



UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO
Curso de Engenharia Mecânica

LUIZ FERNANDO ARAÚJO DE ARAÚJO

Métodos Tradicionais de Análise de Vibração em Mancais de Rolamento Utilizando Sinais FFT e de Envelope em Sistemas Mecânicos Rotativos

SÃO LUÍS/MA
2017

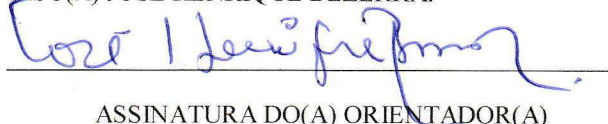
LUIZ FERNANDO ARAÚJO DE ARAÚJO

Métodos Tradicionais de Análise de Vibração em Mancais de Rolamento Utilizando Sinais FFT e de Envelope em Sistemas Mecânicos Rotativos

Monografia de graduação apresentada ao Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual do Maranhão como parte dos requisitos exigidos para obtenção do título Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof.Msc.José Henrique Bezerra

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO FINAL DA MONOGRAFIA DEFENDIDA PELO(A) ALUNO(A) LUIZ FERNANDO ARAÚJO DE ARAÚJO, E ORIENTADA PELO(A) PROF(A). MSC(A) JOSÉ HENRIQUE BEZERRA.



ASSINATURA DO(A) ORIENTADOR(A)

SÃO LUÍS/MA
2017

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA CENTRAL – UEMA

Araújo, Luiz Fernando Araújo de.

Métodos tradicionais de análise de vibração em mancais de rolamento utilizando sinais FFT e de envelope em sistemas mecânicos rotativos / Luiz Fernando Araújo de Araújo. – São Luís, 2017.

59 f.

Monografia (Graduação) – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual do Maranhão, 2017.

Orientador: Prof. José Henrique Bezerra.

1. Vibração. 2. Rolamento. 3. Frequência de ressonância. 4. Análise do envelope. I. Título.

CDU 62-233.2

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA E PRODUÇÃO

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**Métodos Tradicionais de Análise de Vibração
em Mancais de Rolamento Utilizando Sinais
FFT e de Envelope em Sistemas Mecânicos
Rotativos**

Autor: Luiz Fernando Araújo de Araújo

Orientador: José Henrique Bezerra

A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Monografia:



Prof. Msc. José Henrique Bezerra
Universidade Estadual do Maranhão



Prof. Msc. Paulino Cutrim Martins
Universidade Estadual do Maranhão



Prof. Dr. Waldemir Silva de Lima
Universidade Estadual do Maranhão

A ata da defesa com as respectivas assinaturas dos membros encontra-se no processo de vida acadêmica do aluno.

São Luís/MA, 06 de dezembro de 2017.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais, Rosa Maria e Cesar Ribamar, por investirem na minha educação, acrescentando bons valores que contribuíram não somente para o crescimento profissional, mas para a minha formação como cidadão. Além disso, agradeço por todo o suporte, carinho e conselhos que me ajudaram a seguir em frente diante às adversidades.

Dedico a Lúcia Helena e Francisco Azevedo por sempre acreditarem em meu potencial, em especial ao segundo que além de tio é um amigo, pois sempre se importou com a minha educação, não somente no que tange a adquirir conhecimento para que realizasse a minha profissão da melhor maneira possível, mas também para a aquisição de valores que possibilitassem uma melhor relação social. Com este aprendi o significado da palavra força, pois mesmo diante às adversidades da vida sempre se manteve forte, onde este comportamento influenciava as pessoas ao seu redor, por isso esse grande homem serve de inspiração para a minha vida.

Dedico também às pessoas cuja presença se torna essencial em minha vida, não somente quanto à relação de convívio, mas também pela interatividade que me possibilita aprender e entender a melhor maneira de seguir por esse caminho tão difícil que é a vida. São estes, Valda Helena, Lucas Felipe, Thiago Azevedo e Diogo Azevedo.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus, autor da vida, pois este nos possibilita estar próximo as pessoas que nos ama e que contribuem de forma significativa para o nosso crescimento.

Agradeço ao José Henrique Bezerra, orientador, pelo suporte dado durante a elaboração do trabalho, seja tirando dúvidas ou disponibilizando material para cumprimento deste, e também pelas suas aulas de vibrações mecânicas.

Aos professores Paulino Cutrim e Waldemir Silva, que aceitaram o convite para participar da defesa deste trabalho, e também por todo o conhecimento passado durante as aulas das disciplinas referentes à área de fluido-térmica.

Ao professor Valdirson Pereira por aceitar que trabalhasse junto ao laboratório de refrigeração, onde pude realizar atividades práticas que agregaram muito à minha formação.

Aos professores da graduação pelas aulas ministradas durante o curso de graduação, que contribuíram para meu crescimento profissional.

Aos familiares por apoiar cada decisão e dar todo o suporte durante todo este ciclo que se mostrou desafiador.

Aos amigos que encontrei nesta instituição, pela convivência e apoio durante os momentos difíceis que se apresentaram durante a graduação.

*Não fui eu quem lhe ordenei? Seja forte e corajoso! Não se apavore, nem se desanime
pois o Senhor, o seu Deus estará com você por onde você andar.
(Josué 1:9)*

RESUMO

O trabalho apresenta as técnicas de medição de vibração no domínio tempo, frequência e tempo frequência usadas para a detecção de defeitos em componentes mecânicos de máquinas rotativas, que neste caso são os rolamentos, os quais são parte integrante dos equipamentos rotativos, desde os mais simples aos mais complexos. Os defeitos nos componentes são detectados porque estes produzem uma série de impactos de vibrações, as quais podem ser captadas por um acelerômetro, porém este sinal de vibração precisa ser filtrado através da Transformada Rápida de Fourier (FFT) que transforma o sinal no domínio do tempo para o domínio da frequência facilitando as interpretações das informações contidas no sinal. Dentre as técnicas do domínio da frequência, a análise do envelope é utilizada para que seja encontrada a frequência de ressonância, esta é encontrada aplicando-se métodos de filtragem através da FFT e da obtenção do envelope pelo processo de demodulação do sinal, o que permite identificar e localizar o defeito. Diante do contexto, o trabalho mostra os fundamentos da técnica do envelope para a predição de defeitos, visto que diversos autores consideram esta uma ótima ferramenta para detecção de falhas, principalmente nas pistas dos rolamentos.

Palavras-Chave: vibração; rolamento; frequência de ressonância; análise do envelope.

ABSTRACT

The paper presents measurement vibration techniques on time domain, frequency and time-frequency that are used to detect defects in mechanical parts of rotary machines, like rolling element bearings, which make part of rotating equipment from the simplest to more complex ones. Defects in mechanical components are detected because it produces a series of vibration impact, which can be obtained by an accelerometer, but this vibration signal needs to be filtered through Fast Fourier Transform (FFT) that changes signal on time domain to frequency domain, it makes interpretation about signal information easier to be comprehended. Among techniques on frequency domain, envelope analysis is used to find resonance frequency, it is found using filtering methods through FFT and signal demodulation process to obtain the envelope of this, which allows identifying and locating the defect.

Key-words: vibration; rolling element bearing; resonance frequency; envelope analysis.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 3.1 - Mola Linear.....	23
Figura 3.2 - Não linearidade além do limite de proporcionalidade.....	24
Figura 3.3 - Amortecedor Viscoso	25
Figura 3.4 - Ciclo de Histerese	26
Figura 3.5 - Sistema massa-mola em posição horizontal.....	27
Figura 3.6 - Sistema massa-mola-amortecedor	27
Figura 3.7 - Comparação entre movimentos com tipos diferentes de amortecimento.....	28
Figura 3.8 - Sistema massa-mola amortecedor e seu diagrama de corpo livre	29
Figura 3.9 - Esquema de medição de vibração.....	31
Figura 3.10 - Forma de onda senoidal (relação entre pico e RMS)	32
Figura 3.11 - Formas de onda com mesma frequência, porém com fases diferentes	33
Figura 3.12 - Sensores indutivos	35
Figura 3.13 - Princípio de funcionamento do sensor indutivo	35
Figura 3.14 - Transdutor eletrodinâmico de velocidade	36
Figura 3.15 - Acelerômetro piezoelétrico	38
Figura 3.16 - Técnicas de montagem de acelerômetro	39
Figura 3.17 - Sinal no domínio do tempo e no domínio da frequência	41
Figura 3.18 - Elementos do mancal de rolamento.....	43
Figura 3.19 - Fenômeno do Batimento	50
Figura 3.20 - Exemplo de sinais em modulação AM.....	51
Figura 3.21 - Espectro de frequência do sinal modulado	52
Figura 3.22 - Processo de demodulação	53
Figura 3.23 - Passo a passo da análise do envelope	54
Figura 3.24 - Processo de análise do envelope.....	55

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Parâmetros usados para medir vibrações em máquinas.....	33
--	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AM – Amplitude Modulation

