

**UNIRV – UNIVERSIDADE DE RIO VERDE
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**ANÁLISE DE VIBRAÇÃO NO DOMÍNIO DO TEMPO E DA FREQUÊNCIA EM
REDUTOR DE VELOCIDADE**

MARCELO LUIZ BORGES

Orientador: Prof. Eng. RONALDO LOURENÇO FERREIRA

**Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
à Faculdade de Engenharia Mecânica da
UniRV – Universidade de Rio Verde, como
parte das exigências para a obtenção do título
de Bacharel em Engenharia Mecânica.**

RIO VERDE - GOIÁS

2014

**UNIRV – UNIVERSIDADE DE RIO VERDE
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**ANÁLISE DE VIBRAÇÃO NO DOMÍNIO DO TEMPO E DA FREQUÊNCIA EM
REDUTOR DE VELOCIDADE**

MARCELO LUIZ BORGES

Orientador: Prof. Eng. RONALDO LOURENÇO FERREIRA

**Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
à Faculdade de Engenharia Mecânica da
UniRV – Universidade de Rio Verde, como
parte das exigências para a obtenção do título
de Bacharel em Engenharia Mecânica.**

RIO VERDE - GOIÁS

2014



UNIVERSIDADE DE RIO VERDE

CRENCIADA PELO DECRETO Nº 5.971 DE 02 DE JULHO DE 2004

Fazenda Fontes do Saber
Campus Universitário
Rio Verde - Goiás

Cx. Postal 104 - CEP 75901-970
CNPJ 01.815.216/0001-78
I.E. 10.210.819-6/I.M. 021.407

Fone (64) 3620-2200
e-mail fesurv@fesurv.br
www.fesurv.br

FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

ANÁLISE DE VIBRAÇÃO NO DOMÍNIO DO TEMPO E DA FREQUÊNCIA EM REDUTOR DE VELOCIDADE

MARCELO LUIZ BORGES

Este trabalho de conclusão de curso foi julgado adequado para obtenção do título de BACHAREL EM ENGENHARIA MECÂNICA na área de concentração Manutenção e aprovada em sua forma final.

Prof. Eng. Ronaldo Lourenço Ferreira
Orientador

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Warley A. Pereira

Prof. Eng. Ludmylla G. Cabral

Prof. Ms. João Pires de Moraes
Diretor da Faculdade de Engenharia Mecânica

AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar a Deus que me iluminou e proporcionou a oportunidade de ingressar numa faculdade.

A minha mamãe Maria Madalena da Silva, que de forma especial e carinhosa me deu força e coragem, apoiando-me nos momentos de dificuldades.

A minha esposa Anna Carolyne Jorge de Oliveira, por entender a minha ausência nesse período de estudos.

A minha família, meu papai João Cícero Borges, meu irmão Luiz Carlos Borges, que sempre estiveram me apoiando e incentivando.

Aos meus amigos e colegas de curso, pela cumplicidade, ajuda e amizade.

Ao professor Ronaldo Lourenço Ferreira, pela orientação e dedicação ao meu trabalho.

RESUMO

BORGES, Marcelo Luiz. **Análise de vibração no domínio do tempo e da frequência em redutor de velocidade**. 2014. 60f. Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica) – UniRV – Universidade de Rio Verde, Rio Verde, 2014.¹

As paradas e perdas de produções referentes à quebra de equipamentos e ou processos deficientes estão entre os problemas mais graves e de maior atenção nos mais diversos ramos industriais. Diante disso, conhecer e fazer uso de recursos que se apresentam como solução é de extrema importância para garantir confiabilidade operacional e das plantas industriais. A técnica de Análise de Vibração consiste em analisar possíveis problemas em máquinas e equipamentos, esta análise detecta variações na intensidade de vibrações de sistemas. A importância desta técnica está em monitorar anomalias em sistemas dinâmicos para evitar a ocorrência de falhas. Este método é muito útil para monitoração de equipamentos rotativos, na detecção de falhas, na análise de mau funcionamento de máquinas e diversos tipos de equipamentos. O uso deste método proporciona maior confiança para instalações e uso de máquinas, e prevê o momento ideal para desligamento do equipamento, antes de um problema irreversível, identificando o momento de substituição de peças. Um problema encontrado no uso deste método é a interpretação da análise de vibrações, que mesmo precisamente localizada pode apresentar erro na análise, pois pode ocorrer a identificação de uma falha de equipamento apenas pela sensibilidade apresentada. Por isso é importante utilizar equipamentos e sensores precisos para esta análise. Concluindo-se que a análise de vibração é uma importante ferramenta para as empresas e garante estratégias de manutenção que permitem que a empresa não tenha problemas graves durante seu processo produtivo.

PALAVRAS-CHAVE:

Manutenção Preditiva, Análise de Vibração, Domínio do tempo.

¹ Banca Examinadora: Prof. Eng. Ronaldo Lourenço Ferreira (Orientador); Prof. Dr. Warley A. Pereira e Prof.^o. Eng. Ludmylla G. Cabral – UniRV.

ABSTRACT

BORGES, Marcelo Luiz. **Vibration analysis in the time domain and the frequency in speed reducer**. 2014. 60f. Monograph (Degree in Mechanical Engineering) – UniRV – University of Rio Verde, Rio Verde, 2014.¹

Parades and production loss related to equipment breakdown or disabled process are among the most serious and more attention needed problems in many industries. Therefore, knowing and making use of resources that presents themselves as the solution is paramount to ensure operational reliability and industrial plants. The technique of Vibration Analysis consists in analyzing possible problems in machinery and equipment, this analysis detects variations in the intensity of systems vibrations , the importance of this technique is to monitor anomalies in dynamic systems to prevent the occurrence of failures. This method is very useful for monitoring of rotating equipment, the detection of failures, in the analysis of bad function of many types of machinery and equipment. Using this method provides greater confidence to facilities and use of machines and provides the ideal equipment for shutdown time before an irreversible problem identifying the time of replacement. A problem found in the use of this method is the interpretation of vibration analysis that even precisely located can have an error in analysis because an identification of an equipment failure can occur only by the sensitivity displayed. Therefore it is important to use accurate equipment and sensors for this analysis. Concluding that vibration analysis is an important tool for businesses and ensures maintenance strategies that enable the company to have no serious problems during its production process.

KEYWORDS:

Predictive Maintenance, Vibration Analysis, Time domain.

¹ Board of examiners: Prof. Eng. Ronaldo Lourenço Ferreira (Advisor); Prof. Dr. Warley A. Pereira e Prof^a. Eng. Ludmylla G. Cabral – UniRV.

LISTA DE ABREVIACÕES E SIGLAS

UNIRV – Universidade de Rio Verde

mm/s escala em milímetros por segundo

Cpm escala em ciclo por minuto

Hz escala em hertz

Gs escala em proporção à aceleração da gravidade

Rpm escala em rotação por minuto

Cv cavalo vapor

V volt

Kw quilowatt

mm milímetros

cm centímetros

m/s metros por segundo

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – O mecanismo de Anticitera.....	14
FIGURA 2 – 1804 primeira locomotiva a vapor richard trevithick	16
FIGURA 3 – Dispositivo redutor de velocidade	16
FIGURA 4 – Conjunto de engrenamento	17
FIGURA 5 – Máquina para confecção de coroas.....	18
FIGURA 6 – Fábrica de coroas e redutores	18
FIGURA 7 – Redutor de coroas cilíndricas com dentes helicoidais e eixos paralelos.	19
FIGURA 8 – Redutor do tipo “coroas e rosca sem fim”	20
FIGURA 9 – Redutor de coroas helicoidais.....	20
FIGURA 10 – Redutor planetário	21
FIGURA 11 – Frequência de engrenamento	23
FIGURA 12 – Espectro de amplitude x frequência.....	23
FIGURA 13 – Engrenagem com desgaste nos dentes.....	24
FIGURA 14 – Folga insuficiente entre os dentes.....	24
FIGURA 15 – Deflexão devido ao carregamento	25
FIGURA 16 – Dente quebrado	26
FIGURA 17 – Eixo com pinhão ovalizado	26
FIGURA 18 – Amplitude decrescente – desgaste excessivo	27
FIGURA 19 – $2 \times Fe > Fe$ – Folga insuficiente	27
FIGURA 20 – Amplitude constante – Folga excessiva.....	28
FIGURA 21 – Gráfico zona de classificação	36
FIGURA 22 – Coletor de vibração.....	40
FIGURA 23 – Software de vibração	41
FIGURA 24 – Pontos de medição	42
FIGURA 25 – Pontos de medição	42
FIGURA 26 – Espectro no domínio em ondas no tempo.....	44
FIGURA 27 – Espectro no domínio em ondas no tempo.....	45

FIGURA 28 – Bancada didática concluída	48
FIGURA 29 – Software Trendline	49
FIGURA 30 – Coleta de dados.....	52
FIGURA 31 – Espectro em formas de ondas no tempo	53
FIGURA 32 – Desenho técnico engrenamento redutor cestari	54
FIGURA 33 – Engrenamento Z1 com o dente quebrado	55
FIGURA 34 – Movimento periódico	55
FIGURA 35 – Espectro em formas de ondas no tempo	56

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
1.1 Objetivos.....	12
1.2 Justificativas	12
1.3 Estrutura do trabalho	13
2 REVISÃO DE LITERATURA	14
2.1 Estudos pioneiros: O início da aplicação das coroas	14
2.2 A era industrial: Porque surgiram os redutores	15
2.3 Tipos de redutores	19
2.4 Falhas de engrenamento	21
2.4.1 Frequências características	22
2.4.2 Desgaste dos dentes	24
2.4.3 Folga insuficiente entre os dentes.....	24
2.4.4 Deflexão devido ao carregamento	25
2.4.5 Dente quebrado.....	25
2.4.6 Eixo com pinhão ovalizado	26
2.4.7 Combinação de falhas.....	27
2.5 Tipos de manutenção	28
2.5.1 Manutenção	28
2.5.2 Manutenção corretiva	29
2.5.3 Manutenção preventiva.....	30
2.5.4 Manutenção detectiva	31
2.5.5 Manutenção preditiva	31
2.6 Normas técnicas.....	34
2.6.1 Norma NBR 7497	34
2.6.2 Norma NBR 15928.....	34
2.6.3 Norma NBR 10082.....	35

	10
2.6.4 Norma ISO 10816.....	37
2.6.5 Norma ISO 10816-1	37
2.6.6 Norma ISO 7919.....	38
2.6.7 Norma ISO 7919-1	39
2.7 Aparelho analisador de vibrações	39
2.7.1 Pontos de medição	41
2.8 Análise de vibração no domínio do tempo	42
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	46
3.1 Montagem da bancada didática	46
3.2 Configurar o ponto de medição no software Trendline.....	48
3.2.1 Função de lembrete para o ajuste de limiar de alarme	48
3.2.2 Opções de RFID e de comentário.....	49
3.2.3 Estado RFID	49
3.2.4 Entrada de comentários no detector	50
3.2.5 Sensor	50
3.2.6 Sinal temporal.....	50
3.2.7 Rotação	51
3.2.8 Enviar ponto de medição para o coletor de vibração detector III.....	51
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	52
4.1 Coleta de dados para análise de vibração	52
4.2 Descarregar dados medidos	53
4.3 Análise espectral sem defeito na máquina.....	54
4.4 Quebra do dente na engrenagem Z1	54
4.5 Análise no domínio do tempo.....	55
4.6 Análise espectral com defeito na máquina	56
5 CONCLUSÃO.....	57
6 REFERÊNCIAS	58

1 INTRODUÇÃO

A industrialização em geral tem exigido dos fabricantes melhores investimentos de pesquisa nas criações de máquinas e equipamentos, de tal sorte que cada vez continuam inovador e competitivo.

Os centros de pesquisas se espalham pelas mais diversas áreas de estudo e conhecimento: educação, saúde, ciências sociais e exatas, particularmente, no caso da Engenharia Mecânica, o número de opções é muito amplo, abrangendo áreas como as ciências térmicas, ciências dos materiais, processos de fabricação e outros.

Entre uma destas áreas está à mecânica dos sólidos, mais especificamente à parte que estuda a dinâmica, esta linha de pesquisa é uma das ciências que formam um dos pilares fundamentais para o projeto de construção de máquinas, estruturas e equipamentos. E através do projeto de construção de máquinas, que se têm grandes possibilidades de apresentar falhas ou defeitos. Quando isto acontece, a necessidade de se fazer uma análise dinâmica da máquina para descobrir o fator que causou a falha é muito importante. Neste caso a análise dinâmica que estuda as vibrações mecânicas se destaca por trazer informações importantes sobre o comportamento através da análise sobre as máquinas e equipamentos.

É através dos estudos das vibrações mecânicas que se detecta se a máquina está com problemas de rolamentos, desalinhamento, desbalanceamento, engrenamento ou outro tipo de defeito, e assim executar e antecipar as correções nas máquinas antes que parem inesperadamente por quebra ou por falha.

A vantagem desta análise é o poder que se tem de reduzir os estoques de peças sobressalentes, normalmente caras, talvez difíceis de ter a pronta entrega, ou em muitas vezes, até mesmo sendo danificadas pela má estocagem ou manuseio. Além disto, paradas inesperadas prejudicam a produção e consomem um tempo precioso. Através da aplicação de análise de vibrações, nestes casos, os tempos de paradas são reduzidos ao mínimo, os sobressalentes das máquinas são comprados e pessoas alocadas, somente quando houver necessidade. Enfim, há uma excelente vantagem ao se usar esse método de análise, tudo pode ser programado, pois se sabe qual peça ou o que exatamente deve ser comprado, seu prazo de entrega e custo e qual profissional deve ser contratado para execução de tal serviço. Além é

claro de, estrategicamente a produção poder reservar um espaço na programação para realização da manutenção.

Do ponto de vista do projeto, o conhecimento da resposta do equipamento ou da máquina, sujeitos às vibrações, podem decretar o sucesso ou insucesso do produto. Por estes motivos, a análise de vibração mecânica é uma técnica da ciência que tem um leque de aplicações, como já mencionado, em projetos e até na manutenção de máquinas e equipamentos. Portanto a análise de vibração mecânica é essencial e facilitadora na profissão dos futuros engenheiros mecânicos.

1.1 Objetivos

O objetivo deste trabalho é investigar as técnicas utilizadas pelas empresas na busca de melhorar o rendimento produtivo, visando expor as formas mais sucintas dos conceitos envolvidos na aplicação de análise de vibração e também voltada a garantir a qualidade dos serviços prestados na área de recuperação de equipamentos. Este trabalho também disponibiliza informações relativas à evolução, controle, gerenciamento e execução da manutenção, expondo um exemplo prático de aplicação da técnica apresentada para identificar problemas de falha de engrenamento em redutores.

Este trabalho aborda, ainda, a falha de engrenamento de redutores industriais, com ênfase no estudo da análise de vibração no domínio do tempo.

1.2 Justificativas

As paradas e perdas de produções referentes à quebra de equipamentos e ou processos deficientes estão entre os problemas mais críticos e de maior atenção nos mais diversificados ramos industriais. Mediante o tema abordado, dominar e fazer uso de recursos que se apresentam como solução é de extrema importância para garantir confiabilidade operacional e das plantas industriais. O tema escolhido se deu em função no nível de conhecimento prévio, da experiência profissional adquirida e principalmente pela importância do assunto abordado, que geram dúvidas até mesmo no processo evolutivo da tecnologia capaz de auxiliar na identificação das falhas e o uso da análise de vibração em equipamentos industriais.

