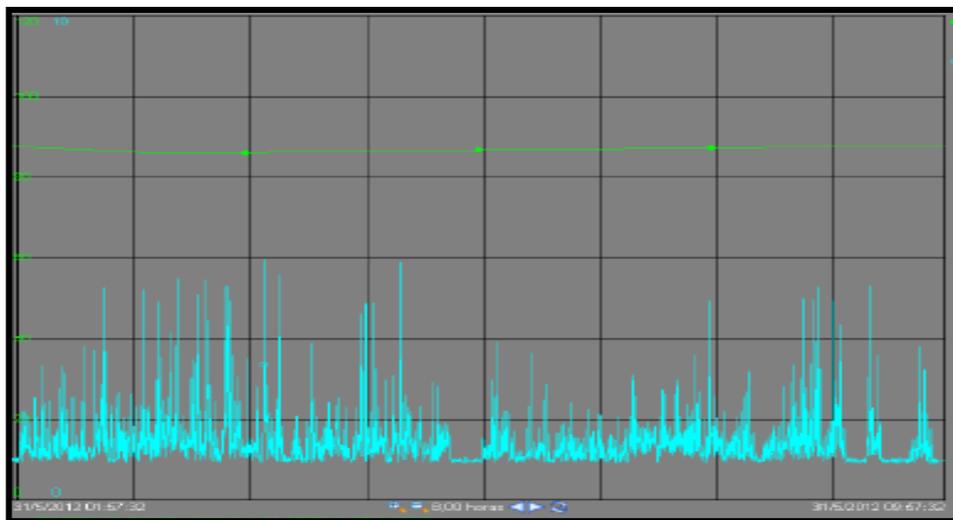
Figura 30 - Dispositivos de Monitoramento *on-line*.



Fonte: SKF, Apostila de Analista de Máquinas II – SKF Reliability Systems , 2004.

A partir da instalação deste sistema passou a acompanhar a temperatura ($^{\circ}\text{C}$) e a vibração (gE) dos rolamentos no sistema PI *ProcessBook* (supervisório utilizado na coleta de dados dos equipamentos), e então a lubrificação passou a ser feita somente quando for sinalizado, onde um alarme de falha de lubrificação toca no *panel view* da área, e caso após lubrificar os rolamentos os níveis de vibração não abaixe o pessoal da manutenção da área solicita ao setor da preditiva que faça uma coleta e análise em campo mais detalhada para verificar a origem da vibração.

Figura 31 - Supervisório PI Processbook.



Fonte: Tela do supervisório indicando nível global da vibração e temperatura.

3.4.3. Origem da Falha

Quando a lubrificação era feita por óleo os níveis de vibração dos rolamentos eram em torno de 10 gE , um valor inaceitável de acordo com os alarmes recomendados para o envelope de aceleração (gE). Após as correções os rolamentos passaram a trabalhar com níveis abaixo de $0,4 \text{ gE}$.