BPFI – Ball Pass Frequency Inner Race

BPFO – Ball Pass Frequency Outer Race

BSF – Ball Spin Frequency

DFT – Transformada Discreta de Fourier

FFT – Transformada Rápida de Fourier

FTF – Fundamental Train Frequency

LC – Circuito Indutivo-Capacitivo

RMS – Raíz Média Quadrática

STFT – Short-Time Fourier Transform

WT – Wavelet Transform

WVD – Wigner-Ville Distribution

LISTA DE SÍMBOLOS

F – força

x – deformação

k – rigidez da mola

U – energia potencial

m – massa

c – constante de amortecimento

$f(t)$ – força externa

ζ – fator de amortecimento

c_c – amortecimento crítico

sen – seno

ω – frequência

t – tempo

$x_h(t)$ – solução homogênea

$x_p(t)$ – solução particular

$x(t)$ – solução geral, sinal modulante

H_z – Hertz

CPM – ciclos por minuto

p – pico

$p-p$ – pico a pico

mm/s – milímetros por segundo

G – unidade de aceleração

mm – milímetros

X_{RMS} – valor RMS

T_1, T_2 – período

dt – derivada de tempo

FC – fator de crista

n – número de esferas

f_r – frequência de rotação

d – diâmetro da esfera

D – diâmetro primitivo do rolamento

Θ – ângulo de contato do rolamento, fase do sinal

$X(j\omega)$ – função complexa da frequência

$e^{-j\omega t}$ – função complexa do tempo

$X(m)$ – transformada discreta de Fourier

$x(n)$ – conjunto de pontos

N – número de pontos amostrados

$\hat{g}(t)$ – transformada de Hilbert para um sinal real

$g(t)$ – transformada inversa de Hilbert

j – parte imaginária

sgn - sinal

$Y(t)$ – sinal analítico

$y(t)$ – sinal real, sinal modulado

$h(t)$ – sinal de entrada

$A(t)$ – envelope

Θ – fase

s_1, s_2 – ondas

s_m – amplitude

cos – cosseno

$c(t)$ – sinal da portadora

A_p – amplitude da portadora

f_p - frequência da portadora

A_m – amplitude do sinal modulante

f_m – frequência do sinal modulante

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 OBJETIVO GERAL	17
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
2 REVISÃO DA LITERATURA	19
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	22
3.1 VIBRAÇÕES MECÂNICAS	22
3.1.1 Componentes de Sistemas Vibratórios	22
3.1.2 Classificação de Vibrações	26
3.2 MEDIÇÃO DE VIBRAÇÃO EM MÁQUINAS	31
3.2.1 Parâmetros de vibração	32
3.2.2 Transdutor ou sensor de vibração	34
3.2.3 Técnicas de análise da vibração	39
3.3 ANÁLISE DE ENVELOPE EM MANCAIS DE ROLAMENTO	43
3.3.1 Falhas em rolamentos	43
3.3.2 Fundamentos da análise de envelope	45
4 CONSIDERAÇÕES FINAIS	56
REFERÊNCIAS	58

1 INTRODUÇÃO

Máquinas rotativas são amplamente utilizadas no âmbito industrial, onde estas são equipamentos essenciais que garantem a operacionalidade de plantas industriais, dentre as quais se podem citar: bombas, ventiladores, compressores e motores.

Essas máquinas quando em operação estão sujeitas à fadiga, desgaste, deformação e acomodação da fundação. Esses efeitos provocam um aumento nas folgas entre as partes concordantes, desalinhamento em eixos, início de trincas em peças e desbalanceamento em rotores – tudo isso gera um aumento no nível de vibração, que causa cargas dinâmicas adicionais em mancais. O aumento do nível de vibração resulta em falhas de componentes mecânicos ou avaria da máquina.

Os rolamentos constituem parte integrante de praticamente toda máquina ou equipamento rotativo, desde as mais simples às mais complexas. Os defeitos ou irregularidades em rolamentos acontecem devido à sobrecarga, desbalanceamento, variações bruscas de temperatura, lubrificação inadequada, fadiga. A ocorrência de um defeito grave neste componente pode significar a parada da máquina, por isso é necessário a utilização de técnicas de monitoração que detectem a falha antecipadamente, possibilitando a troca do rolamento antes que este alcance níveis críticos.

Existem vários métodos para monitorar as condições de uma máquina e seus componentes, para este caso escolheu-se a análise de vibração, pois esta é comumente utilizada para monitoração de equipamentos. As técnicas de análise de vibração são classificadas, por alguns autores, como: técnicas no domínio do tempo, domínio da frequência e domínio tempo-frequência.

No domínio do tempo encontram-se algumas técnicas como o valor RMS, fator de crista e órbitas de Lissajous. Estas técnicas não são muito utilizadas, pois não oferecem informações confiáveis, além disso, é difícil analisar sinais no domínio do tempo, pois este não oferece informações úteis.

A transformada de Fourier, análise do envelope e o Cepstrum são técnicas presentes no domínio da frequência. Aplicando-se a FFT, que é uma técnica computacional que permite o cálculo rápido da transformada de Fourier, é possível mudar o sinal do domínio

do tempo para o domínio da frequência facilitando a análise do mesmo, pois deste modo o sinal é filtrado evitando-se a repetição e superposição das amplitudes.

As técnicas do domínio tempo-frequência conseguem lidar com sinais de vibração estacionários e não estacionários o que representa uma vantagem sobre as técnicas no domínio da frequência. Este domínio é composto pela Short-Time Fourier Transform (STFT), Wigner-Ville Distribution (WVD) e a Wavelet Transform (WT).

As técnicas de análise no domínio da frequência e no domínio tempo-frequência se mostram bastante eficazes para a predição e localização de defeitos em rolamentos tornando possível o monitoramento destes para prevenir uma avaria ou parada da máquina rotativa.

Este trabalho apresentará as técnicas de medição de vibração, nos domínios citados acima, porém dando maior ênfase à análise do envelope, assim como os fundamentos que constituem essa técnica para que haja a predição das falhas em rolamentos.

1.1 OBJETIVO GERAL

O trabalho tem como objetivo apresentar as técnicas de monitoração de vibração, em especial, as técnicas referentes ao domínio da frequência na predição de falhas em rolamentos, componente essencial de uma máquina rotativa.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Apontar a necessidade da utilização de técnicas de medição de vibração para detecção de defeitos;
- Apresentar a instrumentação necessária para a obtenção dos sinais de vibração;
- Discorrer sobre as técnicas no domínio do tempo, domínio da frequência e domínio tempo-frequência;

- Mostrar as equações que possibilitam a obtenção das frequências características de defeitos do rolamento de acordo com sua geometria;
- Discorrer sobre fundamentos inerentes à análise do envelope;
- Dissertar sobre a técnica do envelope e apresentar a sequência de passos que permite sua utilização.

2 REVISÃO DA LITERATURA

RAO (2008) diz que todas as máquinas quando em operação estão sujeitas à fadiga, desgaste, deformação e acomodação da fundação, onde estes efeitos geram um aumento no nível de vibração da máquina, e se este continuar a aumentar, a máquina rotativa pode sofrer falhas ou avarias em seus componentes mecânicos. Esses níveis de vibrações precisam ser diagnosticados e monitorados para que as falhas nos componentes mecânicos das máquinas possam ser antecipadas, garantindo um melhor funcionamento da máquina, por isso, o autor citado apresenta técnicas de monitoração da vibração, dentre as quais podem ser citadas a análise no domínio do tempo, métodos estatísticos, análise no domínio da frequência e análise no domínio da quefrência.

BARILLI (2013) diz que muitos estudos vêm sendo desenvolvidos para que os mecanismos de geração de ruídos e vibrações em mancais de rolamento sejam explicados. Quando um defeito faz-se presente em rolamentos, este aumenta o nível de vibração da estrutura, pois quando um elemento rolante colide com uma falha localizada, acontece uma excitação de ressonâncias em uma frequência específica. Esses níveis de vibração são detectados por diferentes técnicas de análise de sinal, que detectam falhas nos mancais de rolamento. Para o autor citado as técnicas são comumente aplicadas no domínio tempo, frequência ou tempo-frequência. A medição dos níveis globais RMS e a medição do fator de crista se apresentam como a abordagem mais simples no domínio do tempo para a avaliação do nível de vibração, e estas técnicas não são confiáveis, pois oferecem diagnósticos tardios sobre os rolamentos, e estas indicam somente a ocorrência do aumento de energia do sinal porém não disponibiliza informações sobre a localização dos defeitos. As técnicas no domínio da frequência são as mais utilizadas para a detecção de defeitos em rolamentos, isto acontece porque é difícil analisar o sinal no domínio do tempo devido ao excesso de informações, então com a transformação desse sinal para o domínio da frequência, através da FFT, torna-se mais fácil a análise da amplitude e das frequências de ressonância. Ainda neste domínio, tem-se a análise de envelope que foi criada com o objetivo de trocar a análise de frequências com uma ampla faixa de frequências portadoras, para uma faixa menor de frequências de falhas. O Cepstrum é outra técnica no domínio da frequência.

KOKIL (2014) em seu trabalho comenta sobre as metodologias de análise de vibrações, dentre as quais se encontra a análise no domínio tempo frequência que tem como vantagem principal a capacidade de lidar com sinais de vibração estacionários e não-estacionários. As técnicas que compõem a análise no domínio tempo-frequência são a Short-Time Fourier Transform (STFT), Wigner-Ville Distribution (WVD) e Wavelet Transform (WT). Estas técnicas são utilizadas quando se tem sinais mais complexos, onde surgem componentes não-estacionárias no sinal, cuja análise da variação das componentes presentes no espectro são melhores visualizadas no domínio do tempo.

REIS, SILVA, *et al* (2016) em seu trabalho retoma as explicações anteriores sobre a série de vibrações que aparecem devido aos impactos dos elementos rolantes sobre um defeito presente no rolamento. Este autor explica sobre as frequências características de defeitos que estão diretamente relacionadas com a velocidade do eixo, a geometria do rolamento e a localização do defeito, assim como mostra os sinais de vibrações que acontecem por defeitos localizados na pista externa, pista interna ou esferas de um rolamento. As frequências características de defeito de um rolamento são a BPFO, BPFI, BSF e FTF, o conhecimento destas é de suma importância, pois estes valores devem ser detectados no espectro de frequências quando aplicado a técnica de envelope para extração das mesmas, apontando qual o defeito e onde este está localizado.

SANTOS (2017) apresenta a importância da utilização da técnica do envelope, assim como a sequência de passos que devem ser seguidos para a aplicação da análise de envelope, onde explica alguns fundamentos necessários ao entendimento da técnica, como modulação e demodulação para identificação dos defeitos.

PONCI e CUNHA (2011) para estes autores a modulação em amplitude é a variação com o tempo da amplitude de um sinal de vibração, onde esta é composta de um sinal de portadora e um sinal modulante que quando multiplicados dão origem a um sinal modulado. O espectro de um sinal modulado consta de um pico central na frequência portadora e dois picos laterais que são espaçados entre si por um valor semelhante à frequência de modulação. A demodulação extrai o envelope de um sinal modulado, e uma de suas vantagens é a eliminação de componentes de alta energia que permite identificar previamente os defeitos assim como a sua taxa de repetição.