1.3 Estruturas do trabalho

Este trabalho foi estruturado de forma a atender a exigência do curso de Engenharia Mecânica, na instituição UNIRV Universidade de Rio Verde. Para proporcionar uma leitura objetiva e concisa, este documento é composto pelas seguintes partes:

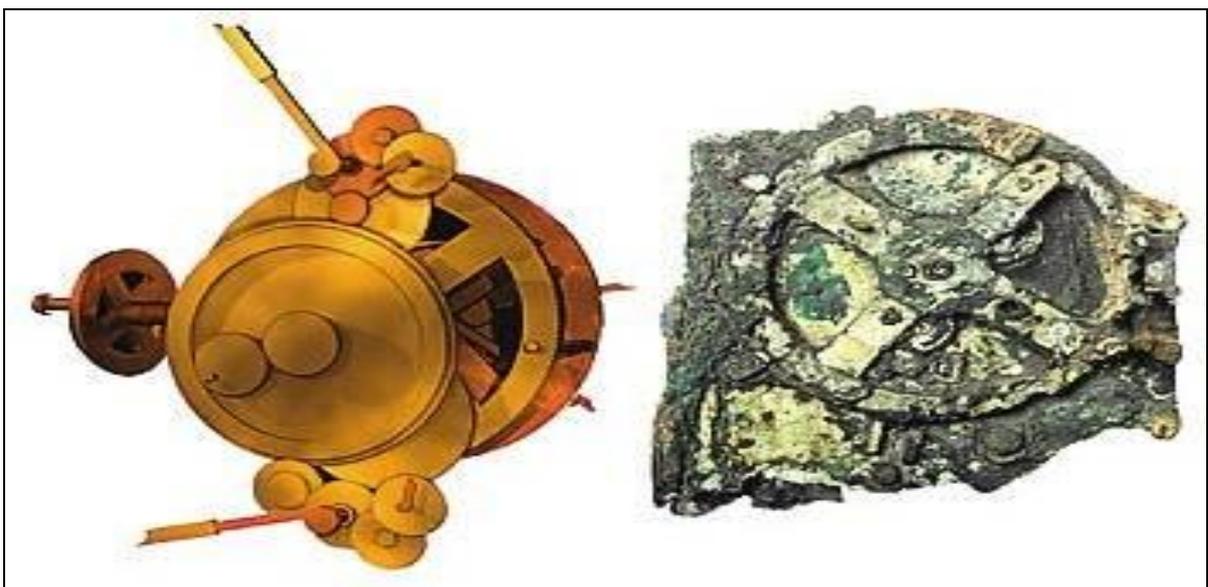
- Introdução – Introdução relata um breve contexto sobre questões e visões atuais das empresas relativas à manutenção e projetos. Apresentação da técnica de “análise de vibração” e do estudo da técnica aplicada neste trabalho. Expõe o objetivo e justificativa deste trabalho.
- A história das máquinas industriais – Apresenta o surgimento da literatura abordada, necessária para um melhor entendimento do surgimento das máquinas.
- Tipos de redutores – Apresenta vários modelos de redutores.
- Tipos de falhas em engrenamento – É apresentada uma revisão dos tipos de falhas caracterizada em redutores industriais.
- Tipos de manutenção – Permite a escolha do tipo mais conveniente para cada equipamento, instalação ou sistemas.
- Normas técnicas utilizadas na análise de vibração – São normas que define os termos empregados em vibrações mecânicas.
- Aparelho utilizado na análise de vibração – Este equipamento traz diagnósticos de máquinas em condições operacionais.
- Técnica utilizada para detectar falha – Expõe o desenvolvimento, a aplicação da técnica de análise de vibração realizada nos redutores.
- Montagem da bancada didática – Desenvolver a estrutura teórica do projeto para prática.
- Configurar o ponto de medição – Configurar o software para as informações de coleta de dados.
- Coleta de dados para análise de vibração – Colocar em prática todos os procedimentos para estudo científico da bancada.
- Conclusão – Demonstrar que todos os materiais e métodos alcançaram os valores os resultados esperados.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Estudos pioneiros: O início da aplicação das coroas

De acordo com Mori (2009), em 1955, Derek Price foi ao Museu Nacional em Atenas analisar por si mesmo um mecanismo Anticitera. Ele estava familiarizado com a construção de astrolábios medievais, e uma longa jornada de pesquisas começaria.

Em sua primeira publicação sobre o tema em 1955, Price situa o mecanismo de Anticitera como precursor de todos os relógios mecânicos. Logo depois, em um fascinante artigo na revista *Scientific American* de junho de 1959, ele chama a atenção do mundo científico a diversos aspectos do mecanismo, apontando que devia ser um computador astronômico a partir das inscrições com referências ao zodíaco, corpos celestes e aos meses do ano. Estes mostradores são singulares por apresentar claras marcações periódicas, e se inferirmos a existência de ponteiros móveis, isto, estabelece o mecanismo de Anticitera como o mais antigo instrumento cientificamente graduado que se conhece, de acordo com a figura 1.



Fonte: Geremia Redutores (2009).

FIGURA 1 – O mecanismo de Anticitera.

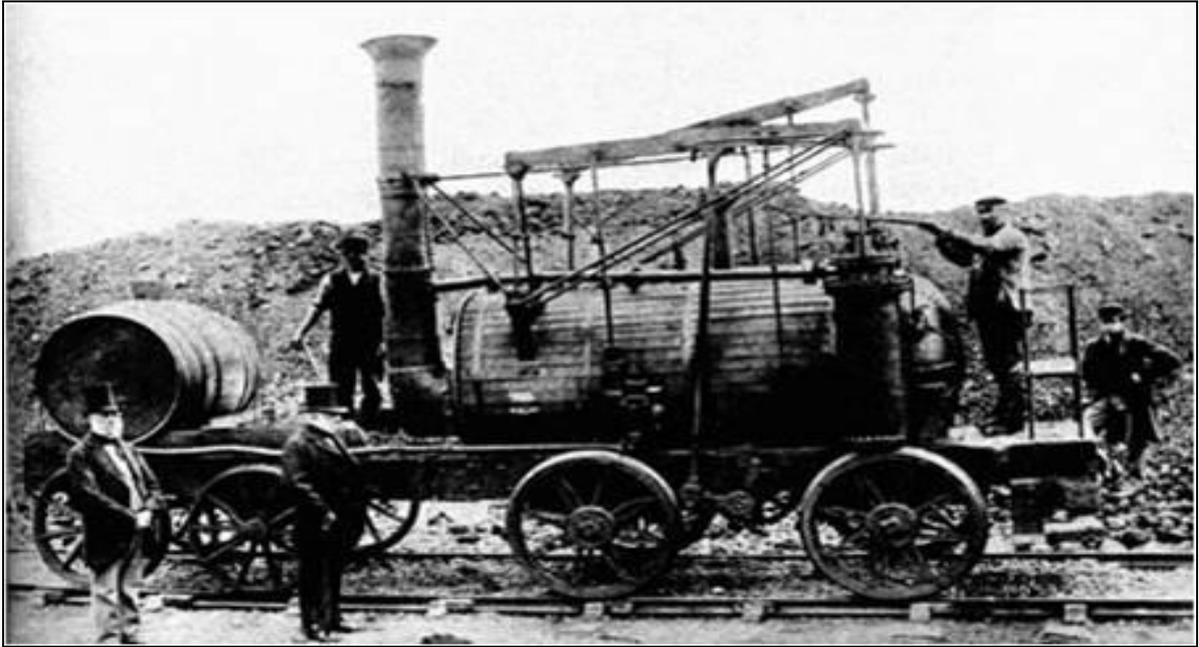
Todas as mais de trinta coroas componentes do mecanismo original aparentam ter sido cortadas da mesma chapa de bronze com uma pequena quantidade de latão, com dentes simples compostos de triângulos com ângulo de 60 graus em todas, e, portanto intercambiáveis. A partir das coroas, Price conjecturou que o giro de uma engrenagem motriz, agora perdida, movimentava todas as outras levando os ponteiros a indicar o movimento de corpos celestes ao longo do tempo.

O mecanismo seria assim uma espécie de simulador capaz de indicar posições celestes em qualquer data, bastando girar uma manivela para frente ou para trás. Este giro poderia ser mesmo automatizado, representando o céu junto com um relógio de água.

A hipótese era tão ousada que se chegou a propor que o artefato teria adentrado no meio dos destroços do navio (sic) em um período medieval. De fato, por tudo que se sabe, o mecanismo de Anticitera está mais de mil anos à frente de seu tempo. Mecanismos conhecidos com grau de sofisticação similares só viriam a surgir depois do século XIII ou ainda depois. Mas novamente, uma série de evidências indica com segurança que ele data do século I AC. A hipótese é sem dúvida extraordinária, mas é acompanhada de uma série de evidências extraordinárias.

2.2 A era industrial: Porque surgiram os redutores

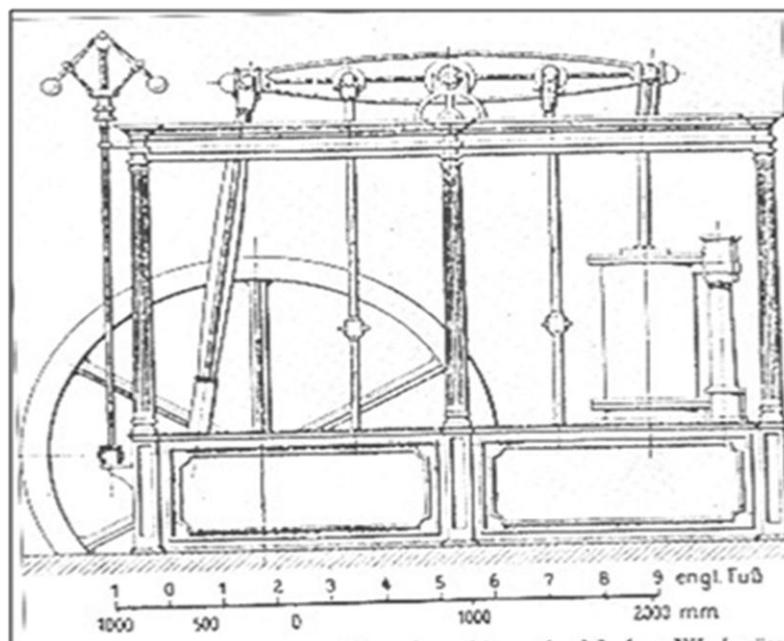
De acordo com Massoco (2014), máquinas acionadas por coroas no começo do século mudaram a face das fábricas para sempre. Isto se deve ao fato que no fim dos anos de 1.700 James Watt aperfeiçoou o seu maravilhoso motor a vapor, a revolução industrial foi movida a vapor (Figura 2). Um poderoso e enorme motor podia acionar uma fábrica inteira, transmitindo potência à dezenas de máquinas por meio de correias, o sistema era ineficiente e trabalhoso, mas melhorias chegaram por volta de 1890 quando a energia elétrica chegou ao chão de fábrica.



Fonte: Geremia Redutores (2009).

FIGURA 2 – 1804 primeira locomotiva a vapor richard trevithick.

Os motores elétricos criaram um novo problema. Os motores elétricos standard tinham um rendimento aceitável somente em rotações bem acima das necessárias nas máquinas acionadas. Era necessário achar um intermediário mecânico, um dispositivo que pudesse transformar a potência do motor para a velocidade pratica da máquina, de acordo com a figura3.



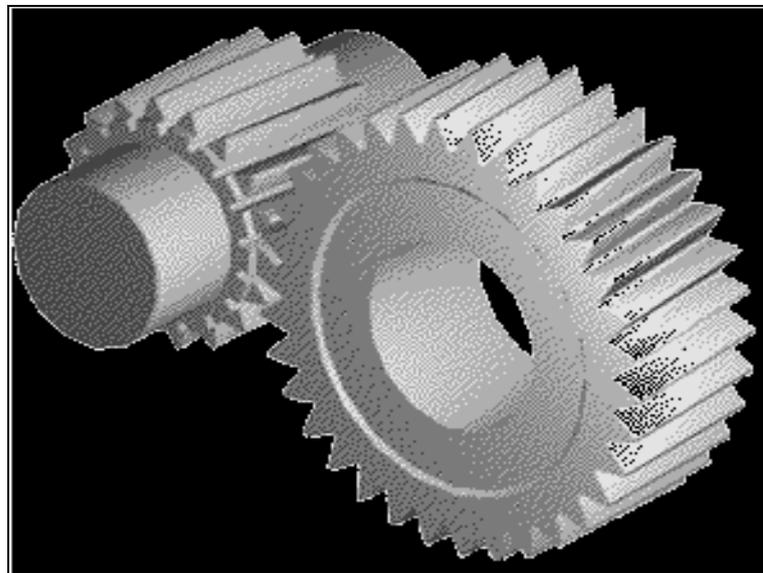
Fonte: Geremia Redutores (2009).

FIGURA 3 – Dispositivo redutor de velocidade.

Este dispositivo era o redutor de velocidade. Um redutor bem feito podia reduzir as revoluções por minuto de um motor em até revoluções por hora de algumas máquinas. O redutor era a ponte que ligava o motor à máquina. Transmitindo potência em uma infinidade de reduções, junto com o motor elétrico criaram uma silenciosa revolução industrial.

As coroas não assumiram seu local da noite para o dia. A tecnologia das coroas pode parecer elementar para os leigos, o que poderia ser mais simples do que uma roda com dentes? Mas as coroas industriais percorreram um longo e trabalhoso caminho no seu processo de desenvolvimento. As primeiras unidades eram de ferro fundido (até os dentes), os inevitáveis defeitos causavam desgaste prematuro e muito ruído. Coroas com dentes usinados começaram a aparecer no fim dos anos 1800, mas persistiam problemas de precisão e os tipos de dentes eram limitados aos dentes retos.

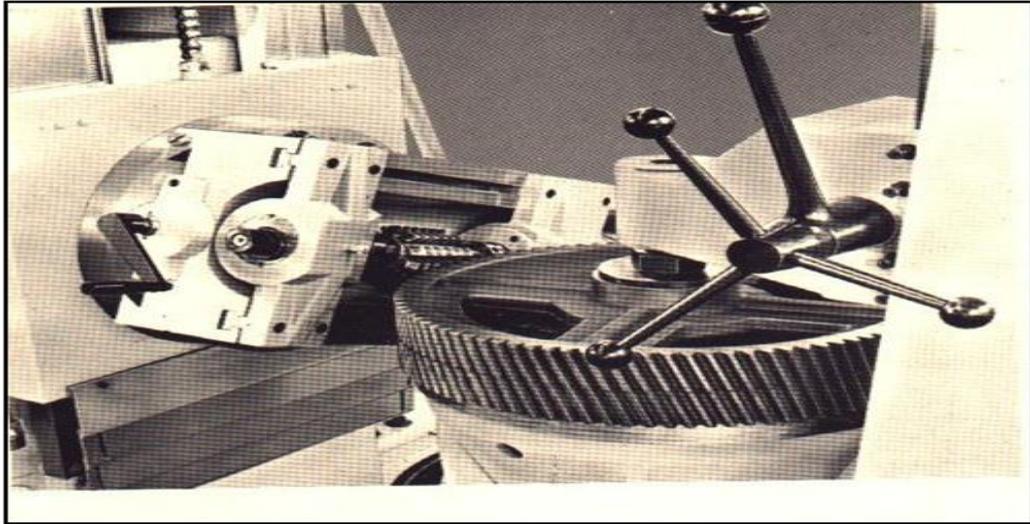
Nas coroas de dentes retos engrena um só dente de cada vez, esta ineficiência fez com que alguns engenheiros desenvolvessem as coroas helicoidais, cujos dentes são cortados na diagonal, conseqüentemente acabam trabalhando mais dentes ao mesmo tempo, transmitindo mais potência e sem ruído, de acordo com a figura 4.



Fonte: Geremia Redutores (2009).

FIGURA 4 – Conjunto de engrenamento.

O problema, entretanto era a carga axial e os rolamentos não estavam suficientemente desenvolvidos. Começou então uma procura por materiais melhores, o mercado começou a ficar exigente por produtos mais duráveis, eficientes e silenciosos, de acordo com a figura 5.

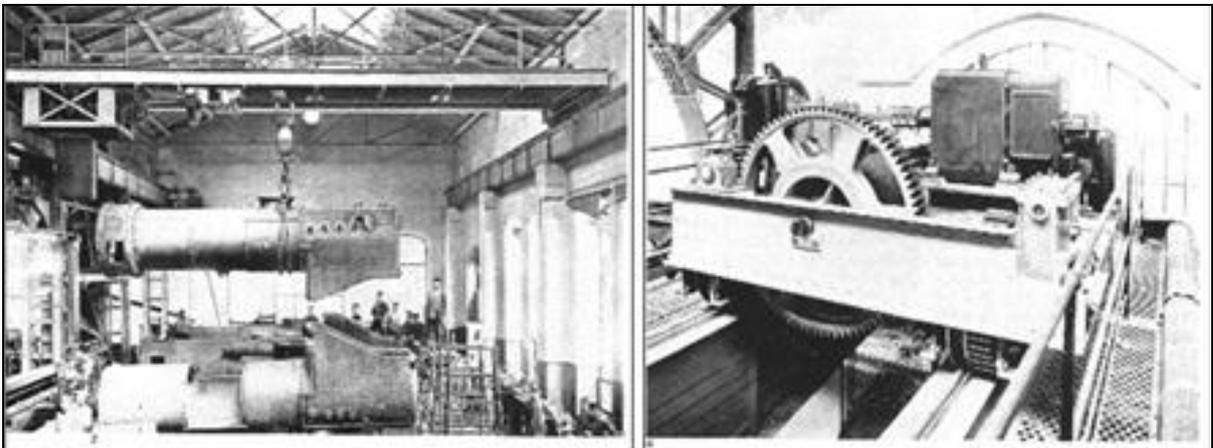


Fonte: Geremia Redutores (2009).