Tabela 4 - Limites para Vibração em Rolamentos

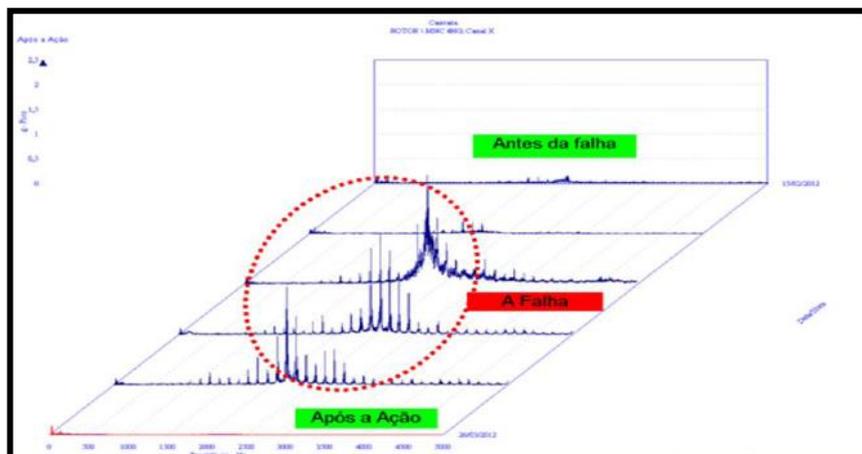
Range Recomendado		Diâmetro entre 200 e 500 mm	Diâmetro entre 50 e 300 mm	Diâmetro entre 20 e 150 mm
500 Hz	1000 Hz	Rotação < 500 rpm	Rotação entre 500 e 1800 rpm	Rotação entre 1800 e 3600 rpm
0,75	1	ACEITÁVEL (A/B)	ACEITÁVEL (A/B)	ACEITÁVEL (A/B)
1,5	2	INSATISFATÓRIO (C)	ACEITÁVEL (A/B)	ACEITÁVEL (A/B)
3,5	4	INSATISFATÓRIO (C)	INSATISFATÓRIO (C)	ACEITÁVEL (A/B)
7,5	10	INACEITÁVEL (D)	INACEITÁVEL (D)	INSATISFATÓRIO (C)
				INACEITÁVEL (D)

Fonte: SKF, Apostila de Analista de Máquinas II – SKF Reliability Systems , 2004

3.5. Considerações

Com a instalação do sistema de monitoramento *on-line*, foi possível detectar uma falha inserida nos rolamentos por passagem de corrente elétrica logo após uma preventiva do equipamento, onde a manutenção precisou fazer uma solda na estrutura do moinho e o soldador vez o aterramento incorreto, colocando o terra no mancal do moinho. O espectro da figura 32 mostra o aumento da amplitude das frequências decorrentes da passagem de corrente elétrica.

Figura 32 - Espectro de Vibração - Defeito Devido a Passagem de Corrente Elétrica.



Fonte: Software de Análise de Vibração.

Após a troca do rolamento os níveis de vibração voltaram a níveis aceitáveis, devido a este acontecimento foi feita uma conscientização junto às equipes de manutenção para que não ocorra novamente este tipo de falha.

Figura 33 - Corrosão Elétrica na Pista Externa do Rolamento.



Fonte: Imagem do rolamento danificado devido solda elétrica.

Tabela 5 - Catálogo NSK Bearing Doctor - Diagnóstico Rápido de Ocorrências em Rolamentos.

7.15 Corrosão elétrica

Ocorrência	Possíveis causas	Ações corretivas
A corrosão elétrica ocorre quando há a passagem de corrente elétrica pelo rolamento. A corrente elétrica em forma de arco passa do eixo pelos anéis e pelas esferas derretendo os componentes.	<ul style="list-style-type: none"> Diferença de potencial entre os anéis internos e externos. Utilização de máquinas de solda, com o aterramento em equipamentos com rolamentos. 	<ul style="list-style-type: none"> Projetar circuitos elétricos para prevenir fluxo através dos rolamentos. Isolamento do rolamento. Não aterrar máquinas de solda em equipamentos com rolamentos.

Fonte: NSK, Catálogo NSK Bearing Doctor - Diagnóstico Rápido de Ocorrências em Rolamentos. 2011.