MESQUITA, SANTIAGO, *et al* (2002) apresentam que muitas técnicas de análise de vibração foram desenvolvidas para diagnosticar falhas em rolamentos, dentre elas a análise

de envelope, por isso seu trabalho faz uma comparação desta técnica com técnicas no domínio tempo-frequência. Segundo este autor a análise de envelope se mostra muito eficiente na detecção de falhas incipientes, mesmo quando o sinal encontra-se contaminado com ruído, e que esta consegue identificar as componentes em frequências das falhas tanto na condição de pista estacionária, quanto na condição de pista girante, onde esta acarreta numa modulação em amplitude no sinal do defeito.

ABREU, BRITO e LAMIM (2007) dizem que caso se a frequência central de ressonância não seja conhecida, então se faz necessário aplicar a transformada de Fourier ao sinal, pois com a aplicação desta pode-se definir a faixa de filtragem para que a frequência de ressonância seja encontrada, após essa etapa aplica-se um filtro passa-banda para eliminar as frequências indesejáveis, como as baixas frequências de alta amplitude, então aplica-se a transformada de Hilbert para que se obtenha o envelope do sinal e depois usa-se a FFT no envelope do sinal para obtenção das frequências características de defeito. O autor cita como uma desvantagem da técnica do envelope a escolha dos filtros e de suas faixas de corte, onde essas faixas só podem ser determinadas de posse da frequência central de ressonância. Neste trabalho é reforçado que a análise de envelope é uma ótima ferramenta para detecção das falhas nas pistas do rolamento.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 VIBRAÇÕES MECÂNICAS

A teoria da vibração diz respeito aos movimentos oscilatórios de corpos e às forças que lhe são associadas. Todos os corpos dotados de massa e elasticidade são capazes de vibração.

O fenômeno de vibração é o resultado da troca de energia de um mesmo sistema. Quando há a troca de energia cinética em energia potencial, e vice-versa, aparece a vibração (NEPOMUCENO, 1989).

Máquinas e estruturas estão sujeitas a certo grau de vibração, que corresponde a resposta destas às forças dinâmicas as quais estão submetidas. A máquina vibra em várias frequências e estas vibrações se propagam por toda a máquina e estruturas próximas (ALMEIDA, 2013).

3.1.1 Componentes de Sistemas Vibratórios

Sistemas mecânicos contém três componentes que interagem entre si e são responsáveis pelo comportamento dinâmico, sendo eles: mola (rigidez), amortecedor (dissipação de energia) e massa (inércia). Submetidos à forças, eles reagem com deslocamento, velocidade e aceleração (ALMEIDA, 2013).

Elementos de Mola

Uma mola linear, figura 3.1, é um tipo de elo mecânico cuja massa e amortecimento são considerados desprezíveis.

Figura 3.1 - Mola Linear



Fonte: (SHABANA, 1995, p. 03)

Uma força é desenvolvida na mola sempre que houver um movimento relativo entre suas duas extremidades. A força da mola é proporcional à quantidade de deformação, dada pela equação 3.1.

$$F = kx \quad (3.1)$$

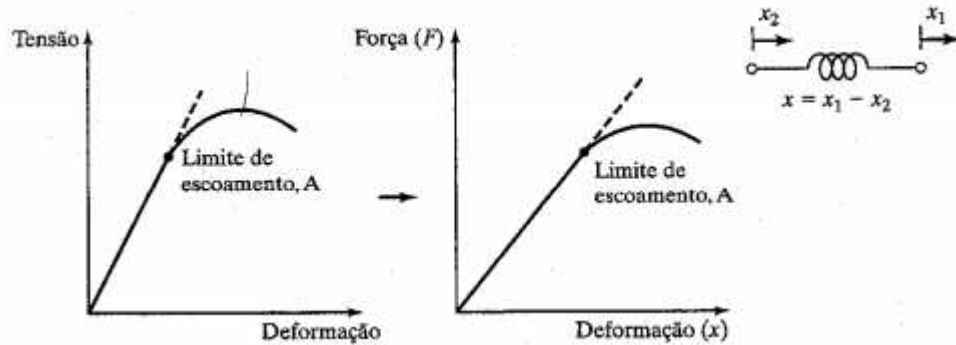
Onde F é a força da mola, x é a deformação e k é a rigidez da mola ou constante elástica. O trabalho realizado na deformação de uma mola é armazenado como deformação ou energia potencial na mola e é dado pela equação 3.2.

$$U = \frac{1}{2} kx^2 \quad (3.2)$$

Molas reais são não lineares e seguem a equação 3.1 até certa deformação. Quando a deformação atinge um valor após o limite de escoamento, figura 3.2, a tensão ultrapassa o limite de escoamento do material e a relação força-deformação torna-se não

linear. Para aplicações práticas, admitimos que as deflexões são pequenas e usamos a relação linear (RAO, 2008).

Figura 3.2 - Não linearidade além do limite de proporcionalidade



Fonte: (RAO, 2008, p.12)

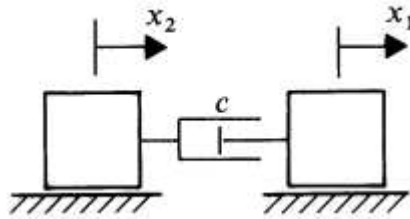
Elementos de Massa ou Inércia

O elemento de massa é um corpo rígido que pode ganhar ou perder energia cinética sempre que a velocidade do corpo mudar. Pela segunda lei de Newton, o produto da massa por sua aceleração é igual à força aplicada à massa. Trabalho é igual à força multiplicada pelo deslocamento na direção da força e o trabalho realizado sobre uma massa é armazenado na forma de energia cinética da massa (RAO, 2008).

Elementos de Amortecimento

O mecanismo pelo qual a energia de vibração é gradualmente convertida em calor ou som é conhecido como amortecimento. Um amortecedor, figura 3.3, não tem nem massa nem elasticidade, e que a força de amortecimento só existe se houver uma velocidade relativa entre as suas duas extremidades. O amortecimento pode ser modelado como: viscoso, Coulomb ou por atrito seco, sólido ou por histerese.

Figura 3.3 - Amortecedor Viscoso



Fonte: (SHABANA, 1995, p.10)

- Amortecimento Viscoso

É o mecanismo de amortecimento mais comumente usado em análise de vibrações. Quando sistemas mecânicos vibram em um meio fluido, a resistência oferecida por este ao corpo em movimento faz que a energia seja dissipada. Neste tipo de amortecimento, a força de amortecimento é proporcional à velocidade do corpo vibratório.

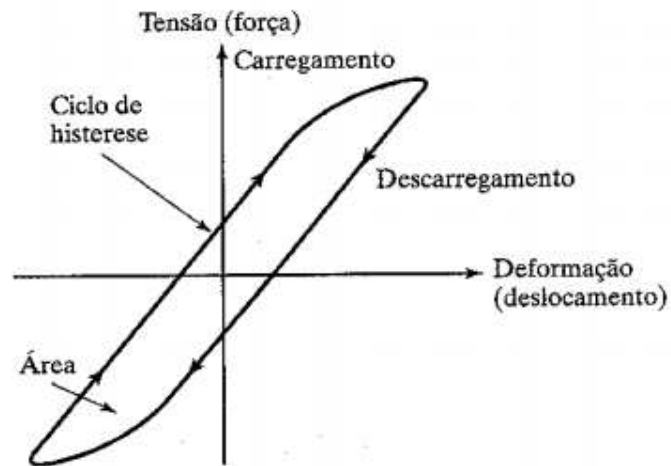
- Amortecimento Coulomb ou por atrito seco

Para esta situação, a magnitude da força de amortecimento é constante, mas no sentido oposto ao movimento do corpo vibratório. O amortecimento é causado pelo atrito entre superfícies em contato que estejam secas ou não tenham lubrificação suficiente.

- Amortecimento sólido ou por histerese

Ocorre a absorção e dissipação de energia quando um material é deformado. Este efeito deve-se ao atrito entre os planos internos, que deslizam ou escorregam enquanto as deformações ocorrem. Quando um corpo com amortecimento material está sujeito à vibração, o diagrama tensão-deformação, como mostra a figura 3.4. A área desse ciclo denota a energia perdida por unidade do volume do corpo por ciclo devido ao amortecimento.

Figura 3.4 - Ciclo de Histerese



Fonte: (RAO, 2008, p.18)

3.1.2 Classificação de Vibrações

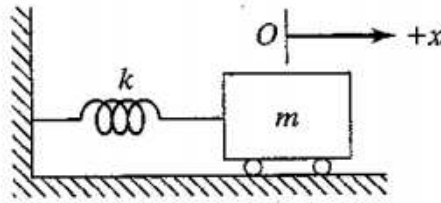
Vibração Livre

Segundo Rao (2008) o sistema está em vibração livre, se este após uma perturbação inicial continuar a vibrar, por conta própria, sem a ação força externa agindo sobre este sistema.

Um sistema pode ser retirado de sua condição de equilíbrio e ser abandonado a um movimento livre de duas formas: através de uma posição inicial diferente da posição de equilíbrio, ou através de um impulso conforme (MUCHERONI, 2011).

O sistema massa-mola mostrado na figura 3.5 é designado de sistema de um grau de liberdade, pois tem seus movimentos definidos por apenas uma coordenada, de translação. Como neste modelo dinâmico há a ausência de um elemento que cause a dissipação de energia durante o movimento da massa, este é considerado um sistema não amortecido (RAO, 2008).

Figura 3.5 - Sistema massa-mola em posição horizontal



Fonte: (RAO, 2008, p.50)

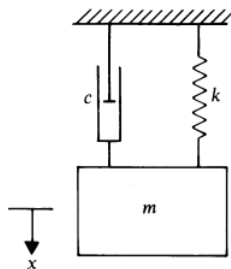
O estudo da vibração livre é realizado a partir da equação 3.3 tornando nula a força externa aplicada, ou seja, para $c = 0$ e $f(t) = 0$ obtemos a equação 3.4 que modela o movimento livre sem amortecimento (MUCHERONI, 2011).

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = f(t) \quad (3.3)$$

$$m\ddot{x} + kx = 0 \quad (3.4)$$

Para um sistema massa-mola-amortecedor, figura 3.6, onde há a presença de um elemento de dissipação de energia, pode-se obter a equação que modela esse sistema a partir da equação 3.3 e considerando $f(t) = 0$, temos a equação 3.5.