FIGURA 5 – Máquina para confecção de coroas.

Em 1909 um engenheiro inventor suíço chamado Casper Wüst-Kuns desenvolveu a engrenagem espinha de peixe e uma máquina para confecção das mesmas, a Hobber. O Hob em inglês conhecido como caracol é uma rosca com vários dentes de aço que giram na face do blank da roda enquanto a mesma também gira. Casper na realidade não inventou nenhum nem outro, pois o Hob já existia em 1904 e a engrenagem espinha de peixe desde 1901. Seu mérito foi juntar estes conceitos e desenvolver uma máquina que oferecia velocidade precisão e economia, ou seja, tudo que o mercado queria.

Os ingleses tomaram a frente e fizeram deste novo processo de fabricar coroas, um rentável negócio, produzindo comercialmente redutores de velocidade, para as minas de ouro da África do Sul e para vários estaleiros. Pois nesta época os motores a vapor estavam sendo substituídos por turbinas a vapor que exigiam redutores, de acordo com a figura 6.



Fonte: Geremia Redutores (2009).

FIGURA 6 – Fábrica de coroas e redutores.

2.3 Tipos de redutores

De acordo com Cestari (2014), os redutores mais comuns no mercado são os de coroas cilíndricas com dentes retos e eixos paralelos, coroas cilíndricas com dentes helicoidais e eixo paralelo do tipo coroas e rosca sem fim. Já existem os redutores chamados epicicloidais. O modelo de redutor será utilizado conforme o seu projeto, coroas de dentes retos e uma ou mais coroas de dentes internos. Os redutores epicicloidais são escolhidos eventualmente quando se procura um sistema mais compacto e com as tolerâncias para trabalhar com taxas altas de redução.

Redutores coaxiais e compactos com a construção sólida e projetados com as reduções duplas, triplas, quádruplas, e sêxtuplas, tendo coroas cilíndricas de dentes helicoidais. Esses pares de engrenagens serão acondicionados em carcaças de ferro fundido com parede interna que servirá de reforço e ao mesmo tempo de mancal, de acordo com a (figura 7 – 10).



Fonte: Cestari (2014).

FIGURA 7 – Redutor de coroas cilíndricas com dentes helicoidais e eixos paralelos.



Fonte: Cestari (2014).

FIGURA 8 – Redutor do tipo “coroas e rosca sem fim”.



Fonte: Cestari (2014).

FIGURA 9 – Redutor de coroas helicoidais.



Fonte: Cestari (2014).

FIGURA 10 – Redutor planetário.

2.4 Falhas de engrenamento

Coelho e Hansen (1993), citado por Vieira, exemplificam que a vibração produzida nos dentes das coroas, devido às imperfeições de contato ou ações dinâmicas associadas, possuem frequências múltiplas fundamental, que é dada como frequência de rotação do eixo vezes o número de dentes da engrenagem, podendo surgir no espectro frequências harmônicas da rotação.

Os problemas de vibração em coroas são identificados por sua frequência características: número de dentes vezes a rotação da coroa defeituosa. Quando o arranjo da coroa é complexo, com a presença de várias frequências de engrenamento, é bom esquematizar o arranjo e testar todos os produtos a fim de identificar onde está o problema. Os problemas relacionados com a frequência de engrenamento incluem: desgaste excessivo dos dentes, sem precisão, falhas localizadas, e material estranho entre os dentes, etc. Também as outras vibrações das máquinas, tais como: desalinhamento ou empenamento do eixo, influem no nível de vibração do componente correspondente à frequência de engrenamento, bem como sua respectiva harmônica. De uma maneira geral, as principais irregularidades em coroas, referem-se às seguintes causas: engrenamento inadequado entre os dentes das coroas paralelas; irregularidades localizadas: trinca ou fissuras nos dentes, rebarbas nos dentes,

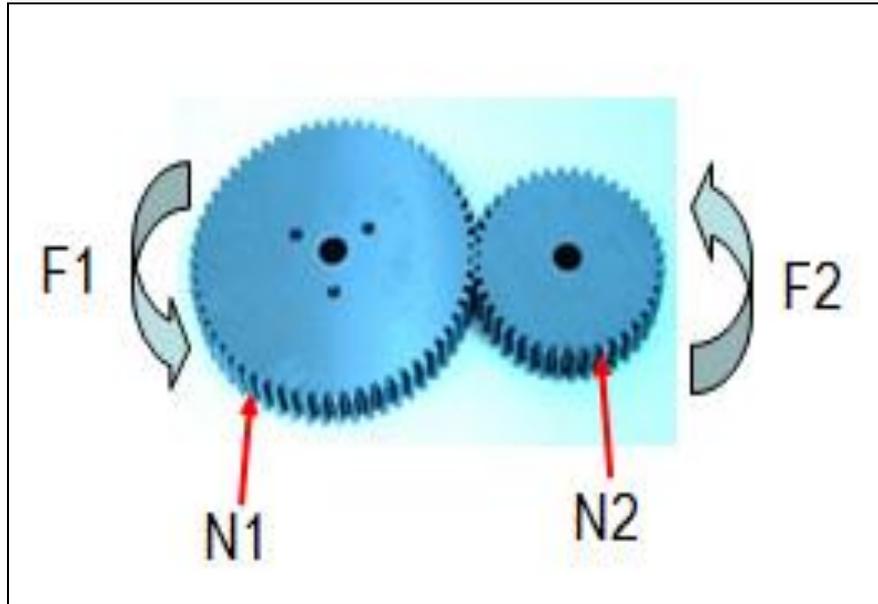
dentes quebrados ou com destacamentos; coroas excêntricas ou com erro no módulo; desalinhamento entre coroas. Nos complexos industriais de grande porte, com máquinas de grande responsabilidade, importantes a produção e com significativo custo de manutenção, a equipe de inspeção deve medir o nível de vibração na frequência de engrenamento, que geralmente indica desgaste, e construir um gráfico com a curva de tendência do redutor. Monitorando nas mesmas condições de carga, uma evolução nesta curva significa aumento de desgaste. De posse da curva de tendência, a equipe de manutenção preditiva, tem elementos para identificar as falhas em uma ou mais coroas, programar paradas e providenciar os reparos ou substituições necessárias de peças.

Às vezes o mais importante é o percentual do aumento do nível de vibração em relação ao valor de referência, e não o valor absoluto do nível. Por isso, fica difícil estabelecer normas ou critérios de severidades (ou níveis de alarme) para sistemas com coroas. Cada caso deve ser acompanhado e analisado. Somente assim, será possível estabelecer níveis de alarme e atenção para cada redutor. Os parâmetros para identificar problemas de engrenamento aceleração e a modulação, podem ser confirmadas através de envelope, para identificar qual eixo contém o defeito (pinhão ou engrenagem).

2.4.1 Frequências características

A relação entre as coroas estabelece a frequência de engrenamento (F_e) que corresponde ao ritmo de engrenamento dos dentes (Figura 11).

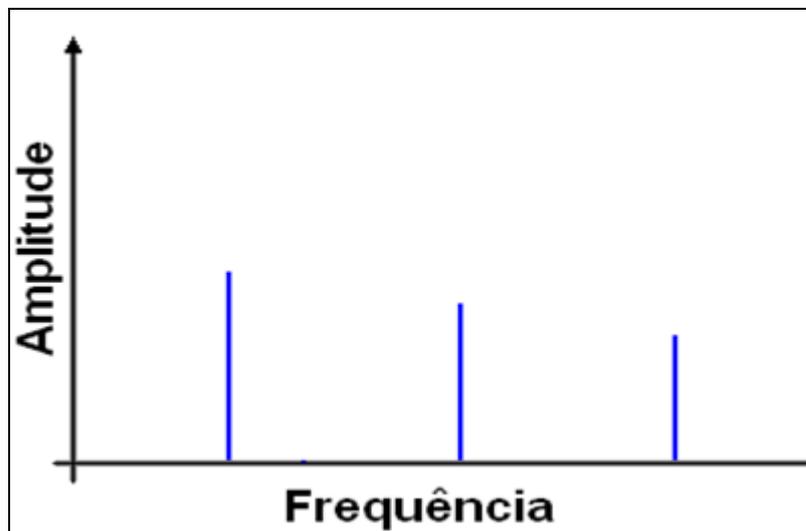
$$F_e = N_1 * F_1 = N_2 * F_2$$



Fonte: Mathias (2012).

FIGURA 11 – Frequência de engrenamento.

A amplitude do sinal da frequência de engrenamento (F_e) depende da carga da máquina, pois a coroa está transmitindo torque (Figura 12).



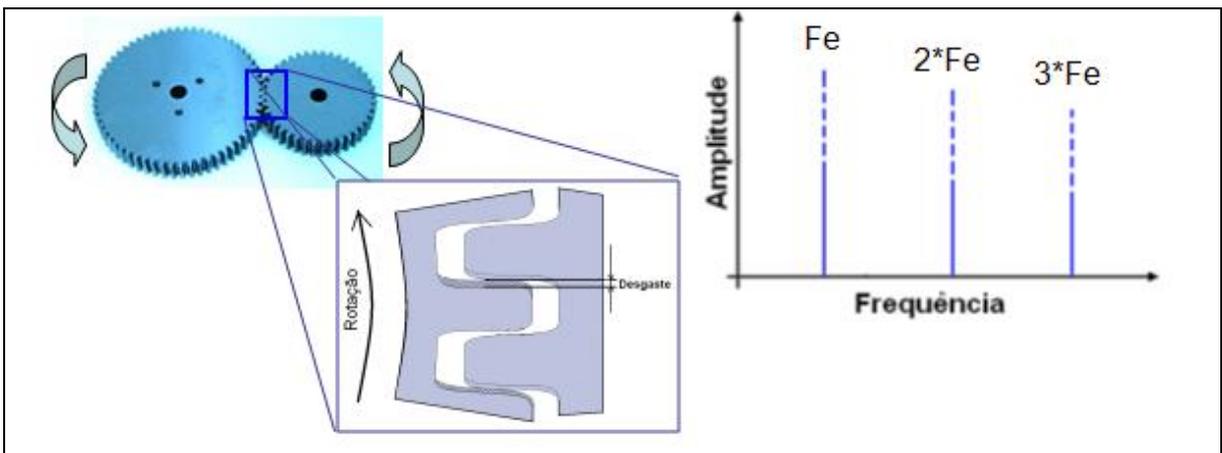
Fonte: Mathias (2012).

FIGURA 12 – Espectro de amplitude x frequência.

O sinal coletado em um engrenamento sem falhas demonstra a frequência de engrenamento F_e e seus harmônicos.

2.4.2 Desgaste dos dentes

Quando os dentes das engrenagens forem desgastados, surgindo folgas entre o conjunto, a velocidade da rotação não irá mudar, porém passará a surgir choques (impactos) entre os dentes que se manifestam no sinal com uma evolução no aumento da amplitude da Fe (Figura 13).

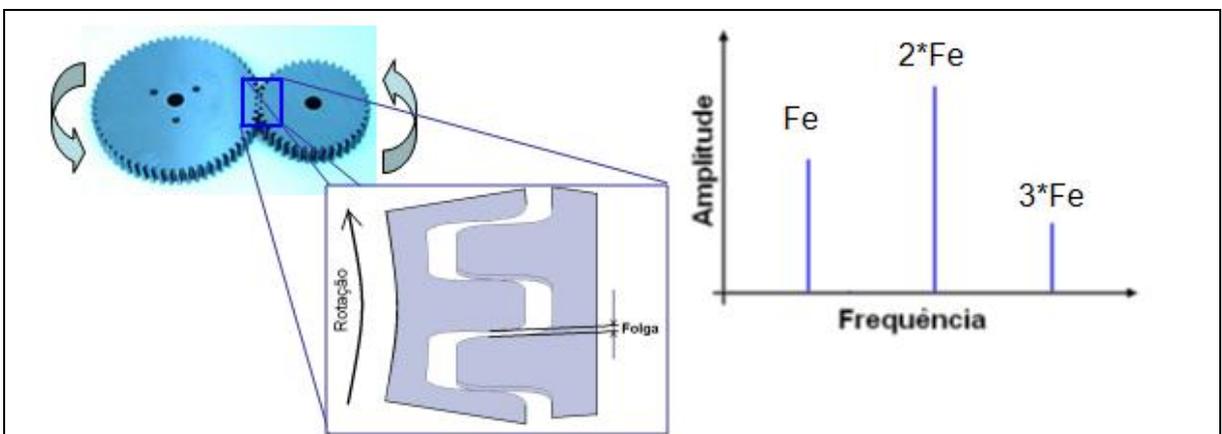


Fonte: Mathias (2012).

FIGURA 13 – Engrenagem com desgaste nos dentes.

2.4.3 Folga insuficiente entre os dentes

Se houver folga entre os dentes, e se esta for muito pequena haverá um esforço extra no engrenamento e no desengrenamento, alterando o espectro de vibração e aumentando em até duas vezes a amplitude da frequência de engrenamento, (Figura 14).

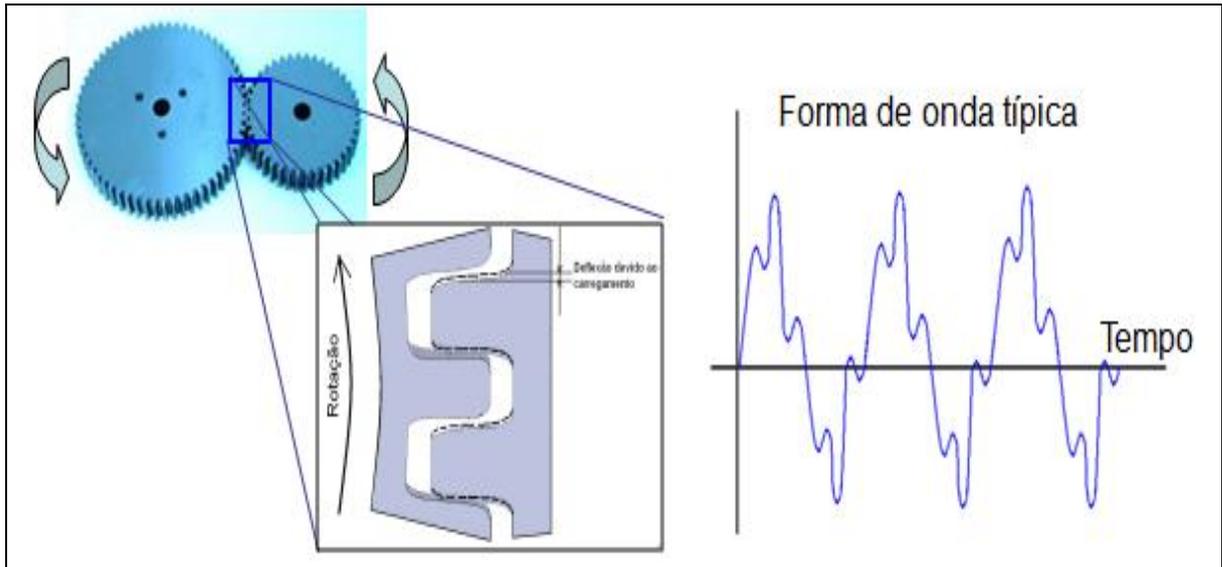


Fonte: Mathias (2012).

FIGURA 14 – Folga insuficiente entre os dentes.

2.4.4 Deflexão devido ao carregamento

O dente da engrenagem sofre deflexão quando em função do esforço da carga, resultando em um diferente número de dentes com a alteração na carga e na rotação, o que responde em sinal distorcido na frequência de engrenamento (Figura 15).