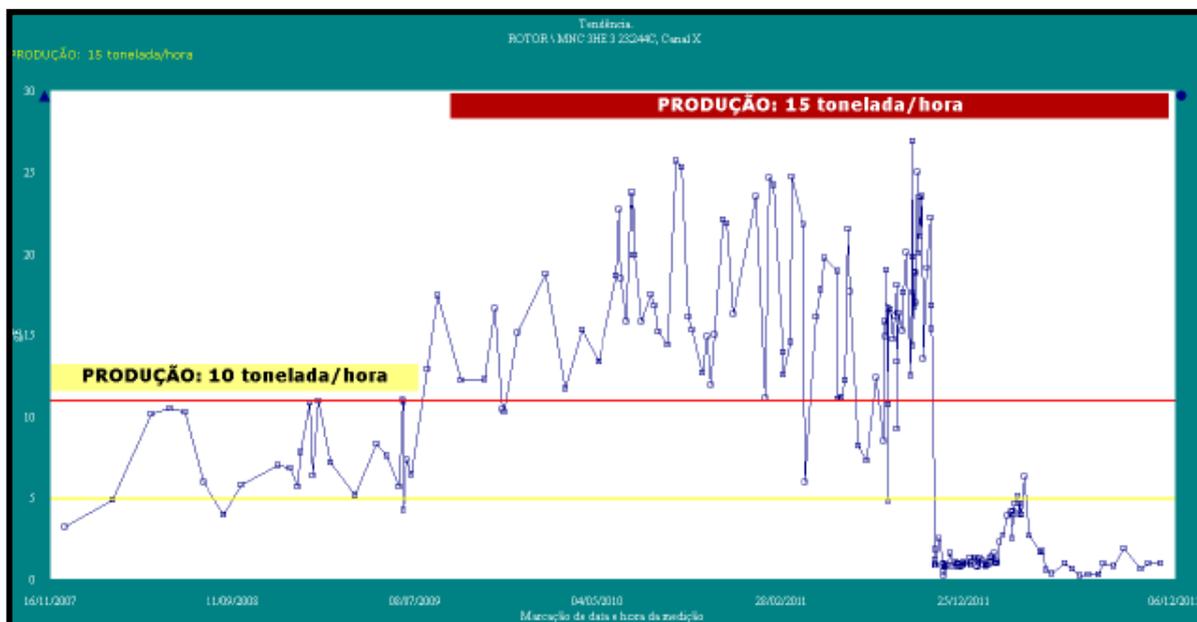
4. CONCLUSÕES

Conforme descrito no resumo, os objetivos deste trabalho foram identificar as possíveis causas das quebras dos rolamentos do moinho de facas, onde se utilizou da análise de falhas e dos conceitos e metodologia das técnicas de preditiva no monitoramento.

As técnicas de manutenção preditiva permitem identificar a presença de defeitos no funcionamento de máquinas e equipamentos pela monitoração da vibração dos mesmos e a observação de modificações causadas no espectro de frequência de vibração dessas máquinas, associando essas modificações a defeitos típicos.

Com isso, analisando o espectro de nível global em envelope aceleração (Figura 34) mostrou que com o aumento da produção, o equipamento foi mais exigido, aonde veio a aumentar os níveis de vibração dos rolamentos dos mancais do moinho.

Figura 34 - Espectro de tendência (gE – envelope de aceleração).



Fonte: Software de Análise de Vibração..

Assim, verificou-se que após a implementação das melhorias solicitadas os níveis de vibração dos rolamentos passaram a trabalhar em níveis nunca antes atingidos, visando uma melhor confiabilidade e disponibilidade.

Segundo Baroni (2002), a missão da manutenção é: 'garantir a disponibilidade da função dos equipamentos e instalações de modo a atender a um processo de produção ou de serviço, com confiabilidade, segurança, preservação do meio ambiente e custos adequados'.

Por outro lado sabemos que um grande salto nos resultados só acontece com mudança de paradigmas. Neste processo de evolução dos tipos de manutenção, temos mudança de paradigma quando a manutenção preventiva se baseia em técnicas preditivas,

ou seja, no lugar de parar o equipamento baseado apenas no tempo calendário, ele é mantido operando até o limite preestabelecido com base em levantamento de parâmetros que podem ser acompanhados, compatibilizando a necessidade da intervenção com a produção.

Sugere-se como contribuição que o setor de planejamento realize uma revisão no plano de manutenção do equipamento para atender as novas necessidades e especificações implementadas, além de verificar novas oportunidades.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, M. T. **Apostila de Análise de Vibrações I – Princípios de Diagnósticos de Defeitos em Máquinas Rotativas**, 2012.