Figura 3.6 - Sistema massa-mola-amortecedor



Fonte: (SHABANA, 1995, p.89)

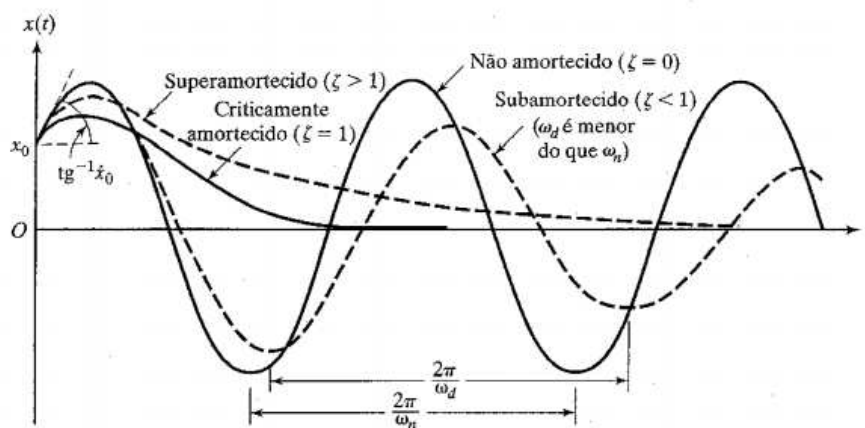
$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = 0 \quad (3.5)$$

Em vibração livre, para qualquer sistema amortecido, o fator de amortecimento (ζ) é definido como a razão entre a constante de amortecimento (c) e a constante de amortecimento crítico (c_c) como mostra a equação 3.6.

$$\zeta = \frac{c}{c_c} \quad (3.6)$$

Dependendo do valor do fator de amortecimento, o sistema dinâmico pode ser classificado de três formas: sistema subamortecido ($\zeta < 1$); sistema criticamente amortecido ($\zeta = 1$); sistema superamortecido ($\zeta > 1$) e sistema não amortecido ($\zeta = 0$). A figura 3.7 mostra uma comparação entre os tipos de amortecimento.

Figura 3.7 - Comparação entre movimentos com tipos diferentes de amortecimento



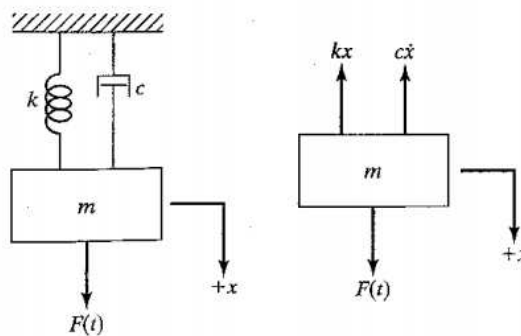
Fonte: (RAO, 2008, p.69)

Vibração Forçada

Sempre que energia externa (força repetitiva) é fornecida ao sistema durante vibração diz-se que o sistema mecânico sofre vibração forçada. A energia externa pode ser fornecida ao sistema por meio de uma força aplicada ou por uma excitação de deslocamento imposta, onde a natureza destas pode ser harmônica, não-harmônica mas periódica, não-periódica ou aleatória. Pode ser denominada resposta harmônica a resposta de um sistema à excitação harmônica. A excitação não-periódica pode ser de curta ou longa duração, onde a resposta de um sistema dinâmico a esta, aplicada instantaneamente, é chamada de resposta transitória.

O sistema massa-mola-amortecedor mostrado na figura 3.8 sobre o qual é aplicada uma força $f = f(t) = F \sin \omega t$ pode ser descrito pela equação 3.7 baseada 3.3.

Figura 3.8 - Sistema massa-mola amortecedor e seu diagrama de corpo livre



Fonte: (RAO, 2008, p.101)

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F \sin \omega t \quad (3.7)$$

A solução deste sistema pode ser descrita pela soma da solução homogênea, $x_h(t)$ com a solução particular, $x_p(t)$ dada pela solução geral, $x(t)$.

A solução homogênea representa a vibração livre que desaparece com o tempo sob cada uma das condições de amortecimento e sob todas as possíveis condições iniciais, e a

solução particular representa a vibração em regime permanente, onde esta se faz presente, contanto que a função forçante esteja presente (RAO, 2008).

Vibração linear e não linear

A vibração resultante é dita vibração linear se todos os componentes (massa, mola e amortecedor) de um sistema vibratório comportam-se de maneira linear. Se for diagnosticado que a vibração é linear o princípio da superposição é válido e as técnicas matemáticas de análise são bem desenvolvidas.

A vibração é dita não linear se qualquer dos elementos que compõem o sistema vibratório se comportarem não linearmente. Para este tipo de vibração o princípio da vibração não é válido e as técnicas de análise são menos conhecidas (RAO, 2008).

Vibração determinística e aleatória

A vibração é considerada determinística se o valor ou magnitude da excitação que age sobre o sistema vibratório possa ser conhecido a qualquer instante.

Se o valor da excitação em dado instante não puder ser previsto diz-se que a excitação é não determinística ou aleatória e para estas situações, um grande número de registros da excitação pode exibir uma regularidade estatística (RAO, 2008).

3.2 MEDIÇÃO DE VIBRAÇÃO EM MÁQUINAS

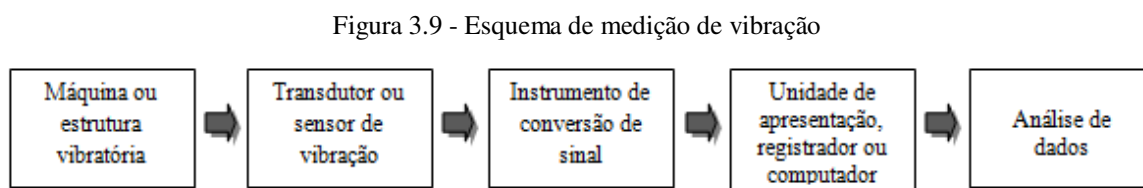
A medição da vibração faz-se necessária devido as crescentes exigências de produtividade e de projetos econômicos que resultam em altas velocidades de operação das máquinas, isto deixa a maquinaria suscetível ao fenômeno de ressonância, o que reduz a confiabilidade do sistema. Então, para que sejam garantidas as margens de segurança de operação da máquina faz-se necessária a medição periódica das características de vibração da mesma (RAO, 2008).

Uma alteração nos sinais de vibração de uma máquina pode indicar problemas com componentes ou mesmo desajustes de montagem, isto acontece porque os sinais de vibrações de uma máquina trazem informações relacionadas com seu funcionamento, então através destas informações pode-se indicar a necessidade ou não de manutenção no equipamento.

As máquinas apresentam certo tipo de nível de ruído e vibração devido à operação e excitações externas, no entanto, o desempenho das máquinas é afetado por vibrações causadas por pequenos defeitos mecânicos, ou excitações secundárias perturbadoras. Qualquer acréscimo do nível de vibração da máquina é um primeiro sinal de agravamento de um defeito.

Cada máquina apresenta uma forma característica de vibração e cada elemento de máquina induz uma excitação própria gerando formas específicas de vibração, ou seja, a composição da perturbação de todos os componentes resulta no comportamento dinâmico da máquina (ALMEIDA, 2013).

A obtenção dos sinais de vibrações de máquinas rotativas pode ser conseguida através do esquema de vibração mostrado na figura 3.9.



Fonte: (Rao, 2008, p.345)

Observando-se a figura 3.9 podem ser feitas as seguintes considerações: o movimento do corpo vibratório é convertido em um sinal elétrico pelo transdutor ou sensor de vibração, porém o sinal deste componente é muito pequeno para que seja analisado diretamente, então se faz necessário o uso de um instrumento de conversão do sinal para amplificar o sinal, onde a saída deste sinal é armazenada em uma unidade de registro ou computador para que sejam analisadas posteriormente para determinação das características de vibração desejáveis da máquina (RAO, 2008).

3.2.1 Parâmetros de vibração

Segundo Almeida (2013), em vibração temos três características fundamentais que são frequência, amplitude e fase. Estas podem ser definidas da seguinte maneira:

- frequência: é o número de ciclos ou eventos por unidade de tempo, esta pode ser expressa em ciclos por segundo (Hz), ciclos por minuto (CPM), ou ordens de velocidade operativa se a vibração for induzida por uma força na velocidade rotacional.

- amplitude: é o valor máximo da vibração em um dado local da máquina. A amplitude de vibração pode ser expressa nas formas de raiz média quadrática (RMS), pico (p) e pico a pico (p - p), como mostra a figura 3.10. A medição da amplitude de pico a pico é feita na forma de onda de tempo a partir dos picos positivo e negativo.

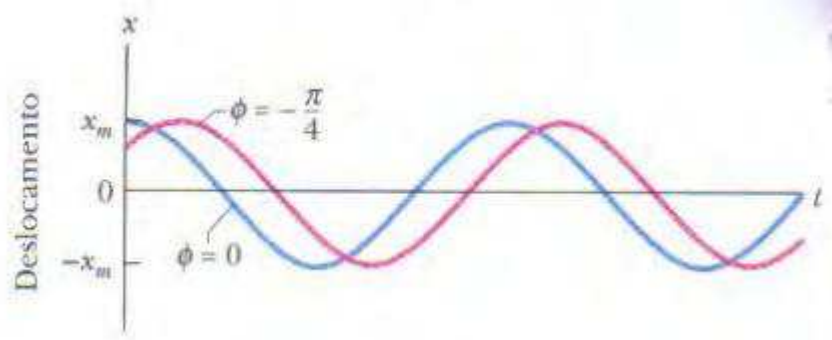
Figura 3.10 - Forma de onda senoidal (relação entre pico e RMS)



Fonte: (Almeida, 2013, p.54)

- fase: é a relação de tempo, medida em graus, entre as vibrações de mesma frequência, como mostra a figura 3.11. Esta também pode determinar a relação de tempo entre uma excitação e a vibração que ela causa.

Figura 3.11 - Formas de onda com mesma frequência, porém com fases diferentes



Fonte: (Halliday, et al., 2009, p.88)

No estudo de vibrações mecânicas existem três variáveis que são usadas para avaliar a amplitude ou quantificação de vibrações de máquinas. Essas variáveis que são deslocamento, velocidade e aceleração estão apresentadas na tabela 3.1.