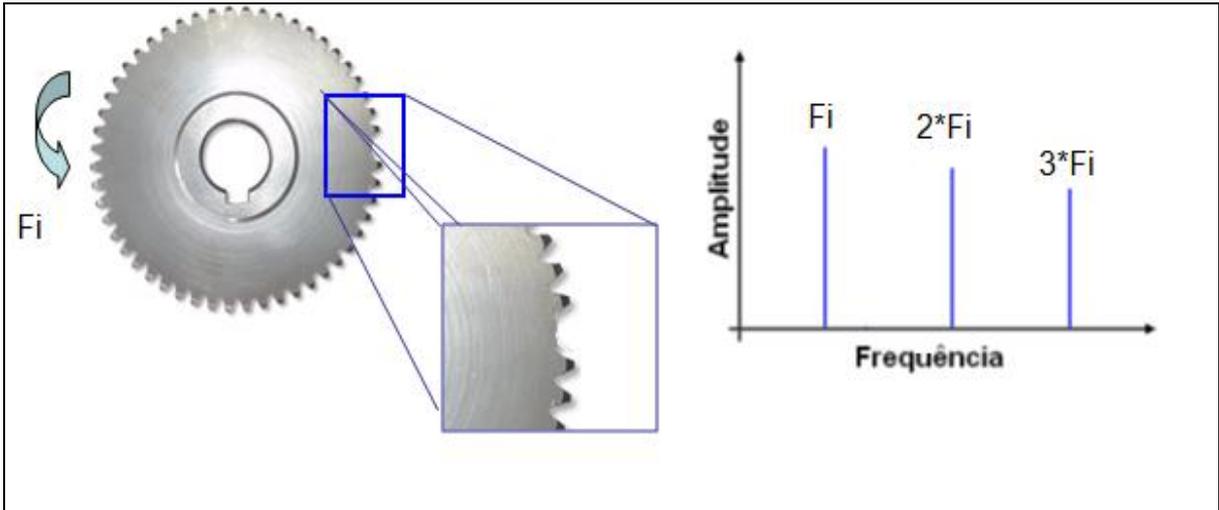


Fonte: Mathias (2012).

FIGURA 15 – Deflexão devido ao carregamento.

2.4.5 Dente quebrado

A passagem de um dente quebrado provocará um choque (impacto) a cada volta completa, o espectro de vibração na frequência da rotação da engrenagem, com o dente quebrado, apresentará uma série de picos sendo harmônicos da rotação da engrenagem, com sinal de dente quebrado (Figura 16).

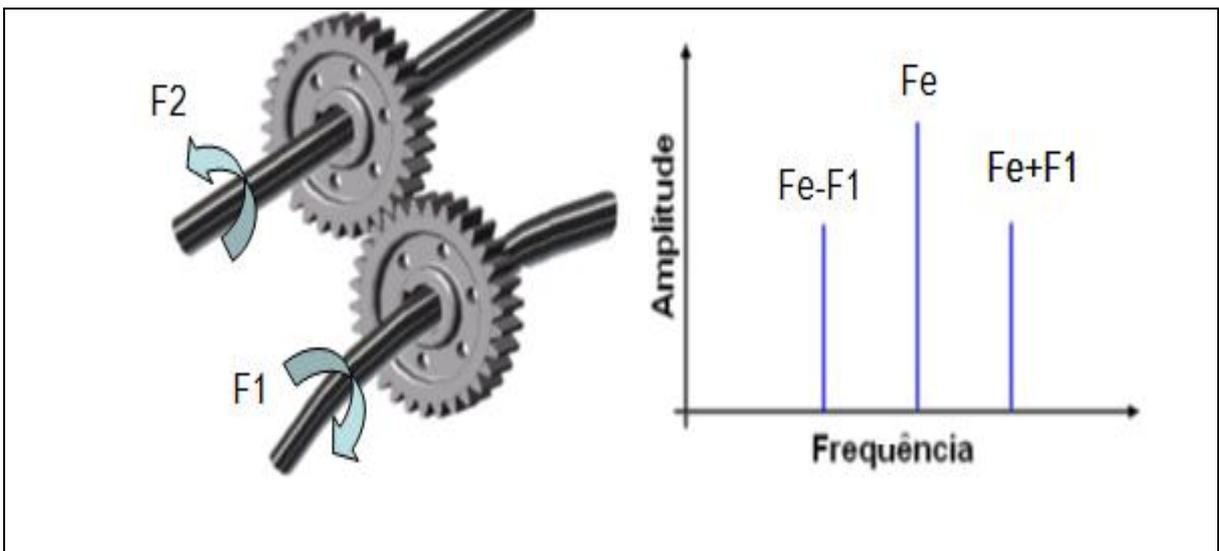


Fonte: Mathias (2012).

FIGURA 16 – Dente quebrado.

2.4.6 Eixo com pinhão ovalizado

A pressão nos dentes do engrenamento sofre uma modulação conforme ocorre a rotação do eixo. O resultado no espectro de vibração apresenta bandas laterais de largura igual à rotação da engrenagem com defeito (F_1) em torno da Frequência de engrenamento (Figura 17).

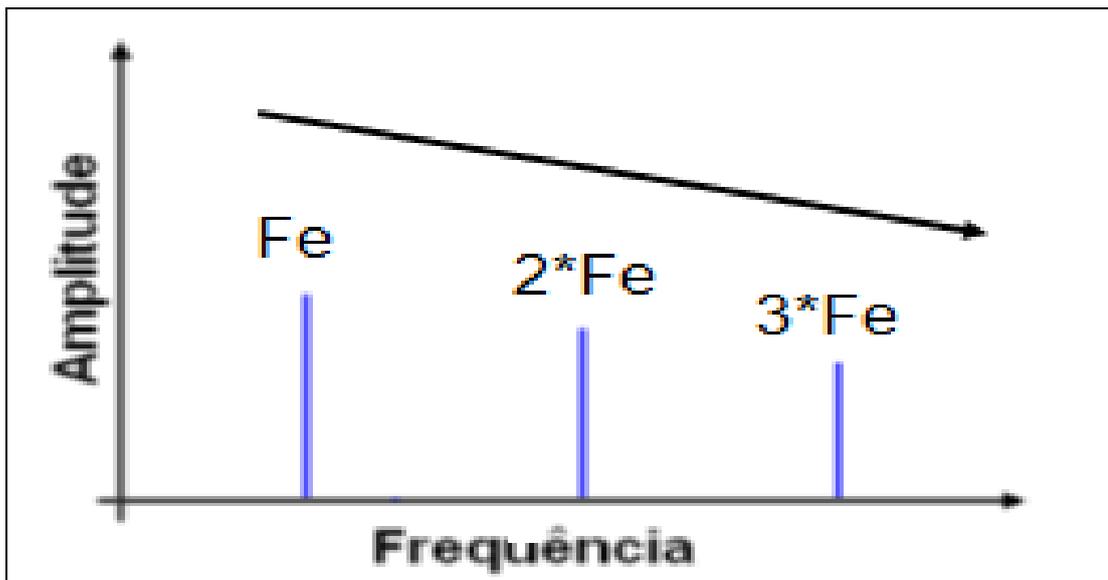


Fonte: Mathias (2012).

FIGURA 17 – Eixo com pinhão ovalizado.

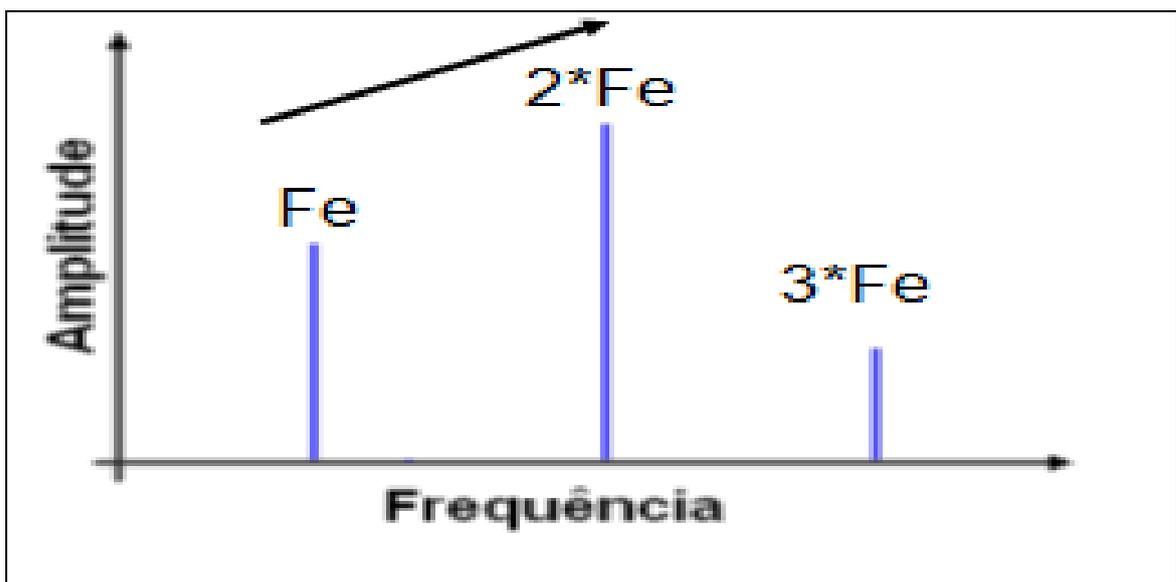
2.4.7 Combinação de falhas

É possível a ocorrência de mais de uma falha no espectro analisado, (exemplo: dente quebrado e ovalização no eixo), isto pode dificultar o laudo da falha. É possível neste caso, analisar a falha através de comparações nas amplitudes geradas no espectro (Figuras 18, 19 e 20).



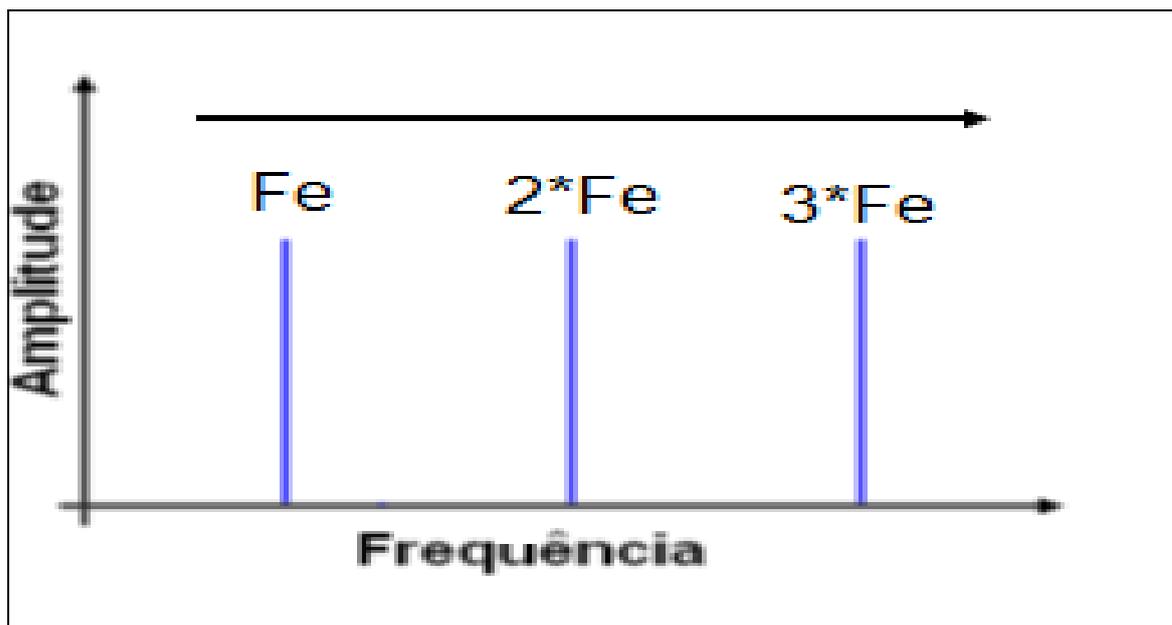
Fonte: Mathias (2012).

FIGURA 18 – Amplitude decrescente – desgaste excessivo.



Fonte: Mathias (2012).

FIGURA 19 – $2 \times Fe > Fe$ – Folga insuficiente.



Fonte: Mathias (2012).

FIGURA 20 – Amplitude constante – Folga excessiva.

Os problemas obtidos em coroas se caracterizam pela frequência de engrenamento, o monitoramento constante do ponto servirá de histórico podendo ser utilizado como gráfico de tendência para média na evolução da falha. É importante ressaltar o percentual de crescimento na amplitude e não só um único valor obtido na análise. Cada caso deve ter um ajuste de alarme analisado e definido. Os ajustes para identificar problemas de engrenamento são através do ponto em aceleração e modulação podendo ser confirmada através de envelope.

2.5 Tipos de manutenção

2.5.1 Manutenção

A manutenção é a forma como o equipamento vai ser reparado ou mesmo quando ele é revisado para que não haja falha. A manutenção é combinação de ações técnicas e administrativas, incluindo as de supervisão, destinadas a manter ou recolocar um item em um estado no qual possa desempenhar sua função (NBR 5.462/94). Também, considerada o conjunto de ações que pretende detectar, prevenir ou corrigir falhas ou defeitos, falhas funcionais ou potenciais, com objetivo de manter condições operacionais e de segurança dos itens, sistemas ou ativos (BRANCO, 2008). A manutenção tem como objetivo gerar condições para que equipamentos e serviços funcionem ajustadamente, visando atingir objetivos e metas de uma empresa (CARVALHO, 2004).

A falha, na área de manutenção é a alteração das condições de um item, máquina, sistema operacional, de importância suficiente para que sua função normal, ou razoavelmente previsível, seja satisfatória. O defeito, no entanto, torna a máquina indisponível, não sendo uma falha funcional, mas, se reparado, ou se não corrigido, levará a máquina ou item à falha e à consequente indisponibilidade com perda da função. Há uma tendência majoritária e consensual, em obras nacionais e internacionais, que consideram que o reparo de um defeito, é sempre manutenção preventiva, pois a máquina não falhou. Assim, a troca de peças com defeito deve ser encarada como manutenção preventiva (BRANCO, 2008).

Para melhor conhecer como ocorre e quais são os tipos de manutenção, faz-se no tópico seguinte, a demonstração dos tipos de manutenção que são: corretiva, preventiva, detectiva e preditiva.

2.5.2 Manutenção corretiva

A manutenção corretiva é aquela feita na máquina quando a mesma apresenta algum tipo de falha (BRANCO, 2008). Esse tipo de manutenção tem por objetivo reparar ou eliminar uma falha ou enguiço que tenha aparecido de maneira inesperada no equipamento, causando sua parada. A gestão em manutenção corretiva é simples e direta: quando uma máquina quebra, conserte-a. Este método de manutenção de maquinaria fabril tem representado uma grande parte das operações de manutenção da planta industrial, desde que a primeira fábrica foi construída, o que parece razoável. Uma planta industrial usando gerência por manutenção corretiva não gasta qualquer dinheiro com manutenção, até que uma máquina ou sistema falhe em operar (ALMEIDA, 2007). Há autores como Xenos (2004), que consideram a manutenção corretiva mais barata que a manutenção preventiva, porém, o mesmo autor ressalta que esse método deve considerar as perdas influídas no processo de interrupção da produção, ao se avaliar o melhor para a empresa, devem-se levar em consideração os fatores econômicos. Em contraposição a essa afirmativa, Almeida (2007, p.02) destaca que “a manutenção corretiva é uma técnica de gerência reativa que espera pela falha da máquina ou equipamento, antes que seja tomada qualquer ação de manutenção. Também é o método mais caro de gerência de manutenção”.

Assim, percebe-se que há divergência entre autores sobre os custos da manutenção corretiva. Porém, é importante frisar que os custos com a paralisação da produção podem onerar muito a empresa, caso haja, necessidade de uma paralisação por um período grande de tempo, sendo então a manutenção preventiva, uma alternativa mais viável. Poucas plantas

industriais usam uma filosofia verdadeira de gerência por manutenção corretiva. Em quase todos os casos, as plantas industriais realizam tarefas preventivas básicas, como lubrificação e ajustes da máquina, mesmo em um ambiente de manutenção corretiva. Entretanto, neste tipo de gerência, as máquinas e outros equipamentos da planta industrial não são revisados e não são feitos grandes reparos até que o equipamento falhe em sua operação (ALMEIDA, 2007).

De acordo com Pinto e Xavier (2001, p.36) “existem duas circunstâncias específicas que levam à manutenção corretiva: desempenho deficiente apontado pelo acompanhamento das variáveis operacionais e ocorrência da falha”. É importante lembrar que os maiores custos associados com este tipo de gerência de manutenção são: altos custos de estoques de peças sobressalentes, altos custos de trabalho extra, elevado tempo de paralisação da máquina, e baixa disponibilidade de produção.

2.5.3 Manutenção preventiva

Esse tipo de manutenção deve ser a atividade principal de manutenção em qualquer empresa. Uma vez estabelecida deve ter caráter obrigatório, sem uma boa manutenção preventiva as falhas tendem a aumentar e ocupar todo o tempo do pessoal de manutenção.