ALMEIDA, M. T., **Manutenção Preditiva: Confiabilidade e Qualidade**. MTA, <http://www.mtaev.com.br/download/mnt1.pdf>. Consultado em 05/10/2013.

ALMEIDA, M. T., **Manutenção Preditiva: Benefícios e Lucratividade**. MTA, <http://www.mtaev.com.br/download/mnt2.pdf>. Consultado em 05/10/2013.

ARATO JUNIOR, A. **Manutenção Preditiva Usando Análise de Vibrações**. Barueri, SP, Brasil, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5462: Confiabilidade e Manutenibilidade - Terminologia**. Rio de Janeiro, 1994.

BARONI, T. **Gestão Estratégica e Técnicas Preditivas**, Editora Qualitymark. Rio de Janeiro, 2002.

BEZERRA, R. A., “**Deteção de falhas em rolamentos por análise de vibração**”, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, Brasil, 2004.

BRASSARD, M., **Qualidade Ferramentas para uma melhoria continua**, Editora Qualitymark, Rio de Janeiro, 1985.

DAVIES A., **Handbook of Condition Monitoring: Techniques and Methodology**, ed. Chapman e Hall, 1998.

FILIFE, J. C., **Diagrama de espinha de peixe (Ishikawa)**, 2005.

KARDEC, A. NASCIF, J. **Gestão Estratégica e Técnicas Preditivas**. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2002.

MCFADDEN P.D.; SMITH, J. D., “*Vibration monitoring of rolling element bearings by the high frequency resonance technique - a review*”. *Tribology International*. 1984.

MITCHELL, J. S., “**Machinery Analysis and Monitoring**”, Oklahoma: Penn Well Books, U.S.A., 1993, 566p.

NSK, **Catálogo NSK Bearing Doctor - Diagnóstico Rápido de Ocorrências em Rolamentos**. 2011.

PAIVA, O. G., **Análise das Vibrações Mecânicas: Iniciação ao Estudo das Vibrações Mecânicas**, 2000.

PINTO, L. H. T., 2004, **Análise de Falhas: Tópicos de Engenharia de Confiabilidade**. <http://www.mantenimentomundial.com/sites/mm/notas/failure.pdf>. Consultado em 28/10/2012.

PONCI, L. P., CUNHA, P. M. R. **Previsão de Falhas de Rolamentos por Análise Espectral e de Envelope**, Disponível em: http://www.teknikao.com.br/artigos/Previsao_de_Falha_de_Rolamentos.pdf. Acesso em: 23 Nov. 2013.

SILVA, C. A., “**Um Estudo Sobre os Fundamentos da Manutenção Preditiva Através da Análise de Vibração em Ambiente Industrial**”, Universidade de Taubaté, Taubaté, SP, Brasil, 1998.

SILVA, J. A., “**Aplicação da Manutenção Preditiva por Análise de Vibrações – Estudo de Caso**”, Faculdade de Tecnologia de Taquaritinga, Taquaritinga, SP, Brasil, 2008.

SKF, **Apostila de Analista de Máquinas II – SKF Reliability Systems** , 2004.

SOUZA G. M., **Monitoramento de Máquinas, Nova Manutenção Y Qualidade**, ano 9, n. 42, 2002.

SPAMER, F. R., “**Técnicas Preditivas de Manutenção de Máquinas Rotativas**”, Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2009.

RAMOS, R. W., **CEP para processos contínuos e em bateladas**, Editora Edgard Blucher Ltda., São Paulo, 2000.

RAO, S. S. **Vibrações Mecânicas**. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008. Tradução de: Arlete Simille.

XAVIER, J. N., **Manutenção Preditiva: caminho para excelência**, Disponível em: http://tecem.com.br/site/downloads/artigos/manutencao_preditiva_caminho_para_a_excelecia.pdf. Acesso em: 05 Out. 2013.