Tabela 3.1- Parâmetros usados para medir vibrações em máquinas

MEDIÇÃO	UNIDADES	DESCRIÇÃO
deslocamento	p - p	movimento da máquina, estrutura ou rotor relaciona-se com o esforço devido à rigidez
velocidade	mm/s	taxa de tempo do movimento relaciona-se com a fadiga do componente ou energia cinética da vibração
aceleração	G	relaciona-se com forças dinâmicas presentes nos componentes

Fonte: (Almeida, 2013, p.55)

3.2.2 Transdutor ou sensor de vibração

Os transdutores convertem vibrações mecânicas em sinais eletrônicos, onde estes são posicionados em locais ou pontos de uma máquina para que sejam adquiridas informações sobre a vibração destas. As informações utilizadas para a monitoração das condições da máquina, verificar o desempenho e diagnosticar falhas são obtidas através destes equipamentos (ALMEIDA, 2013).

Os principais sensores para medição de vibrações são: sensores de deslocamento, sensores de velocidade, sensores de aceleração, sensores de fase e de frequência.

De acordo com Balbinot e Brusamarello (2013) ao se escolher um sensor para medição de vibração, alguns aspectos devem ser considerados:

- faixa de frequência e amplitude: os vibrômetros são mais recomendados para baixas frequências pois a amplitude do deslocamento é elevada. Os acelerômetros são indicados para aplicações à altas frequências, onde as amplitudes de deslocamento são altas, o que acarreta em altas amplitudes de aceleração. Os sensores de velocidade apresentam respostas razoáveis para baixas quanto para altas frequências.

- tamanho e massa da máquina: estes são fatores importantes pois como a vibração depende da massa do sistema, se instrumentos tiverem uma grande massa em relação ao sistema, estes podem influenciar nas medições distorcendo os resultados.

- condições de operação: é importante que os sensores, colocados em máquinas que operam em condições adversas, não tenham alterações durante o funcionamento porque essas tendem a distorcer os valores medidos.

Sensores de Proximidade

Os sensores de proximidade podem ser de diversos tipos, abaixo será explicado o princípio de funcionamento de um sensor indutivo mostrado na figura 3.12. Esse sensor gera um campo magnético dependente das propriedades magnéticas da peça a ser medida que no caso das vibrações é um eixo (BALBINOT e BRUSAMARELLO, 2013).

Figura 3.12 - Sensores indutivos



Fonte: SICK-Sensor Intelligence (2017)

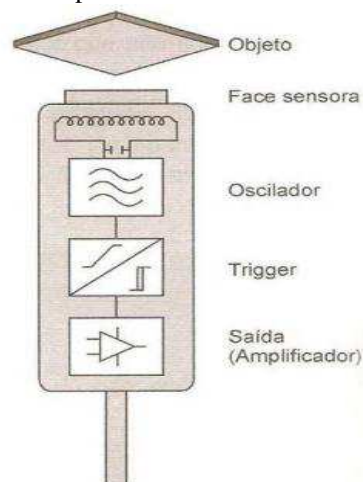
Os sensores de proximidade indutivos são dispositivos sem contato que utilizam um campo de frequência de rádio com um oscilador e uma bobina.

A alteração pode ser descoberta através de um circuito eletrônico quando a presença de um objeto altera esse campo de frequência. O sensor indutivo inclui um oscilador LC, um comparador de sinal e um chaveador. A bobina desse circuito oscilador gera um campo magnético de alta frequência, onde este é emitido à face do sensor.

Correntes de Foucault são induzidas caso um objeto se aproxime da face do sensor, onde temos que as perdas resultantes tiram energia do circuito oscilador reduzindo as oscilações. O comparador de sinal atrás do oscilador LC converte essa informação em um sinal exato (THOMAZINI e DE ALBUQUERQUE, 2005).

O princípio de funcionamento desse sensor é ilustrado pela figura 3.13.

Figura 3.13 - Princípio de funcionamento do sensor indutivo



Fonte: (Thomazini, et al., 2005, p. 40)

O sensor indutivo é usado para monitoramento contínuo, esse é instalado em máquinas que apresentam um deslocamento máximo de 2 mm e com frequências variando até 200 Hz. O sensor indutivo possui vantagens – trabalha com corrente contínua e não possui partes móveis, e desvantagens – pode ser afetado pelas propriedades magnéticas do eixo (BALBINOT e BRUSAMARELLO, 2013).

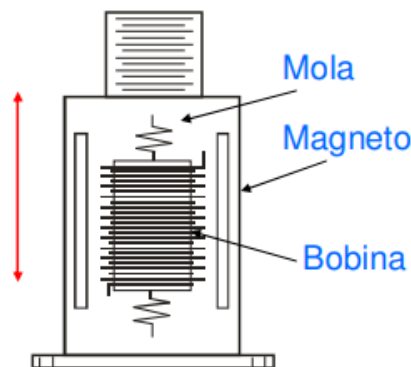
Estes detectores de proximidade são frequentemente usados em máquinas de montagem, máquinas operatrizes, sistemas de usinagem e prensas, que operam em condições adversas e com velocidade de operação elevada.

Transdutor de velocidade

O transdutor de velocidade é usado para medir a velocidade do corpo vibratório, onde esse tipo de sensor possui larga aplicação na medição de vibrações em ambiente industrial.

Os transdutores eletrodinâmicos de velocidade são compostos por uma bobina, imersa em um campo magnético e fixada por suportes flexíveis, como mostra a figura 3.14.

Figura 3.14 - Transdutor eletrodinâmico de velocidade



Fonte: SlideShare (2017)

O transdutor produz um sinal elétrico proporcional à velocidade de vibração para uma determinada faixa de frequências para determinada faixa de frequências, quando este está posicionado sobre uma superfície vibratória. Dentre as vantagens deste sensor podemos citar o baixo custo, baixa manutenção, gera pouco ruído e medição de velocidade absoluta, porém possui a desvantagem de não ser linear a baixas frequências, onde esta não linearidade ocorre devido o equipamento operar na faixa acima da ressonância (BALBINOT e BRUSAMARELLO, 2013).

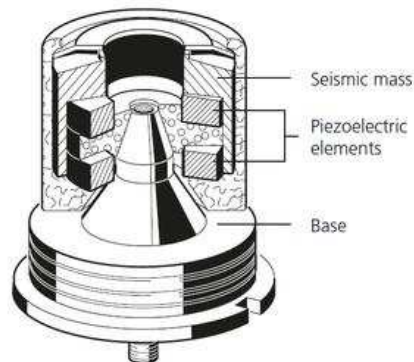
Transdutor piezoelétrico

Os sensores piezoelétricos normalmente têm um baixo custo e oferecem uma alta sensibilidade, estes podem responder a deformações menores do que $1\mu\text{m}$ e são adequados para medição de esforços variáveis, tais como força, pressão e aceleração. Estes dispositivos apresentam sensibilidade unidirecional, o que é uma propriedade interessante para a medição de vibrações.

Um acelerômetro piezoelétrico, figura 3.15, é um transdutor piezoelétrico que possui uma pequena massa, a qual é pressionada contra um cristal piezoelétrico por meio de uma mola, quando a base vibra é gerada pelo cristal uma tensão elétrica de saída proporcional à aceleração.

Estes dispositivos são compactos, resistentes, apresentam alta sensibilidade e podem ser utilizados a altas faixas de frequência, outra importante característica desse tipo de dispositivo é a sua faixa dinâmica, que deve ser levada em consideração em medições com níveis de aceleração muito baixos ou altos (BALBINOT e BRUSAMARELLO, 2013), por isso deve-se determinar a faixa de frequência do sistema a ser estudado, normalmente a maioria dos sistemas dinâmicos operam em uma faixa de frequência de 10 Hz a 1000 Hz.

Figura 3.15 - Acelerômetro piezoelétrico



Fonte: PRUFTECHNIK (2017)

Quanto à fixação, o acelerômetro deve ser fixado de acordo com a direção de medição, que deve coincidir com seu principal eixo de sensibilidade. Em geral existem quatro configurações para montagem de sensores de vibração, figura 3.16, que são stud (prisoneiro), adesivo, magneto e ponteira (SKF, 2004).

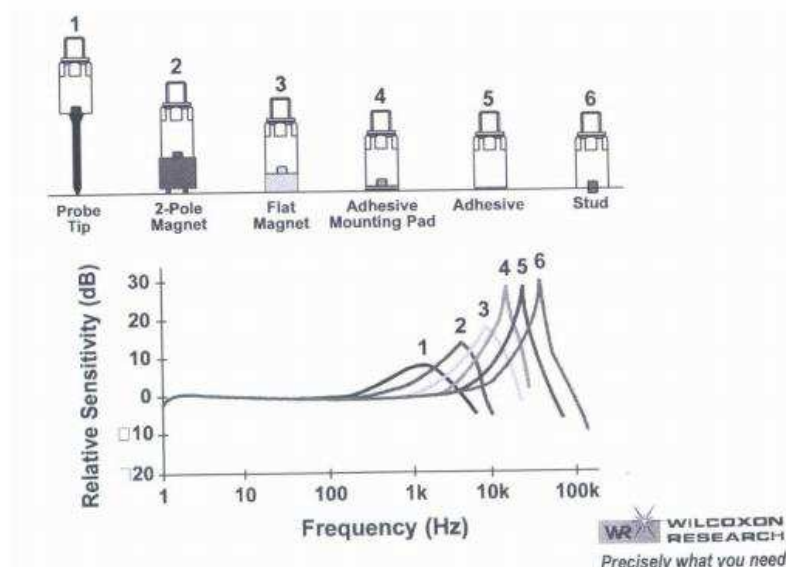
- montagem stud: essa montagem resulta na melhor resposta do intervalo de frequência, onde esta montagem é recomendada para medições em alta frequência.

- montagem com adesivo: este procedimento pode ser usado como uma solução técnica, caso não se possa aparafusar um sensor na máquina. Alguns cuidados como a limpeza do local e verificação do limite de temperatura devem ser tomados para que se tenham bons resultados.

- montagem com magneto: é o tipo de montagem mais utilizado no campo devido sua facilidade de manuseio, porém perde-se muito do range de frequências do acelerômetro, dependendo da qualidade de conexão entre o mancal e o magneto.