A manutenção preventiva consiste na mais importante ação da manutenção, já que é a atuação no sentido de preservar a função do item, e não somente recolocá-lo em operação após a ocorrência da falha. É uma atuação proativa, de antecipação dos problemas, em oposição à ação reativa representada pela manutenção corretiva (GURSKI, 2008).

As manutenções preventivas nada mais são que ações antecipadas, através de procedimentos diversos, para manter funcionando um determinado equipamento ou máquina.

Abrange ações sistemáticas envolvendo reparos, inspeções e substituições de peças danificadas (VITAL; SILVA JÚNIOR, 2008). Os programas de gerência de manutenção preventiva são acionados por tempo. Em outras palavras, as tarefas de manutenção se baseiam em tempo gastos ou horas operacionais. Nesse sentido, Almeida (2007, p.03) enfoca sobre o tempo da manutenção preventiva da seguinte forma:

A conhecida curva do tempo médio para falha (CTMF) ou da “banheira”, indica que uma máquina nova tem uma alta probabilidade de falha, devido a problemas de instalação, durante as primeiras semanas de operação. Após este período inicial, a probabilidade de falha é relativamente baixa por um período prolongado de tempo. Após este período normal de vida da máquina, a probabilidade de falha aumenta abruptamente com o tempo transcorrido. Na gerência de manutenção preventiva, os reparos ou recondiçamentos da máquina são programados baseados na estatística CTMF.

A manutenção preventiva tem grande aplicação em instalações ou equipamentos cuja falha pode provocar catástrofes ou riscos ao meio ambiente; sistemas complexos ou de operação contínua. Com a utilização desse tipo de manutenção, as empresas tornam-se mais conservadoras, tornando os intervalos de substituição bem menores que o necessário, o que implica em paradas e troca de peças desnecessárias, que acabam por aumentar o custo (BRANCO, 2008). É importante lembrar que ao longo da vida útil do equipamento não pode ser descartada a falha entre duas intervenções preventivas, o que, obviamente, implicará em uma ação corretiva (PINTO; XAVIER, 2001).

2.5.4 Manutenção detectiva

Essa manutenção é nova, ainda não tendo definição certa por vários autores, porém, Pinto e Xavier (2001, p.44) a descrevem como a “manutenção que é efetuada em sistemas de proteção, buscando detectar falhas ocultas ou não perceptíveis ao pessoal de operação e manutenção, preferencialmente pode-se corrigir a situação, mantendo o sistema operando”. Percebe-se que esse tipo de manutenção busca defeitos ou falhas desconhecidas, somente percebidas por seus efeitos indesejáveis.

São tarefas executadas para verificar se um sistema de proteção ainda está funcionando. Um exemplo simples e objetivo é o botão de teste de lâmpadas de sinalização e alarme em painéis, ou o teste que se faz em um detector portátil de H₂S antes de se dirigir a uma área com risco de vazamento de gás (GURSKI, 2008).

A identificação de falhas ocultas é primordial em alguns sistemas para garantir a confiabilidade. Em sistemas complexos, essas ações só devem ser levadas a efeito por pessoal treinado.

2.5.5 Manutenção preditiva

Manutenção preditiva é a atuação realizada com base na modificação de parâmetro de condição ou desempenho do equipamento, cujo acompanhamento obedece a uma sistemática.

Consiste em programar a parada no momento necessário, tanto para a máquina ou equipamento como para o processo produtivo. Sendo possível através do acompanhamento das condições da máquina e como estas condições variam com o tempo (SANTOS, 2010).

Nesse sentido, Almeida (2007) descreve que a manutenção preditiva pode ser comparada a uma inspeção sistemática para o acompanhamento das condições dos equipamentos, tendo por objetivo prevenir falhas nos equipamentos ou sistemas através de acompanhamento de parâmetros diversos, permitindo a operação contínua do equipamento pelo maior tempo possível.

Gurski (2008) enfatiza que o significado do termo manutenção preditiva é o de prever as condições dos equipamentos. Santos (2010, p.19), que “este tipo de manutenção não visa à eliminação dos métodos de manutenção, mas minimizá-los de forma prática, técnica e objetiva, através de acompanhamento, monitoração de parâmetros, com uso de equipamentos e instrumentação adequada”. Ainda no tocante à manutenção preditiva e seu conceito, Branco (2008, p.9) destaca que,

Trata-se da manutenção que prediz o tempo de vida útil dos componentes de equipamentos e máquinas, com base em parâmetros, para que esse tempo de vida seja bem aproveitado. Percebe-se que as providências determinadas em consequência de uma inspeção ou monitoração preditiva serão ordens de serviço de manutenção preventiva ou manutenção corretiva se a falha já estiver instalada.

Destaca-se que esse tipo de manutenção privilegia a disponibilidade à medida que não promove a intervenção nos equipamentos ou sistemas, pois as medições e verificações são efetuadas com o equipamento em produção. Dessa forma, apoia e reduz ao mínimo a manutenção preventiva e reduz o número de intervenções corretivas. É o tipo de manutenção que oferece os melhores resultados, pois intervém o mínimo possível na planta. Para Pinto e Xavier (2001, p.41) é também conhecida por “manutenção sob condição”, que indica as condições reais de funcionamento das máquinas, com base em dados que informam o seu desgaste ou tendência de degradação.

Para cada tipo de profissional essa manutenção tem uma definição. Para os mecânicos, a manutenção preditiva monitora a vibração da maquinaria rotativa numa tentativa de detectar problemas incipientes e evitar falha catastrófica. Para os eletricitas, é o monitoramento das imagens infravermelhas de circuitos, de chaves elétricas, motores e outros equipamentos elétricos para detectar problemas em desenvolvimento (ALMEIDA, 2007).

A manutenção preditiva é uma importante ferramenta para a empresa e, utilizando-se da análise de vibração, torna-se uma ferramenta mais eficiente na coleta de rotina e identificação de problemas incipientes, isso se deve ao fato que a maioria dos equipamentos normais da planta industrial é mecânico, ou seja, acionados por motores elétricos (SANTOS, 2010). Sendo assim, a premissa comum da manutenção preditiva é que o monitoramento

regular da condição mecânica real, o rendimento operacional, e outros indicadores da condição operativa 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, 2007).

A decisão de intervenção neste tipo de manutenção é tomada quando o grau de degradação se aproxima ou atinge o limite previamente estabelecido. Este tipo de acompanhamento permite a preparação prévia do serviço, além de outras decisões e alternativas relacionadas com a produção (GURSKI, 2008). No entanto, é relevante que se leve em consideração as variáveis que influenciam no processo de manutenção preditiva, que são condições básicas para adotar esse tipo de manutenção na empresa, como:

- O equipamento, sistema ou instalação, deve permitir algum tipo de monitoramento/medição;
- O equipamento, sistema ou instalação deve merecer esse tipo de ação em função dos custos envolvidos;
- As falhas devem ser oriundas de causas que possam ser monitoradas e ter sua progressão acompanhada; e seja estabelecido um programa de acompanhamento, análise e diagnóstico, sistematizado.

Os fatores indicados para a análise da adoção de política de manutenção preditiva são os aspectos relacionados com a segurança pessoal e operacional, a redução dos custos pelo acompanhamento constante das condições dos equipamentos, evitando intervenções desnecessárias; e a manutenção dos equipamentos operando, de modo seguro, por mais tempo. Utilizando-se para tanto, aparelhos que façam a medição das variações dos equipamentos, analisando-se as vibrações, desempenho, temperatura, pressão e aceleração dos equipamentos, através de instrumentos próprios para esses tipos de análises (ALMEIDA, 2007; GURSKI, 2008). Quanto às vantagens deste tipo de manutenção, Petrilli et al. (2012, p.02), destacam que ela pode “predizer a falha, evitar intervenções desnecessárias, aproveitar a vida útil total de cada componente e de um equipamento, aumentar o grau de confiança, otimizar a disponibilidade, diminuir a ocorrência de falhas e ainda reduzir os custos de manutenção”.

Como se pode perceber este tipo de manutenção é ideal para empresas que desejam trabalhar com um programa de manutenção que minimize as perdas de produção e reduza os custos de manutenção. Destaca-se que, em termos de impacto na produção, a manutenção preditiva é a que oferece melhores resultados, pois intervém o mínimo possível na planta.

Entretanto, é fundamental que, tanto o pessoal de manutenção como os técnicos de operação responsáveis pelas análises e diagnósticos sejam bem treinados e estejam, de fato, comprometidos com as políticas e diretrizes da manutenção (SANTOS, 2010).

Conforme descreve Pereira (2009) esse tipo de manutenção permite garantir a qualidade de serviço desejada, com base na aplicação sistemática de técnica de análise, utilizando-se meios de supervisão centralizados ou de amostragem para reduzir ao mínimo a manutenção preventiva e diminuir a manutenção corretiva. Neste contexto, Santos (2010) enfatiza que este tipo de manutenção utiliza-se de ensaios elétricos, análise de vibrações, análise de óleos, análise de temperatura e energia acústica.

Pode-se dizer que os tipos de manutenção são a base para que se possa diferenciar e programar de forma coerente todas as atividades de manutenção. Fica como tarefa básica para os ATP's - (responsáveis pela descrição e liberação das ordens), direcionar corretamente aos técnicos de manutenção as OM's - (Ordem de Manutenção), geralmente desdobrado pelos supervisores de manutenção (XENOS, 2004).

2.6 Normas técnicas

2.6.1 Norma NBR 7497

Desde o início das criações das máquinas, surgiu um fator de muita influência nos projetos, o fator “vibração”, que é o movimento alternativo de um corpo ao redor de uma posição de equilíbrio, causado por uma força indesejável. O valor desta amplitude que se altera de máxima a menor posição, ou seja, descreve movimentos oscilatórios em relação à referência, onde a sua frequência é dada em Hz (ABNT, 2000; NBR 7497/1982).

2.6.2 Norma NBR 15928

Ensaio não destrutivo – Análise de vibrações – Terminologia:

- Define a terminologia e os termos empregados em vibrações mecânicas, choques e aplicações em monitoramento de máquinas.
- A norma ISO correspondente à ela é a ISO 13372, que trata do vocabulário usado no monitoramento de condição de máquinas.
- A NBR 15928 cancela e substitui a NBR 7497 (ABNT, NBR 15928, 2011).

2.6.3 Norma NBR 10082

Ensaio não destrutivo – Análise de vibrações – Avaliação da vibração mecânica de máquinas com velocidades de operação de 600 a 15000 rpm.

- Estabelece as regras a serem utilizadas na avaliação do estado de funcionamento de 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 no pedestal que suporta o mancal. Além disso, ela estabelece valores comparativos para que se possa avaliar e comparar o funcionamento de máquinas em geral.
- NOTA: Esta norma não se aplica ao controle de ruído. E é aplicável somente à vibrações medidas na superfície da máquina.

1) Tipo de máquina e Potência desenvolvida:

- Grupo 1: Potência acima de 300 kW. A maioria dos equipamentos possui mancais de escorregamento e recomenda-se o uso de sensores sem contato.
- Grupo 2: Potência entre 15 kW e 300 kW. Normalmente possuem mancais de rolamento e rotação acima de 600 rpm.

NOTA: As bombas são tratadas em norma específica.

2) Flexibilidade do suporte dos mancais:

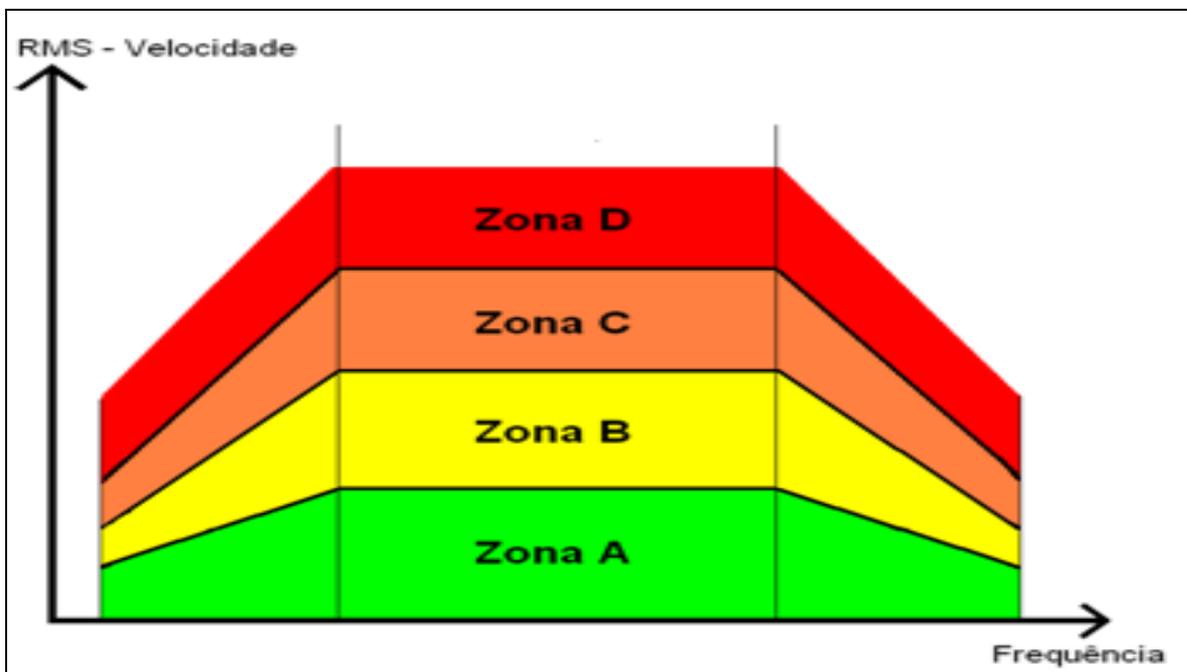
Efetuada de acordo com as características dinâmicas da montagem dos mancais na direção de medição, podendo ser:

- Montagem rígida: Quando a menor frequência natural do conjunto for pelo menos 25% superior à maior frequência de rotação do equipamento.
- Montagem flexível: Quando não obedece a regra da montagem rígida.
- Na avaliação da severidade de vibração em máquinas rotativas são estabelecidos três critérios:
 - 1º Magnitude de vibração;
 - 2º Variação de magnitude da vibração;
 - 3º Avaliação da severidade por meio de análise espectral do sinal.

1º Magnitude de vibração

A vibração máxima em cada mancal é avaliada de acordo com zonas de avaliação (A, B, C e D) para cada classe de montagem (Figura 21).

- Zona A: Máquinas novas, em comissionamento ou revisadas;
- Zona B: Vibrações dentro desta zona são consideradas aceitáveis para operação de longo termo.
- Zona C: Vibração nesta zona não permitida para operação em longo termo. Normalmente a máquina pode ser operada por certo período nesta condição até aplicação de ações corretivas.
- Zona D: Vibração com energia suficiente para danificar a máquina.



Fonte: Norma NBR 10082

FIGURA 21 – Gráfico zona de classificação.

2º Variação de magnitude da vibração

Uma alteração na magnitude de vibração, da ordem de um desvio-padrão para cima ou abaixo do valor de referência, é considerada uma alteração significativa no estado de funcionamento. Quando ocorrer tal efeito, é necessária uma investigação em comparação com histórico de vibração para determinar a causa da variação.

NOTA: Para isto se tornar válido, é necessário que todas as medidas comparadas tenham sido feitas no mesmo ponto.

3º Avaliação da severidade por meio de análise espectral do sinal

Este critério aplica-se unicamente a equipamentos com rolamentos e motores elétricos, pois ele é destinado a identificar e avaliar fontes de vibração com pouca energia, mas caso estejam presentes no espectro de frequência podem evoluir rapidamente e causar danos.

Se for encontrada uma frequência de vibração vinda do rolamento ou do motor elétrico, o equipamento deve ser enquadrado na zona C. Caso a magnitude chegue a 1 mm/s-rms, deve ser classificado na zona D. (ABNT NBR 10082, 2011).

2.6.4 Norma ISO 10816

Vibrações mecânicas – Avaliação da vibração de máquinas através de monitoramento de partes não rotativas.

- Parte 1: Instruções gerais
- Parte 2: Turbinas a vapor fixas ao solo e geradores com capacidade maior que 50 MW com rotações normais de operação de 1500 rev/min, 1800, 3000 e 3600 rev/min.
- Parte 3: Máquinas industriais com potência nominal acima de 15 kW e velocidades nominais entre 120 e 15000 rev/min quando medidos in situ.
- Parte 4: Turbinas a gás com rolamentos filme-fluido.
- Parte 5: Máquinas de geração de força hidráulica e plantas de bombeamento.
- Parte 6: Máquinas recíprocas com potência acima de 100 kW.
- Parte 7: Bombas de rotor para aplicações industriais, incluindo monitoramento de eixos rotativos.