- montagem ponteira: sua utilização não é recomendada devido à perda de repetibilidade do sinal, o que traz o range de frequência próximo a 10%, por isso este deve ser utilizado somente em último caso.

Figura 3.16 - Técnicas de montagem de acelerômetro



Fonte: (SKF, 2004, p.15)

3.2.3 Técnicas de análise da vibração

Existem várias técnicas de análise de vibrações utilizadas para avaliação das condições de monitoramento de máquinas, onde técnicas eficazes e eficientes de extração de características são essenciais para um diagnóstico confiável de falhas em máquinas rotativas (SANTOS, 2017).

As técnicas de monitoração de vibração podem ser classificadas como: análise no domínio do tempo, no domínio da frequência e no domínio do tempo-frequência.

- análise no domínio do tempo: esta análise usa o histórico do tempo do sinal (forma de onda). O sinal é armazenado em um osciloscópio ou analisador de tempo real e quaisquer impulsos não estáveis ou transitórios são observados (RAO, 2008).

Conforme Tandon e Choudhury (1997 apud BARILLI, 2013, p. 14) a medição dos níveis globais RMS (Root Mean Square) e a regular dos fatores de crista são a abordagem mais simples, no domínio do tempo, para avaliação de sinais de vibração. Para um sinal $x(t)$, o valor RMS é o mostrado pela equação 3.8.

$$X_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T_2 - T_1} \int_{T_1}^{T_2} [x(t)]^2 dt} \quad (3.8)$$

Esta técnica revela apenas indicações de ocorrência de aumento na energia do sinal, que pode ser originado pelo desenvolvimento da falha, entretanto, não fornecem informações sobre a localização dos defeitos.

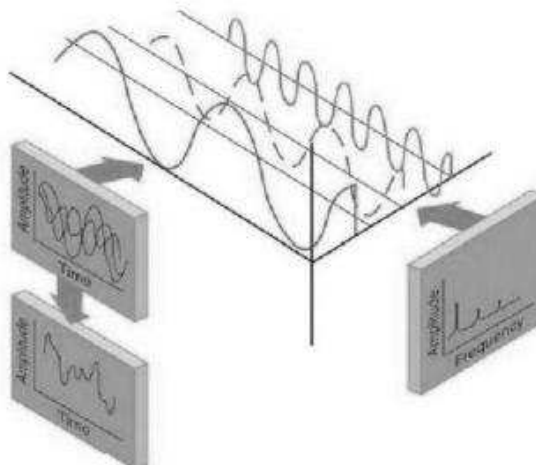
O fator de crista consiste na razão entre o nível de pico da vibração e o nível do valor RMS, medidos em uma banda de frequência (BARILLI, 2013), como mostra a equação 3.9. Este fator inclui informações tanto dos níveis de pico quanto dos níveis RMS, no entanto, para certos casos pode-se não conseguir identificar falhas (RAO, 2008).

$$FC = \frac{pico}{RMS} \quad (3.9)$$

Outra técnica, no domínio do tempo são as órbitas, que são padrões conhecidos como figuras de Lissajous, estas podem ser obtidas pela observação de formas de onda de tempo obtidas por dois transdutores cujas saídas estão deslocadas de 90°. Certas falhas como desalinhamento e desbalanceamento de eixos, desgaste em munhões, entre outras podem ser identificados devido a qualquer mudança no padrão da órbita.

- análise no domínio da frequência: a resposta no tempo de um sistema não nos dá muitas informações úteis, porém a resposta em frequência mostrará uma ou mais frequências discretas ao redor das quais a energia está concentrada (RAO, 2008). A figura 3.17 mostra a transformação de um sinal no domínio do tempo para o domínio da frequência.

Figura 3.17 - Sinal no domínio do tempo e no domínio da frequência



Fonte: (Menezes, 2015, p.42)

A Transformada Rápida de Fourier (FFT), técnica no domínio da frequência, tornou mais eficiente a obtenção de bandas espectrais. Esta é uma ferramenta essencial para se obter a transformação do sinal do domínio do tempo para o domínio da frequência, como mostra a figura 3.17. Esta representação denominada espectro de frequência, é a maneira mais usual de representar as características de um sinal captado e através deste espectro podem-se avaliar as diversas frequências componentes do sinal e a magnitude de cada um destes componentes (MARTINS, JÚNIOR, *et al.*, 2016). Essa mudança de domínio é necessária, pois sinais obtidos no domínio do tempo contém um excesso de informação, já que são influenciados por diferentes amplitudes que se repetem em diferentes períodos de tempo, além do que é possível filtrar o sinal evitando a repetição e a superposição de ondas (BARILLI, 2013).

Outra técnica que se analisa neste domínio é a análise do envelope, porém esta será discutida com mais detalhes em tópicos posteriores.

O Cepstrum é uma técnica a qual seu uso se justifica devido a sua capacidade de identificar famílias de harmônicos presentes no sinal, além de poder ser empregada para a remoção de algumas séries harmônicas do espectro. Esta consiste na transformada inversa da transformada de Fourier do logaritmo do espectro de frequência (BARILLI, 2013).

- análise no domínio do tempo-frequência: as técnicas no domínio tempo-frequência têm a capacidade de lidar com sinais de vibração estacionário e não-estacionários. Esta é a principal vantagem sobre as técnicas no domínio da frequência. A análise no domínio

tempo-frequência consegue mostrar o sinal de frequência dos componentes de uma máquina, revelando suas características em uma variação de tempo. Dentre as técnicas de análise no tempo-frequência temos a Short-Time Fourier Transform (STFT), Wigner-Ville Distribution (WVD) e a Wavelet Transform (WT), segundo Kokil (2014).

De acordo com Barilli (2013), a Short-Time Fourier Transform (STFT) consiste no fracionamento do sinal não estacionário em intervalos suficientemente pequenos, visando reduzir suas características não estacionárias, desta maneira, assume-se a estacionariedade do sinal em cada intervalo, permitindo a aplicação da FFT. Então, o novo espectro obtido revela como o conteúdo da frequência está variando com o tempo. Deve-se enfatizar as características do sinal, apenas nas proximidades do instante de interesse. Utiliza-se uma janela de observação visando fornecer uma divisão apropriada do sinal, mas sabe-se pelo princípio de Heisenberg que a largura dessa janela pode representar um ponto negativo na aplicação dessa técnica, já que no domínio da frequência esse método pode até apresentar uma boa resolução, mas esta se mostra pobre no domínio do tempo.

O mesmo autor diz que o método Wigner-Ville (WVD) constitui uma representação básica no domínio do tempo-frequência capaz de fornecer informações úteis. Este método apresenta boa resolução no plano tempo-frequência, no entanto, este tem como ponto negativo o fato de incorporar interferências quando sinais formados por mais de uma componente espectral são analisados.

O autor citado acima menciona que a Transformada Wavelet considera a utilização de escalas menores quando se deseja a obtenção de maior resolução das informações contidas no sinal em alta frequência e escalas maiores quando se deseja maior resolução nas informações de sinais de baixa frequência, onde a utilização dessas escalas variáveis constitui um avanço em relação à técnica Short-Time Fourier Transform (STFT). Esta resume-se a busca por famílias de funções chamadas wavelets filhas, através de operações de dilatação e translação da wavelet mãe. As capacidades de multi-resolução e localização no tempo tornam este método útil para a aplicação de diagnósticos de falha.

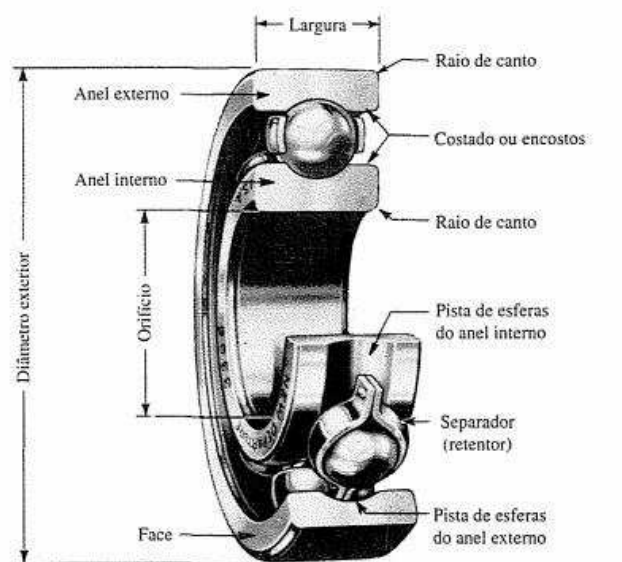
3.3 ANÁLISE DE ENVELOPE EM MANCAIS DE ROLAMENTO

3.3.1 Falhas em rolamentos

Segundo Barilli (2013), mancais de rolamento têm a função de suportar uma carga, normalmente caracterizado por um eixo, permitindo o movimento rotacional em relação a estrutura da máquina rotativa, e seu adequado funcionamento depende de um contato suave entre seus componentes.

O mancal de rolamento é contituído de quatro peças essenciais, figura 3.18, que são o anel externo, o anal interno, as esferas ou elementos de rolamento e o separador. Este tem a finalidade de suportar carregamentos e permitir o movimento relativo entre duas partes.

Figura 3.18 - Elementos do mancal de rolamento



Fonte: (Shigley, Mischke e Budynas, 2005, p.537)

Os rolamentos podem ser usados por um longo período, em geral até a vida de fadiga, contudo estes apresentam deterioração devido ao uso. Os defeitos em rolamentos se originam e propagam devido a causas como: sobrecarga, desbalanceamento, mudanças abruptas de temperatura, lubrificação inadequada, montagem incorreta, vibrações externas e defeitos de fabricação (GONÇALVES, 2012).

As falhas em rolamentos acontecem devido à defeitos localizados nas pistas externas e internas, nos elementos rolantes ou no retentor, onde estes defeitos produzem uma série de impactos de vibração, que ocorrem devido ao impacto dos elementos rolantes com a superfície de defeito (MESQUITA, SANTIAGO, *et al.*, 2002). A taxa de repetição deste impacto é chamado de frequência característica de defeito, e esta pode ser determinada em função da velocidade de rotação do eixo e da geometria dos componentes do rolamento (REIS, SILVA, *et al.*, 2016).

Segundo Reis, Silva, *et al.* (2016) considerando que a pista externa do rolamento é estacionária e que a pista interna gira junto com o eixo de rotação, pode-se determinar as frequências características de defeitos de acordo com as equações 3.10, 3.11, 3.12 e 3.13.

BPFO – Ball Pass Frequency Outer Race

$$BPFO = \frac{n}{2} f_r \left(1 - \frac{d}{D} \cos \theta \right) \quad (3.10)$$

BPFI – Ball Pass Frequency Inner Race

$$BPFI = \frac{n}{2} f_r \left(1 + \frac{d}{D} \cos \theta \right) \quad (3.11)$$

BSF – Ball Spin Frequency

$$BSF = \frac{d}{2D} f_r \left(1 - \left(\frac{d}{D} \right)^2 \cos \theta \right) \quad (3.12)$$

FTF – Fundamental Train Frequency

$$FTF = \frac{1}{2} f_r \left(1 + \frac{d}{D} \cos \theta \right) \quad (3.13)$$

3.3.2 Fundamentos da análise de envelope

Para uma melhor compreensão da técnica do envelope é necessário o conhecimento de alguns tópicos, como: transformada de Fourier, transformada de Hilbert, batimento, modulação e demodulação AM.

Transformada de Fourier

Segundo Girod, Rabenstein e Stenger (2003) a transformada de Fourier ou espectro de Fourier é o resultado da transformação $X(j\omega)$, como mostra a equação 3.14.

$$X(j\omega) = F\{x(t)\} = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-j\omega t} dt \quad (3.14)$$

Onde temos que $e^{-j\omega t}$ é conhecida como função complexa do tempo, ω é o parâmetro de frequência.

A transformada de Fourier é a técnica usada para a obtenção da transformação do sinal no domínio do tempo para o domínio da frequência. As características de um sinal captado podem ser representadas pelo espectro de frequência, através deste múltiplas frequências componentes do sinal e a magnitude de cada um destes componentes podem ser avaliadas (MARTINS, JÚNIOR, *et al.*, 2016).

Conforme o autor supracitado o espectro de frequência, para um sinal discreto, pode ser obtido através da Transformada Discreta de Fourier (DFT), a qual pode ser expressa na equação 3.15.

$$X(m) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{\frac{j2\pi mn}{N}} \quad m = 0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (3.15)$$

Onde $x(n)$ é o conjunto de pontos que representa o sinal no tempo e N é o número de pontos amostrados.

De acordo com Oppenheim e Willsky (2010) a transformada rápida de Fourier, ou FFT se mostra uma eficiente implementação digital para a redução do tempo, em algumas grandezas, para se calcular as transformadas. Este algoritmo, usado como otimização da Transformada Discreta de Fourier, consegue reduzir o esforço computacional, pois este divide a sequência $x(n)$ em duas sequências menores, uma com os coeficientes de índice par e outra com os coeficientes de índice ímpares. A consecução da FFT foi muito importante para o desenvolvimentos de técnicas de análise de sinais, que nos permite, por exemplo, obter bandas espectrais através de seu uso.

Transformada de Hilbert

Segundo Gonçalves (2012) a junção entre os componentes reais e imaginários da transformada de Fourier de um sinal causal pode ser descrita pela transformada de Hilbert. Então, a transformada de Hilbert para um sinal real $g(t)$ é descrita pela equação 3.16.

$$\hat{g}(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{g(\tau)}{t - \tau} d\tau \quad (3.16)$$

A transformada inversa de Hilbert é definida pela integral de convolução, como mostra a equação 3.17.

$$g(t) = -\frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\hat{g}(\tau)}{t - \tau} d\tau \quad (3.17)$$

Computacionalmente pode-se interpretar a transformada de Hilbert como sendo a convolução apresentada na equação 3.18.

$$\hat{g}(t) = g(t) * \frac{1}{\pi t} \quad (3.18)$$

Que pelo teorema de convolução das transformadas de Fourier, pode ser avaliado como o produto da transformação de $g(t)$ com $-j * \text{sgn}(f)$. Pode-se dizer que a transformada de Hilbert é considerada um filtro que desloca fases de todas as componentes de frequência de sua entrada em 90° .

Temos que um sinal analítico $Y(t)$ pode ser construído a partir de um sinal de valor real $y(t)$, como mostra a equação 3.19.

$$Y(t) = y(t) + jh(t) \quad (3.19)$$

Onde $Y(t)$ é o sinal analítico construído a partir de $y(t)$ e sua transformada de Hilbert; $y(t)$ é o sinal de entrada e $h(t)$ é a transformada de Hilbert do sinal de entrada.

As partes reais e imaginárias da equação 3.19 podem ser expressas em coordenadas polares como mostra a equação 3.20.

$$Y(t) = A(t)e^{j\theta(t)} \quad (3.20)$$

Onde $A(t)$ é o envelope ou a amplitude do sinal analítico e θ é a fase do sinal analítico.

De acordo com Gonçalves (2012), a demodulação de sinais modulados em amplitude (AM) é a aplicação mais frequente da transformada de Hilbert.

Batimentos

O movimento resultante da soma de dois movimentos harmônicos cujas frequências estão próximas dá origem ao fenômeno do batimento (RAO, 2008). Ou seja, o batimento resulta da somatória de duas vibrações com frequências próximas, e neste fenômeno normalmente as amplitudes variam periodicamente (ALMEIDA, 2013).

De acordo com Halliday, Resnick e Walker (2009), o fenômeno do batimento pode ser calculado de acordo com os passos abaixo.

Considerando duas ondas s_1 e s_2 de mesma amplitude s_m , como mostra as equações 3.21 e 3.22.

$$s_1 = s_m \cos \omega_1 t \quad (3.21)$$

$$s_2 = s_m \cos \omega_2 t \quad (3.22)$$

Onde $\omega_1 > \omega_2$ e segundo o princípio da superposição, o somatório das ondas é igual a equação 3.23.

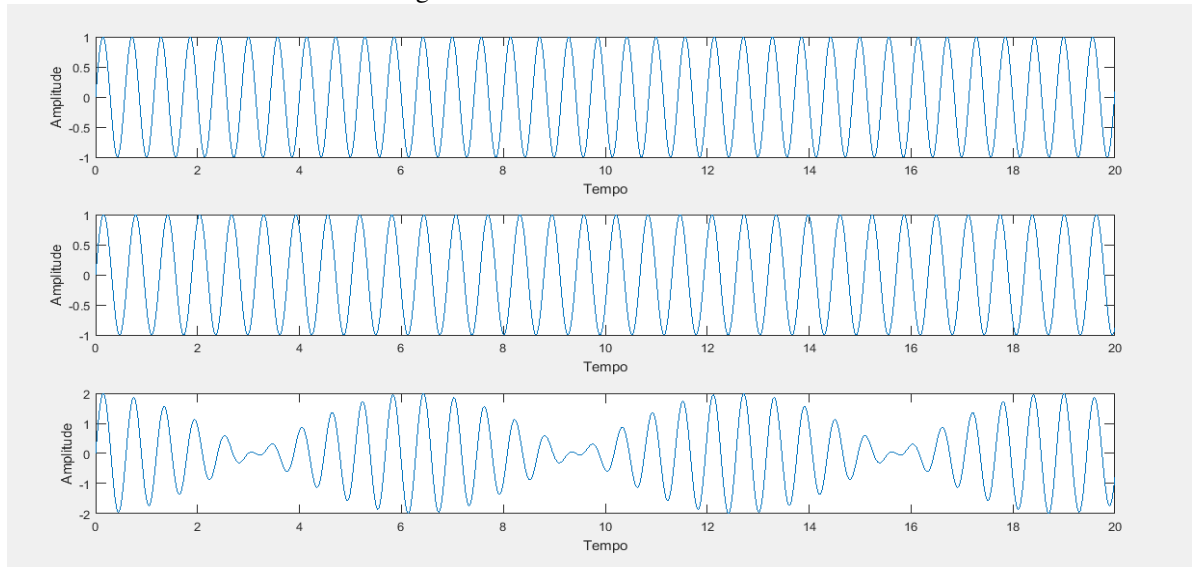
$$s = s_1 + s_2 = s_m (\cos \omega_1 t + \cos \omega_2 t) \quad (3.23)$$

A equação acima pode ser reescrita conforme a equação 3.24.

$$s(t) = \left[2s_m \cos \left(\frac{\omega_1 - \omega_2}{2} t \right) \right] \cos \left(\frac{\omega_1 + \omega_2}{2} t \right) \quad (3.24)$$

O fenômeno do batimento, figura 3.19, é regularmente visto em máquinas, estruturas e centrais elétricas. Em máquinas e estruturas, esse fenômeno acontece quando a frequência excitadora se aproxima da frequência natural do sistema.