2.6.5 Norma ISO 10816-1

Vibrações mecânicas – Avaliação da vibração de máquinas através de monitoramento de partes não rotativas.

- Classificação das máquinas:
 - Classe I: partes individuais de motores e máquinas, integralmente conectadas à máquina completa em sua condição de operação normal (p. ex. motores elétricos de até 15 kW).

- Classe II: máquinas de tamanho médio sem fundação especial (motores elétricos de 15 kW a 75 kW), motores ou máquinas montados rigidamente sobre fundação especial (até 300 kW).
- Classe III: grandes turbinas ou motores grandes e outras máquinas grandes com massas rotativas montadas sobre fundação dura e pesada, e relativamente rígida.
- Classe IV: grandes turbinas ou motores grandes e outras máquinas grandes com massas rotativas montadas sobre fundações relativamente moles (p/ex. conjunto de turbo gerador e turbinas a gás com produção maior do que 10 MW), (Quadro 1).

QUADRO 1 – Classificação das máquinas.

RMS velocity [mm/s]	class I	class II	class III	class IV
0,28	A	A	A	A
0,45				
0,71				
1,12	B	B	B	B
1,8				
2,8	C	C	C	C
4,5				
7,1	D	D	D	D
11,2				
18				
28				
45				

Fonte: Norma ISO 10816-1

2.6.6 Norma ISO 7919

Vibrações mecânicas – Avaliação da vibração de máquinas através de monitoramento de partes rotativas.

- Parte 1: Instruções gerais
- Parte 2: Turbinas a vapor fixas ao solo e geradores com capacidade maior que 50 MW com rotações normais de operação de 1500 rev/min, 1800, 3000 e 3600 rev/min.
- Parte 3: Máquinas industriais acopladas.
- Parte 4: Turbinas a gás com rolamentos filme-fluido.
- Parte 5: Máquinas de geração de força hidráulica e plantas de bombeamento.

2.6.7 Norma ISO 7919-1

Vibrações mecânicas – Avaliação da vibração de máquinas através de monitoramento de partes rotativas.

Esta parte da ISO estabelece diretrizes gerais para medição e avaliação de vibração de máquinas por meio de medições feitas diretamente em eixos de rotação com a finalidade de determinar vibração do eixo em relação à:

- mudanças no comportamento vibracional;
- carga cinética excessiva;
- o monitoramento da folga radial.

É aplicável a medições de vibração do eixo absolutos e relativos radial, mas exclui vibração do eixo de torção e axial. Os procedimentos são aplicáveis tanto para o monitoramento operacional das máquinas e para os testes de aceitação em um suporte de teste e após a instalação. Orientações também são apresentados para a fixação de limites operacionais.

2.7 Aparelho analisador de vibrações

O analisador portátil é uma ferramenta aplicável às coletas em campo de dados de monitoramento de máquinas. Permite conexão a vários tipos de sensores e possui programação interna para coletas variadas. É um equipamento de medição manual com função de registro de dados para a supervisão off-line de equipamentos e máquinas (supervisão de estado / *Condition Monitoring*).

Para esta finalidade o equipamento registra, em pontos de medição previamente definidos, sinais de vibração com um sensor, e calculam, a partir disto, os valores efetivos de velocidade de vibração, aceleração de vibração e de modulação, os chamados valores característicos, para a caracterização do estado da máquina ou componente. Além disso, dispõe da possibilidade de medir temperaturas com um sensor infravermelho. Após uma ronda de medição, os valores característicos apurados e eventuais sinais temporais registrados são transmitidos a um computador, e lá avaliados, analisados e exibidos graficamente com o software. O local exato do ponto de medição dentro do equipamento a ser supervisionado está armazenado na configuração. Além disso, lá estão armazenados para cada ponto de medição a sensibilidade de sensor válida e os valores limite para alarme principal ou pré-alarme.

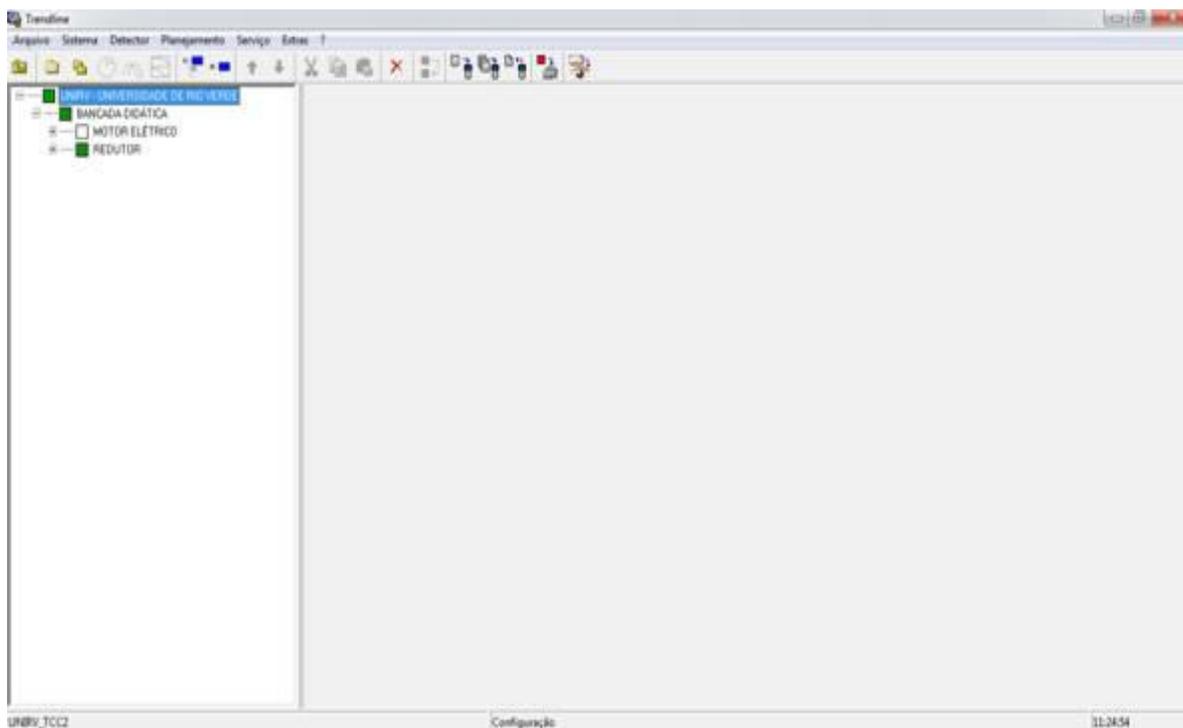
A configuração é elaborada com o software e transmitida antes da medição para o coletor de vibração. Para a medição, o sensor de vibração é colocado por meio de um pé magnético num ponto de medição previamente determinado. Se isto não for possível devido ao material da carcaça (p/ex. alumínio), é necessário colocar no ponto de medição uma chapinha de ferro ou uma arruela plana do tamanho do pé magnético. A maneira mais fácil para isto é com uma cola de cura rápida (p/ex. cola de ciano-acrilato). Não é selecionado o ponto de medição na configuração e iniciada a medição.

O coletor de vibrações registra os sinais de sensor em banda larga e calcula os valores característicos. Estes valores característicos são salvos e transmitidos ao computador após a campanha de medição. Para cada ponto de medição os novos valores característicos medidos são comparados com os valores limite definidos para este ponto de medição para um alarme principal ou pré-alarme. As ultrapassagens de valores limiars são exibidas pelo coletor de vibrações (alarmes principais) e pelo software (alarmes principais e pré-alarmes). Os valores característicos novos são salvos. Estes podem ser exibidos graficamente no software, em função do momento da medição. Além da medição *Condition Monitoring* (medição da supervisão de estado, doravante chamada simplesmente de medição CM), o coletor de vibrações domina o chamado balanceamento operacional. O coletor de vibrações apoia-se nisto com a medição de balanceamento, para encontrar a posição ideal de pesos de balanceamento. Estes servem para a compensação de desbalanceamentos em componentes rotativos, aumentando assim a sua vida útil (FAG – *SCHAEFFLER GROUP INDUSTRIAL*) (Figuras 22 e 23).



Fonte: FAG (2014).

FIGURA 22 – Coletor de vibração.



Fonte: Própria.

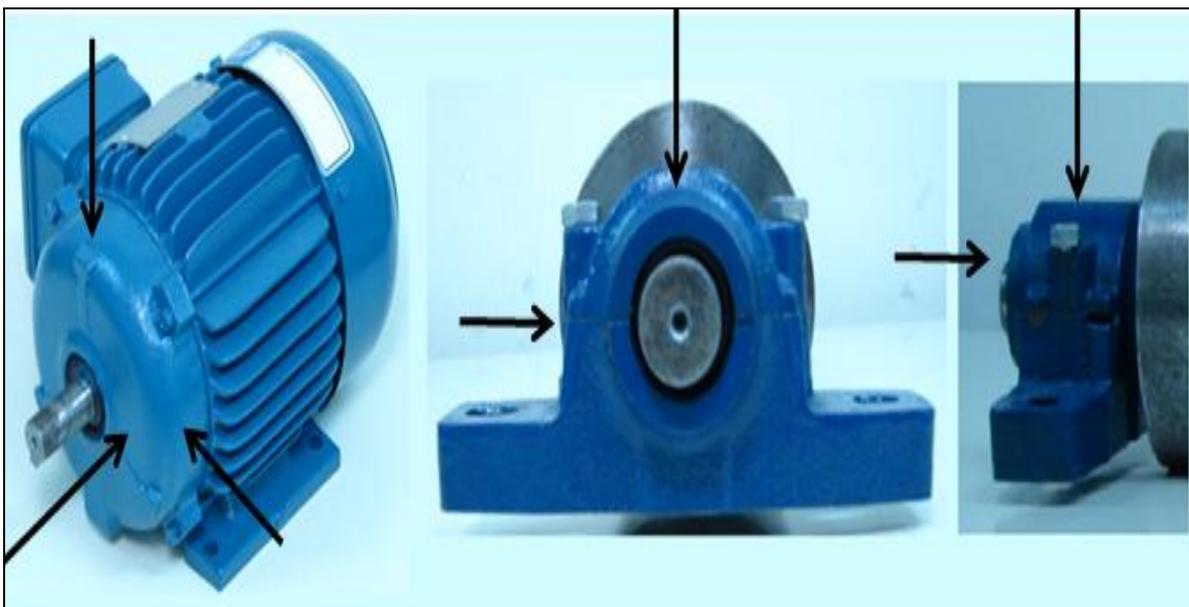
FIGURA 23 – Software de vibração.

2.7.1 Pontos de medição

Pontos de medição para monitoramento de máquinas:

- mancais são pontos obrigatórios;
- evitar pontos flexíveis em carcaças;
- em cada ponto estabelecer claramente as direções de medida - horizontal, vertical ou axial;
- os pontos escolhidos devem ser perfeitamente acessíveis, marcados de maneira visível no próprio equipamento;
- pontos de medição devem ser retos, limpos e isentos de graxa;
- o sensor e o cabo não devem ser movidos durante a operação de medição.

Os pontos de medição são definidos de acordo com o item 4.2 da norma ABNT NBR 10082 (Figuras 24 e 25).



Fonte: Mathias (2012).

FIGURA 24 – Pontos de medição.



Fonte: Mathias (2012).

FIGURA 25 – Pontos de medição.

2.8 Análise de vibração no domínio do tempo

O princípio de análise de vibrações está baseado na ideia de que as estruturas das máquinas, excitadas pelos esforços dinâmicos, dão sinais vibratórios cuja frequência é idêntica àquelas dos esforços que os tenham provocado; e a medida global tomada em algum

ponto é a soma das respostas vibratórias da estrutura aos diferentes esforços excitadores (WANG; WILLIANG, 1995).

Pode-se, pois, graças a captadores colocados em pontos particulares, registrar as vibrações transmitidas pela estrutura à máquina, e graças, ainda, à sua análise, identificar a origem dos esforços aos quais ela está submetida (MIRSHAWKA, 2001; DIANA; CHELIF, 2003).

Dessa forma, assim que se obtém a "assinatura" vibratória da máquina quando ela era nova ou reputada como em bom estado de funcionamento, poder-se-á, por comparação, apreciar a evolução de seu estado e identificar o aparecimento de esforços dinâmicos novos, consecutivos a uma degradação em processo de desenvolvimento (AZOVTSEV; BARKOV, 1998).

Pode-se representar um nível vibratório de várias formas e a mais importante é a Representação Espectral ou frequencial (MIRSHAWKA, 2001).

Na maior parte das medidas de vibração é mais fácil trabalhar no domínio das frequências que no domínio do tempo (BREITENBACH, 1999).

Um sinal no domínio do tempo enviado por um transdutor é convertido em suas componentes de frequência. As forças existentes podem ser (SAAVEDRA; ESPINOZA, 1987):

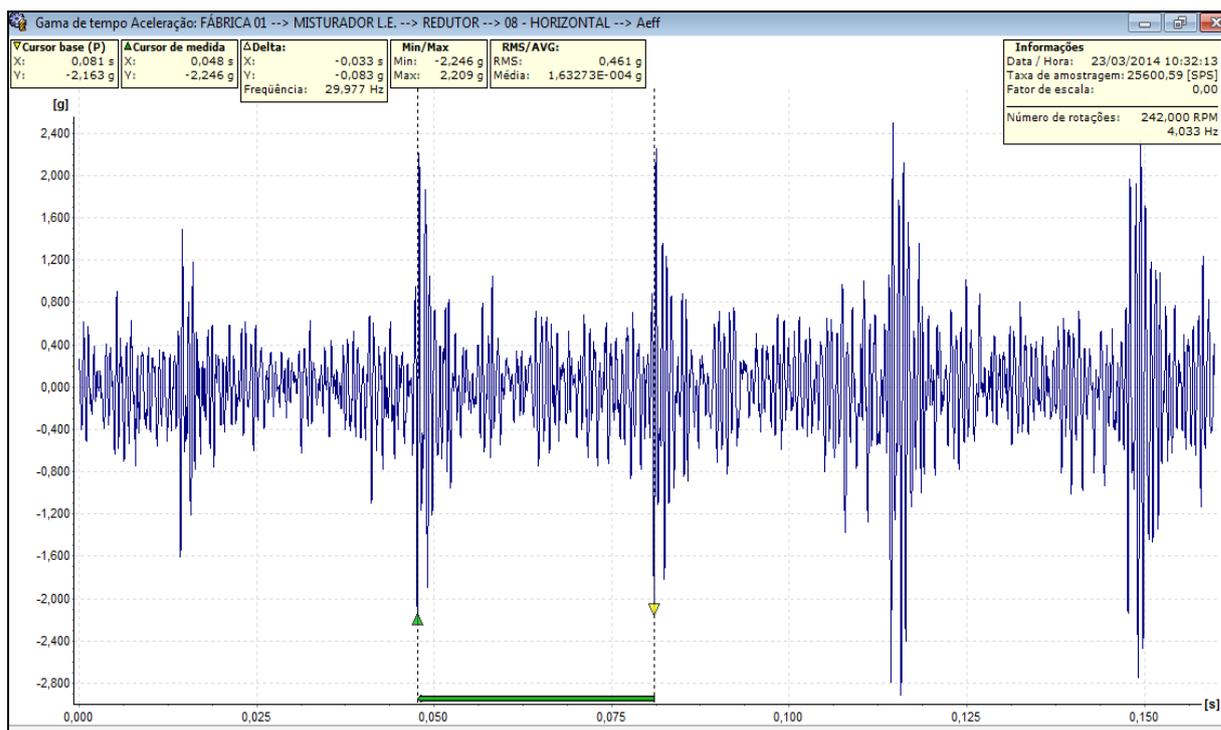
- cíclica: desbalanceamento, ou forças da malha de engrenamento que desenvolvem um espectro em forma de linha;
- impulsiva: pitting nos mancais, dente de engrenagem quebrado que desenvolve um espectro modulado;
- randômica: fricção, cavitação que geram espectro contínuo. Em um espectro, todos os componentes de um nível vibratório são representados sob a forma de "picos" e pode-se seguir individualmente uma variação de amplitude, sem que se tenha, como acontece na medida global, o efeito de mascarar, onde pode ocorrer o risco de não notar um defeito em desenvolvimento.

A forma de onda é a representação do sinal no domínio do tempo. Ela mostra o que está acontecendo a cada instante no tempo. O exame da forma de onda pode revelar detalhes importantes das vibrações que não são visíveis nos espectros de frequência.

Sua principal aplicação é identificar a ocorrência de eventos de curta duração, como impactos, e determinar a sua taxa de repetição. O sinal no domínio da frequência ou espectro de frequência é um gráfico de amplitude da resposta de vibrações pela frequência e

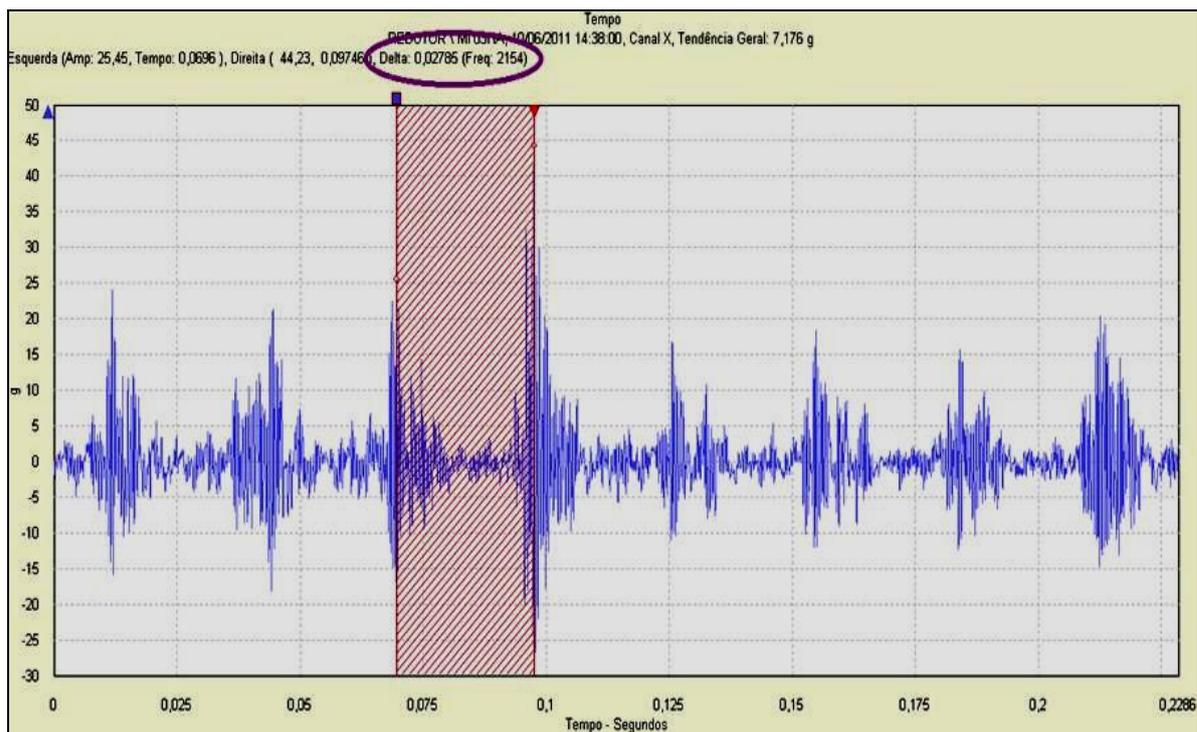
pode ser derivado utilizando-se a transformada rápida de Fourier (FFT) da forma de onda no tempo. O espectro de frequência fornece uma informação valiosa sobre a condição de uma máquina (COPYRIGHT NSK BRASIL, 2004).

Nas figuras 26 e 27, tem-se a forma de onda de um redutor com falhas pontuais nos dentes de um engrenamento, mostrando o sinal no tempo.



Fonte: Própria (2014).

FIGURA 26 – Espectro no domínio em ondas no tempo.



Fonte: Própria (2014).

FIGURA 27– Espectro no domínio em ondas no tempo.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para se estudar a eficiência da integração da análise de vibrações, um experimento foi conduzido. Este consistiu de um motor acoplado a um redutor de velocidade. Onde foi feita uma coleta de vibração no estado normal da máquina, logo após provocou-se uma quebra no dente do engrenamento e realizaram-se novas medições no redutor, provando que a análise de vibração e a técnica no domínio do tempo, é uma das ferramentas essenciais para detectar falha na máquina. As paradas inesperadas e as perdas de produção referentes à quebra de equipamentos e ou processos deficientes estão entre os problemas mais agravantes e de maior atenção nos mais diversos ramos industriais.

3.1 Montagem da bancada didática

Para o melhor entendimento da análise de vibração e a necessidade de facilitar sobre o assunto, foi idealizada a construção de uma bancada didática pedagógica a fim de ajudar o acompanhamento e interação entre o estudo teórico e o prático sobre a análise de vibrações em redutores.

A bancada foi construída e projetada para fins de estudos dinâmicos, a qual é constituída por um sistema motor elétrico, inversor de frequência e redutor.

Na parte elétrica possui um motor marca Weg com modelo de carcaça 71, rotação de 1680 rpm, potência 0,37 HP/0,50 CV, um inversor de frequência marca WEG CFW 08, o qual pode variar sua frequência de 0 a 80 Hz, sendo alimentado a uma tensão de 220 V.

Na parte mecânica possui um redutor marca Cestari com modelo C51224NA00AW, potência 0,37 Kw, rotação de entrada 1750 RPM, rotação de saída 110,06 RPM e fator de serviço 4,45.

Após estas definições dos parâmetros e procedimentos construtivos, partiu-se para a estrutura base estrutural de viga U de 8" x 1.200 mm, assim como o esquadrejamento das cantoneira de 1" x 1.200 mm, responsáveis pela base bancada.

Depois do esquadrejamento, iniciaram-se os procedimentos de montagem da base, as peças são montadas em uma sequência pré-definida, onde as cantoneiras A e B são

esquadrejados sobre a viga U. Após os mesmos serem devidamente esquadrejados, estes foram soldados com pontos de 4 a 6 mm, pelo processo de soldagem com eletrodos, revestidos 46 de 2 1/2 em uma amperagem de 180 A. O próximo passo, logo após este ponteamto, foi partir para o procedimento de montagem dos componentes da bancada, sendo incluso nestes procedimentos a soldagem e usinagem (perfuração) da viga U, sendo utilizadas durante este processo algumas ferramentas básicas para o processo de usinagem.

Foram utilizadas ferramentas de perfuração, destinadas ao processo de usinagem interna que se destina a abertura de furos, sendo esta operação constituída de uma furação, utilizando-se uma broca de aço rápido com dois cunhos de corte refrigerada manualmente.

Fez-se conferência geral de medidas e esquadros, certificando-se de que as mesmas atendiam as especificações do projeto foi dado início ao processo de soldagem final da estrutura principal de forma homogênea e continua. A fim de obter uma soldagem sem a formação de escórias (resíduos indesejáveis redutores de resistência) e de boa aparência, já que, por motivos de resistência mecânica, os cordões de solda não deveriam ser desbastados.

Após a soldagem da bancada, foi feita uma nova montagem completa e experimental dos componentes a fim de se confirmar os ajustes e encaixes. Esta montagem foi satisfatória e, logo a seguir, foi novamente desmontada e deu-se início a etapa de acabamento, sendo realizada uma limpeza das superfícies utilizando-se thinner 1700 e estopas com a finalidade de se remover resíduos inibidores à aderência do fundo preparador, sendo este fundo aplicado pelo sistema de pulverização, com o auxílio de uma pistola destinada à pintura, alimentada com ar comprimido oriundo de um compressor regulado a uma pressão de 40 bar. Este fundo é preparado em uma solução de 60% primer e 40% thinner 1700.

Depois da aplicação do fundo preparador, foi feita uma seleção e diluição dos esmaltes sintéticos, sendo estes esmaltes os responsáveis pela proteção da superfície do metal e assim servindo como elementos responsáveis por um aspecto de qualidade e beleza da bancada. Após a seleção da cor e a homogeneização de uma solução, contendo 75% esmalte sintético e 25% de thinner 1700 (solvente), foi realizada a pintura da bancada pela técnica de pulverização da solução pigmentada, seguindo o procedimento de duas demãos em sentido contrário a fim de realizar uma cobertura uniforme sem excesso de tinta, sendo esta pulverização realizada através de uma pistola de ar direto, a qual é alimentada por um compressor, a uma pressão de 40 bar.

Concluída a pintura final e secagem, a bancada (figura 28) foi instalada no laboratório de Engenharia Mecânica da UniRV.



Fonte: Própria (2014).

FIGURA 28 – Bancada didática concluída.

3.2 Configurar o ponto de medição no software Trendline

3.2.1 Função de lembrete para o ajuste de limiar de alarme

O Trendline-Software pode lembrar ao usuário do ajuste de limiar de alarme. Para isso, marca-se campo aplicar à função de lembrete para o ajuste do limiar do alarme e selecione quando deseja ser lembrado (FAG – SCHAEFFLER GROUP INDUSTRIAL, 2014), (Figura 29).

Nome Spind.A front.Axi

Info | Configuração geral | Dados medidos

Aplicar a função de lembrete para o ajuste do limiar do alarme...

após um período de tempo: ... dias após a primeira medição 7 dias

Opções de RFID e de comentário

Estado RFID: Atribuir RFID

Número RFID: 0000000000000000

Entrada de comentário no Detector: Apenas seleção manual

Sensor

Aceleração: Active 100 mV/g (Standard)

Temperatura: Tecpel 510

Trigger: Optical (Banner Minibeam SM312LVQD)

Gama de tempo

Média do valor característico: sem formação de média

	Número de médias	Linhas FFT	Armazenar sinal de tempo	Passa baixa
Sinal temporal velocidade	1	1600	Sempre	1000
Sinal temporal aceleração	1	1600	Sempre	20000
Demodulação sinal de tempo	1	1600	Sempre	1000

Número de rotações

Adquirir rotação

Número de rotações nominal: 2000,00 [U/min]

Desvio máximo permitido: ± 5,00 [U/min]

Pulsos por rotação: 1

Lista de rolamentos gabarito para medições futuras | Frequências cinemáticas adicionais para a análise

Fabricante	Nome	Fator de correção da velocidade (SPF)	Anel externo fixo	Alterar data
SKF	71922ACD	1	<input checked="" type="checkbox"/>	28.11.2003 11:37:54

Fonte: FAG (2014).

FIGURA 29 – Software Trendline.

3.2.2 Opções de RFID e de comentário

Nesta área pode-se acessar e alterar o status de um tag atribuído ao ponto de medição, bem como ajustar opções de comentários no detector (Figura 29).

3.2.3 Estado RFID

- Sem RFID: não há nenhum tag atribuído ao ponto de medição.
- Atribuir RFID: com esta seleção instrui-se o detector para na próxima ronda atribuir a este ponto de medição um tag colocado na máquina.
- RFID atribuído: há um tag atribuído ao ponto de medição. A identificação clara é exibida no campo número RFID.
- Remover RFID: com esta seleção você instrui o detector para cancelar na próxima ronda a atribuição do tag a este ponto de medição.

- RFID com defeito: o detector marcou o tag atribuído como defeituoso.
- Alterar RFID: com esta seleção informa-se o detector que o tag atribuído deve ser substituído. Na próxima medição deve-se remover o tag e atribuir um novo, antes de poder executar a medição neste ponto (Figura 29).

3.2.4 Entrada de comentários no detector

Aqui é possível definir se a cada medição deseja-se introduzir um comentário no detector. Seleccione: (Figura 29).

- apenas seleção manual, se deseja seleccionar manualmente a entrada de comentário.
- mostrar após cada medição, se após cada medição você deseja ser consultado se pretende introduzir um comentário.
- forçar após cada medição, se deve introduzir um comentário a cada medição.

3.2.5 Sensor

Os sensores podem ser ajustados os sensores para as medições de vibrações e a temperatura. Somente podem ser seleccionados os sensores, que introduziu anteriormente na base de dados de sensores verem "adicionar sensor". Pode-se seleccionar respectivamente um sensor para aceleração, temperatura e posição do disparador da base de dados de sensores (Figura 29).

3.2.6 Sinal temporal

Nesta área informa-se como o detector, durante a medição, trata sinais temporais, FFT's e valores característicos. Média do valor característico: Calcula a média das FFT's ou valores característicos calculados dos sinais temporais. Se, p/ex., deve ser calculada a média de quatro valores, então são registrados quatro vezes valores na sequência, a FFT é calculada e são formados os valores característicos (seletivos de frequência). Os sinais temporais salvos para uma medição média sempre são os sinais temporais medidos por último. Seleciona-se FFT, para calcular a média das FFTs calculadas dos sinais temporais e valor característico, para aplicar a média nos valores característicos calculados das FFTs (Figura 29).

- Número de médias: o detector calcula a média dos valores medidos durante o processo de coleta. Indica-se quantos valores devem ser utilizados para determinar a média.
- Sob as linhas FFT você pode-se ajustar a resolução do espectro. Seleciona-se 1600 (correspondente a 4096 amostras) ou 3200 linhas FFT (correspondente a 8192 amostras).
- Com salvar sinal temporal determina-se se um sinal temporal deve ser salvo sempre, nunca, em caso de pré-alarme ou alarme principal.
- Sob passa-baixas seleciona-se de uma lista predefinida uma frequência passa-baixas para a banda de frequência a ser medida. A taxa de amostragem utilizada corresponde sempre a um múltiplo de 2,56 da frequência de passa-baixas selecionada.

3.2.7 Rotação

Se o detector também deve apurar a rotação no âmbito da medição, seleciona-se a opção adquirir rotação. Introduziu-se, além disso, a rotação nominal bem como o desvio máximo permitido dos pulsos por rotação nas respectivas caixas de edição. Se a rotação durante a medição desviar da faixa de rotação aqui definida, o detector emite uma mensagem de erro, mas mesmo assim executa a medição (Figura 29).

3.2.8 Enviar ponto de medição para o coletor de vibração detector III

No software trendline, você pode enviar uma configuração ou uma peça individual para o detector. Para isso, adote os seguintes passos:

- selecionar uma determinada máquina na árvore.
- conectar o detector com o cabo de dados à interface serial.
- ligar o detector.
- Ir para detector enviar da configuração.
- a configuração para a máquina selecionada é enviada com todos os pontos de medição nela contidos ao detector. Se deseja enviar uma configuração completa, deve-se então selecionar a configuração na árvore antes de enviar os dados, por exemplo, na seção "configurar a estrutura do equipamento seria a localidade aachen". É até possível enviar apenas um ponto de medição ao detector, o que pode ser usado, sobretudo, para fins de teste.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Coleta de dados para análise de vibração

Posicionar-se e ajustar o dispositivo do aparelho de coleta de dados de forma correta no equipamento, evitando assim o contato com a máquina em movimento, tanto do colaborador quanto a do aparelho. Os pontos de medição foram previamente definidos para que o colaborador tivesse uma sequência lógica e rápida durante a execução da atividade. O dispositivo foi ser instalado para que o colaborador coletasse os dados sem se expor aos riscos de se aproximar das partes móveis dos equipamentos podendo operá-lo sem se preocupar em sustentar nenhum outro componente que não seja o analisador (Figura 30).



Fonte: Própria (2014).

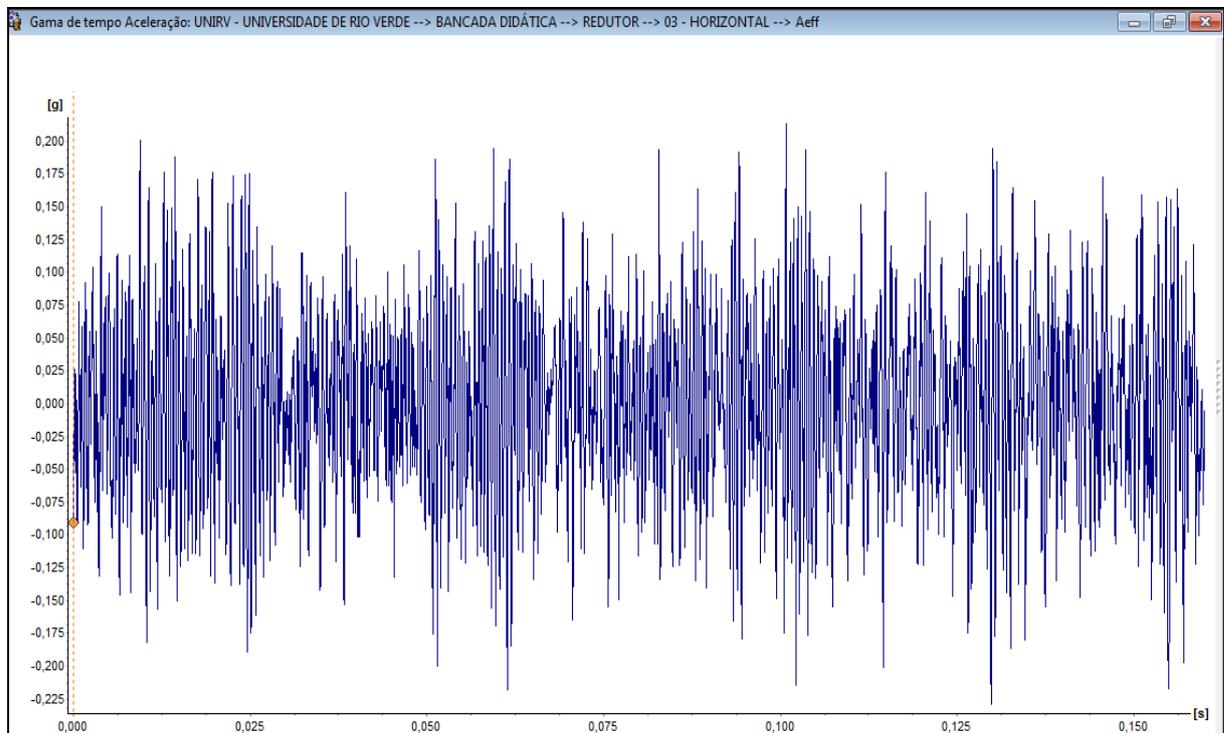
FIGURA 30 – Coleta de dados.

4.2 Descarregamento de dados medidos

Depois que se mediu com o detector, devemos transmitir-se os dados ao software trendline.

- Conectou-se o detector com o cabo de dados ao computador e ligou
- No trendline, clicou em detector - carregar dados do detector.

Além disso, existe a possibilidade de carregar os dados do detector diretamente do planejamento de rotas com planejamento - rota. Agora todos os dados, portanto, configurações, sinais temporais e medições livres são copiados no computador. Este procedimento pode levar alguns minutos, dependendo do volume de dados. Depois que todos os dados foram recebidos, eles são gravados nos respectivos locais na base de dados. Pode acontecer de o programa não poder ordenar os pontos de medição automaticamente, porque, por exemplo, foram registrados medições livres ou a configuração no detector foi elaborada num outro computador. Se este for o caso, é ativado automaticamente o assistente de ordenação, para ordenar as medições em sua árvore de configuração (Figura 31).



Fonte: Própria (2014).

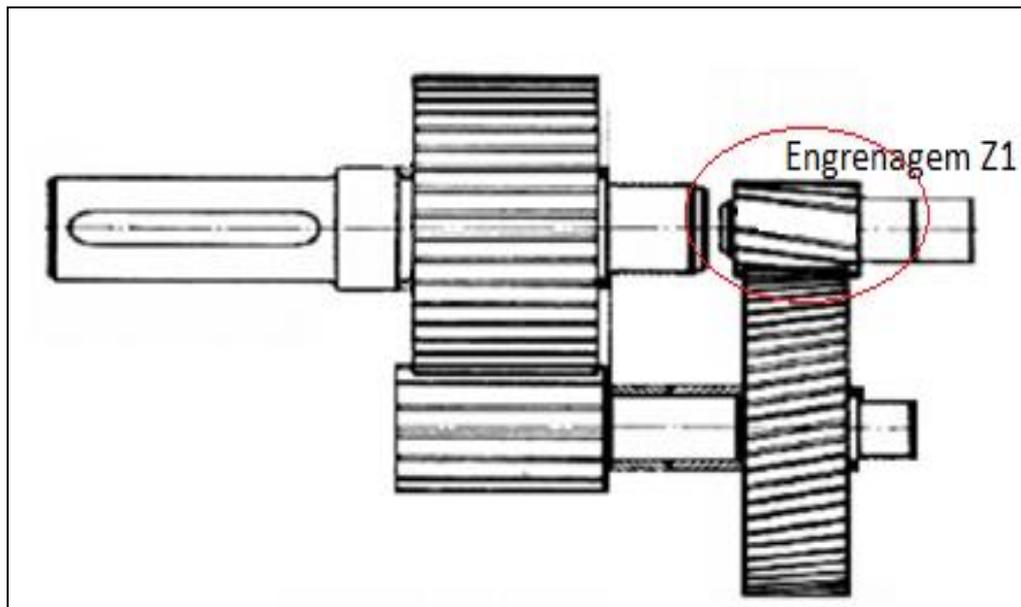
FIGURA 31 – Espectro em formas de ondas no tempo.

4.3 Análise espectral sem defeito na máquina

A primeira coleta de análise de vibrações realizada na bancada didática não houve presença de defeitos, de acordo com a (Figura 31).

4.4 Quebra do dente na engrenagem Z1

Na passagem de um dente quebrado o engrenamento provoca um choque (impacto) a cada volta completa, o espectro de vibração na frequência da rotação da engrenagem, com o dente quebrado, apresentara uma série de picos sendo harmônicos da rotação da engrenagem, com sinal de dente quebrado (Figuras 32 e 33). Ressalta-se que o dente foi quebrado com auxílio de lixadeira.



Fonte: Própria (2014).

FIGURA 32 – Desenho técnico engrenamento redutor.

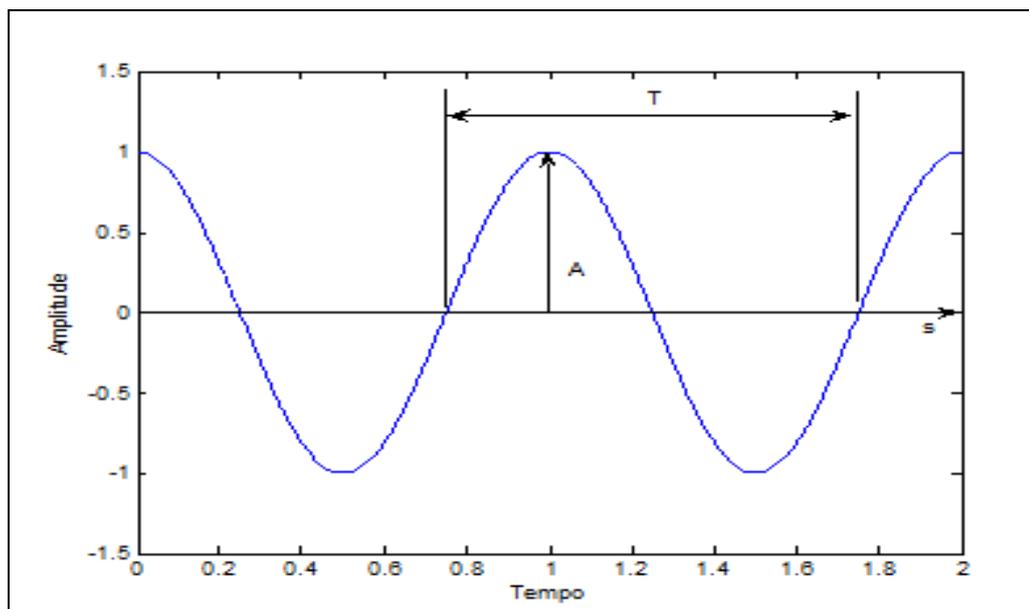


Fonte: Própria (2014).

FIGURA 33 – Engrenagem Z1 com o dente quebrado.

4.5 Análise no domínio do tempo

Para entender melhor o que ocorre quando há choque (impacto) a cada volta completa na engrenagem com o dente quebrado é necessário relembrar alguns conceitos básicos, fórmula de tempo. Pode-se perceber que haverá um movimento que descreverá uma trajetória como a demonstrada na figura 35. Dela podem ser observados alguns parâmetros como ‘A’ que é a amplitude, ‘T’ que é o período. Há uma relação entre eles como serão vistos (MERIAN, 1994) (Figura 34).



Fonte: Própria (2014).

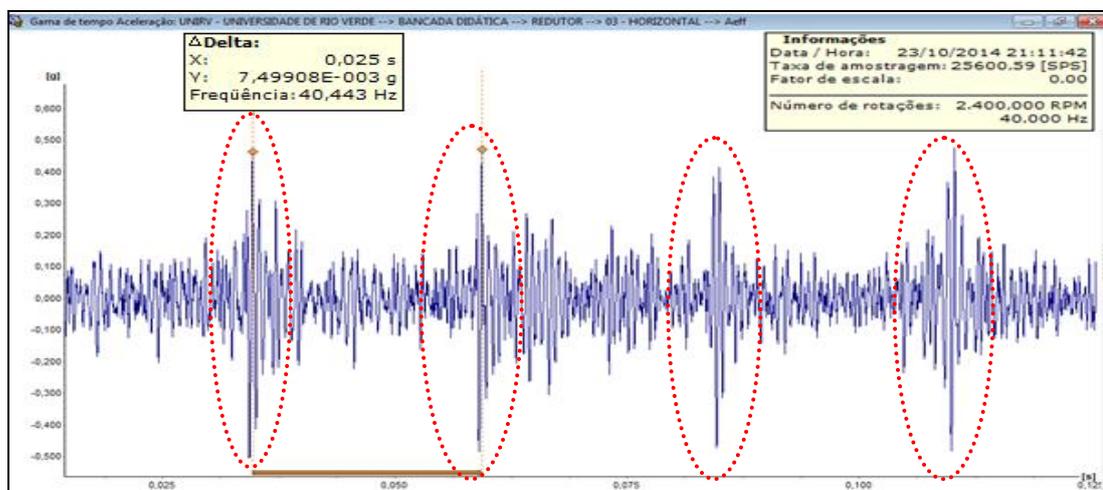
FIGURA 34 – Movimento periódico.

O período T está relacionado com a frequência através da equação (1).

$$f = \frac{1}{T} \text{ [Hz]}$$

4.6 Análise espectral com defeito na máquina

A segunda coleta de análise de vibrações realizada na bancada didática houve a alteração no espectro conforme a (Figura 35).



Fonte: Própria (2014).

FIGURA 35 – Espectro em forma de ondas no tempo.

Nota-se que no espectro da figura 35 há presença de esforços dinâmicos e indesejáveis (impactos), conforme descrito no delta x: 0,025 s.

Utilizando as seguintes informações da bancada didática, a engrenagem Z1 do redutor tem a rotação de 2400 RPM ou 40 Hz, a fórmula utilizada é $T = 1/F$, sendo assim, $T = 1/40$ Hz = 0,025 segundos.

Com a base no cálculo do programa de análise de vibrações, compara-se a fórmula de $T = 1/F$, chega-se à conclusão que a falha localizada está na engrenagem Z1.

5 CONCLUSÃO

Pelo resultado alcançado, e com uma instrumentação muito adequada para este tipo de procedimento, o cálculo para determinação da falha indica estar corretos e em ambas as verificações do espectro os valores no tempo entre impactos se coincidem.

A bancada se mostrou muito útil na observação da teoria da análise de vibrações em redutores, comprovando que a manutenção preditiva é eficiente na detecção de esforços dinâmicos e indesejáveis em equipamentos rotativos.

REFERÊNCIAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 7497/1982**. Vibrações mecânicas e choques. 2000. Disponível em: <<http://www.ebah.com.br/content/ABAAABMIUAD/nbr-7497-vibracoes-mecanicas-choques>>. Acesso em: 14 nov. 2014.

_____. **NBR 10082**. Ensaio não destrutivo – Análise de vibrações – Avaliação da vibração mecânica de máquinas com velocidades de operação de 600 rpm a 15 000 rpm. 2011. Disponível em: <<http://www.abntcatalogo.com.br/norma.aspx?ID=088639>>. Acesso em: 14 nov. 2014.

_____. **NBR 15928**. Ensaio não destrutivo – Análise de vibrações – Terminologia. 2011. Disponível em: <<http://www.abntcatalogo.com.br/norma.aspx?ID=086540>>. Acesso em: 14 nov. 2014.

ALMEIDA, M. T. Manutenção Preditiva. **Revista Indústria em Foco**, n. 01, dez./2007.

AZOVTEV, A.; BARKOV, A., **Development of Condition Diagnostics in Russia Using Vibration**, Vibro Acoustical Systems and Technologies, Inc. (VAST), Saint Petersburg, Russia, 16p. 1998.

BRANCO, G. F. **A organização, o planejamento e o controle da manutenção**. Rio de Janeiro: Ciência Moderna, 2008.

BREITENBACH, A. **Against spectral leakage**. Alpine Electronics Research of Europe, Germany, 12p, 1999.

CARVALHO, W. D. **Modelo de gestão dos ciclos de manutenção**. Rio de Janeiro: ENSPSA, 2004.

CESTARI. **Tipos de redutores**. 2014. Disponível em: <<http://www.cestari.com.br/home/produtoaredutor.php?tipo=4&id=16>> Acesso em: 10 set. 2014.

COELHO Jr.; HANSEN. **Manutenção preditiva por análise de vibrações**. VITEK Consultoria Ltda, 1993.

COPYRIGHT NSK BRASIL. **Vibrações Mecânicas Aplicação a Manutenção**. 2004. Disponível em: <http://www1.br.nsk.com/etreinar/conteudo/24/Curso_Vibracoes.pdf>. Acesso em: 14 nov. 2014.

DIANA, G.; CHELIF, F. **Vibration mechanics, SFM**: Société française des mécaniciens, Acoustical and Vibratory Surveillance Methods and Diagnostic Techniques, Senlis, France, p.475-486, 10-12 October, vol 2/2. 2003.

FAG Detector. **Aparelho analisador de vibrações**. Disponível: <<http://www.irusa.com.br/catalogos/fag/DETECTOR%20III%20-%20FAG%20-%20IRUSA.pdf>> Acesso em: 23 abr. 2014.

GEREMIA REDUTORES. 2009. Disponível em: <<http://www.geremiarredutores.com.br/>>. Acesso em: 14 nov. 2014.

GURSKI, C. A (org.). **Manutenção industrial**: curso para formação de técnicos de operação júnior do abastecimento. Rio de Janeiro: Petrobrás, 2008.

MASSOCO, Luciano Antonio. **História dos redutores e engrenagens**. Universidade de Caxias do Sul. 2014. Disponível em: <<http://www.geremiarredutores.com.br/pt/area-estudante>> Acesso em: 22 abr. 2014.

MATHIAS, Mauro Hugo. **Ferramenta de Diagnóstico de Máquinas**. São Paulo: UNESP, 2012. Disponível em: <<http://www.acervodigital.unesp.br/bitstream/123456789/46460/1/Aula%2001%20-%20Metodos%20de%20Diagnosticos%20de%20Maquinas%20-%20Parte%201.ppt>>. Acesso em: 14 nov. 2014.

MIRSHAWHA, V., 2001, **Manutenção Preditiva**: Caminho para Zero Defeitos. São Paulo, Makron, McGraw-Hill, 317p.

MORI, Kentaro. **O Mecanismo de Anticitera**. 2009. Disponível em: <<http://www.ceticismoaberto.com/fortianismo/2127/o-mecanismo-de-anticitera>> Acesso em: 20 mar. 2014.

PEREIRA, M. J. **Engenharia de manutenção**: teoria e prática. Rio de Janeiro: Ciência Moderna, 2009.

PETRILLI, Eric Lenon; SILVA, Felipe Hessel; SOUZA, Leandro Lopes. **Manutenção Preditiva**. Tatuí: Faculdade de Tecnologia de Tatuí. 2012. Disponível em: <<http://www.ebah.com.br/content/ABAAAfZYsAK/trabalho-academico-sobre-manutencao-preditiva>>. Acesso em: 14 nov. 2014.

PINTO, A. K.; XAVIER, J. N. **Manutenção: Função estratégica**. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2001

SAAVEDRA, P.; ESPINOZA, J., **Na Integrated Approach Method to Rotating Machinery Fault Diagnosis**. Condition Monitoring` 87, 1987, p.685-704.

SANTOS, V. A. **Prontuário para manutenção mecânica**. São Paulo: Ícone, 2010.

VITAL, H. L. R.; SILVA JÚNIOR, N. G. da. **A importância da manutenção preditiva em motores elétricos** – Estudos de caso em uma indústria sucroalcooleira. Maceió, 2008. Disponível em: <<http://www.ebah.com.br/content/ABAAAAGGoAI/manutencao-preditiva-motores-eletricos>>. Acesso em: 17 abr. 2013.

WANG, H.; WILLIAMS, K., 2003, **The Vibrational Analysis and Experimental Verification of a Plane Electrical Machine Stator Model**, Mechanical Systems and Signal Processing, p.429-438.

XENOS, H. G. **Gerenciando a manutenção produtiva**. Minas Gerais: Indg Ltda,