Figura 3.19 - Fenômeno do Batimento



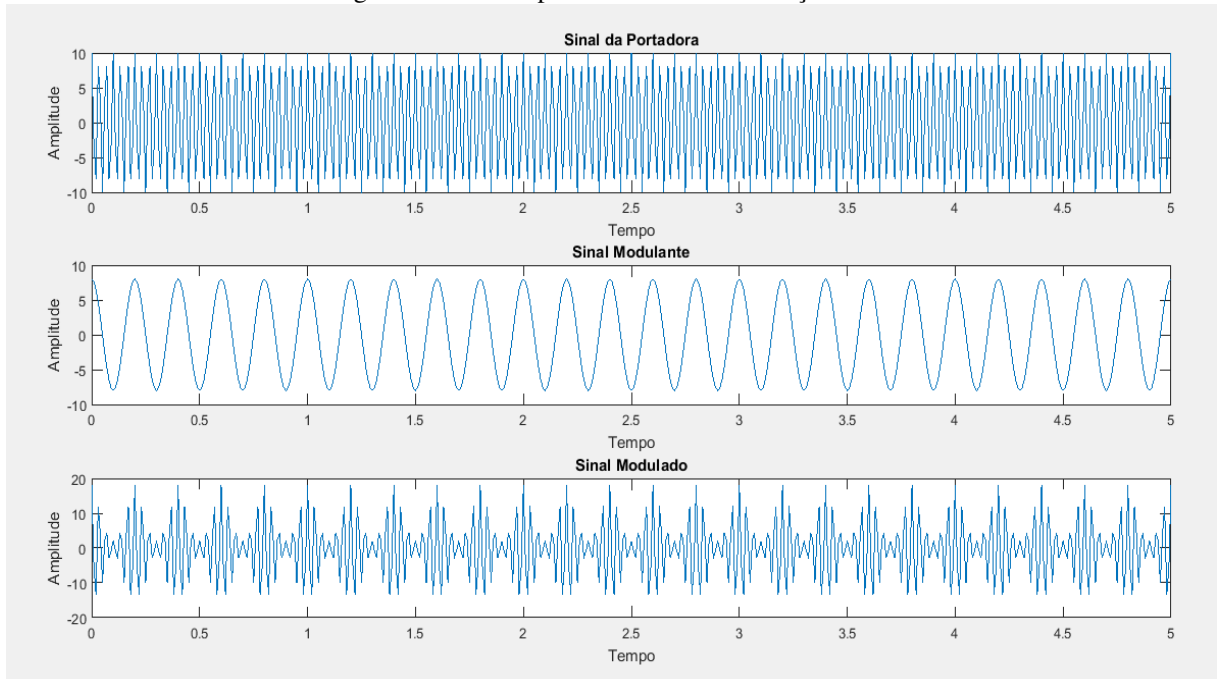
Fonte: (Autor, 2017)

Modulação AM

A modulação é o processo de associar um sinal que contém a informação em outro sinal, onde estes possam ser efetivamente transmitidos. Dentre os vários métodos de modulação existe a modulação AM que consiste em um sinal, o qual se quer transmitir, sendo usado para modular a amplitude de outro sinal (OPPENHEIM e WILLSKY, 2010).

Segundo Ponci e Cunha (2011), a modulação em amplitude pode ser definida como a variação com o tempo da amplitude de uma vibração, onde a componente básica é denominada como sinal de portadora $c(t)$; de sinal modulante $x(t)$, o sinal que representa a variação de amplitude da portadora; e a frequência é denominada frequência de modulação f_m . Os sinais encontrados em modulação AM são mostrados na figura 3.20.

Figura 3.20 - Exemplo de sinais em modulação AM



Fonte: (Autor, 2017)

O sinal modulado $y(t)$ é o produto do sinal da portadora e do sinal modulante, como mostra a equação 3.25.

$$y(t) = x(t) * c(t) \quad (3.25)$$

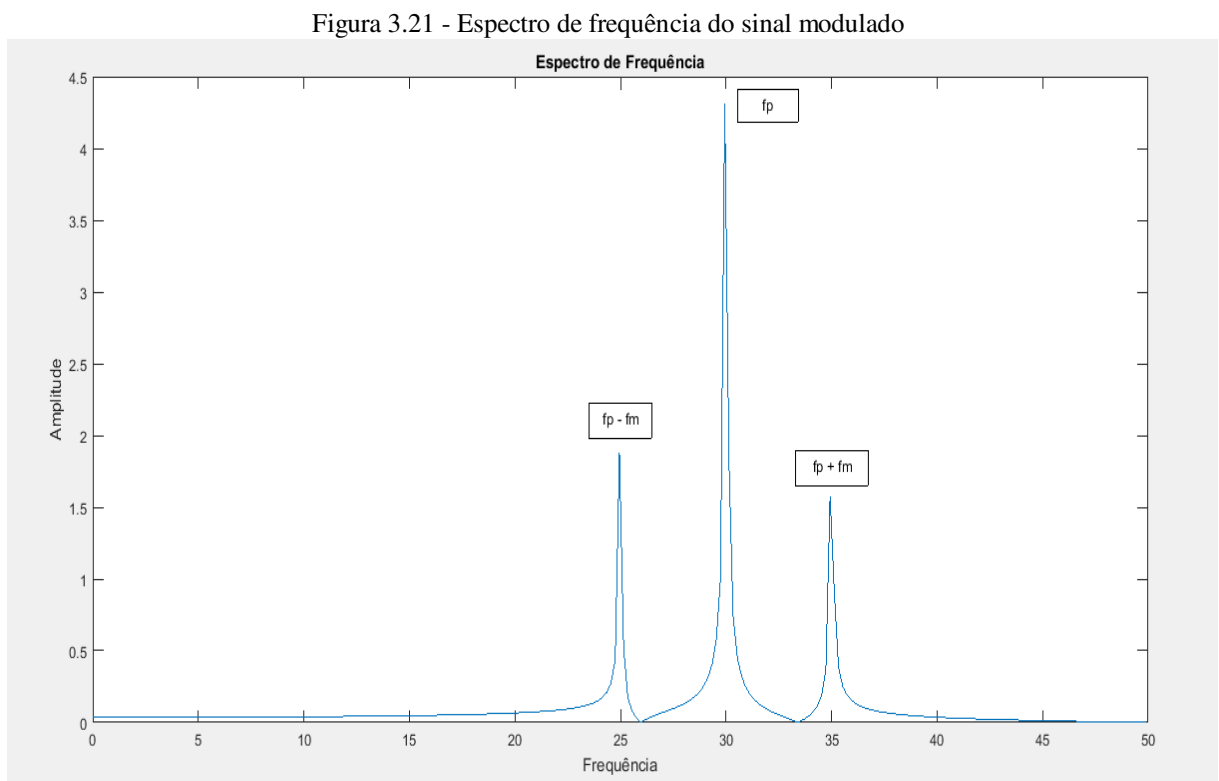
O sinal da portadora, o sinal modulante e o sinal modulado podem ser obtidos através das equações 3.26, 3.27 e 3.28, respectivamente.

$$c(t) = A_p \cos(2\pi * f_p * t) \quad (3.26)$$

$$x(t) = A_m \cos(2\pi * f_m * t) \quad (3.27)$$

$$y(t) = [A_p + A_m \cos(2\pi * f_m * t)] \cos(2\pi * f_p * t) \quad (3.28)$$

O espectro do sinal modulado, figura 3.21, possui um pico central na frequência da portadora f_p cercado por frequências laterais que se situam acima e abaixo da portadora, estas são espaçadas entre si e do pico central por um valor semelhante ao da frequência de modulação.



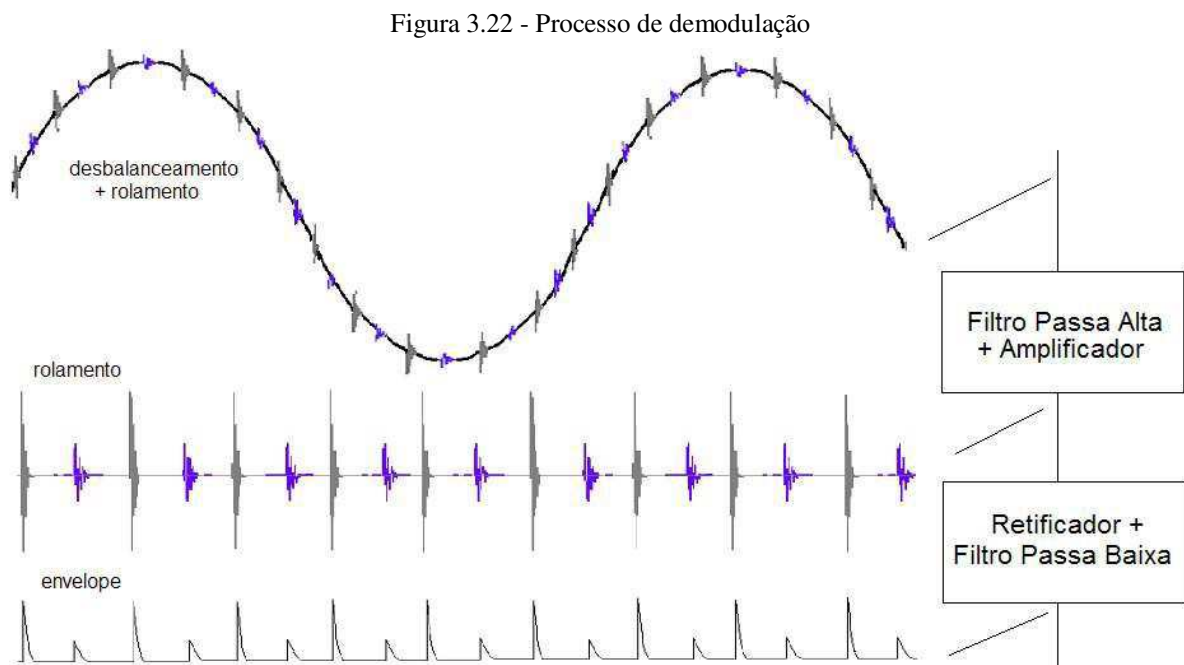
Fonte: (Autor, 2017)

Os defeitos em rolamentos produzem frequentes impactos que excitam vibrações livres de curta duração em frequências acima de 500 Hz. Essas vibrações livres geradas pelos defeitos em rolamentos são moduladas em amplitude pela sequência de impactos repetitivos e pelo efeito do amortecimento. As frequências naturais dos componentes do rolamento representam a portadora e as frequências características de defeito, BSF, BPFO e BPFI representam o sinal modulante (PONCI e CUNHA, 2011).

Demodulação AM

A demodulação é o processo no qual ocorre a extração do sinal que contém informações, ou seja, o objetivo desta técnica é extrair o envelope de um sinal modulado.

O processo de demodulação, figura 3.22, elimina as componentes de alta energia, permitindo identificar com maior exatidão os defeitos presentes nos rolamentos, além disso, a taxa de repetição dos impactos, que ocorrem devido à presença dos defeitos, podem ser determinadas a partir da análise dos espectros de envelope.



Fonte: (Ponci e Cunha, 2011)

Como visto na figura acima, o processo de modulação é feito através de circuitos analógicos que são compostos de filtro passa-alta, retificador e filtro passa-baixa.

O filtro passa-alta tem a função de remover as componentes de grande amplitude que dificultam a detecção das componentes moduladas de baixas amplitudes, e o retificador e o filtro passa-baixa extraem a envoltória das vibrações livres de alta frequência (PONCI e CUNHA, 2011).

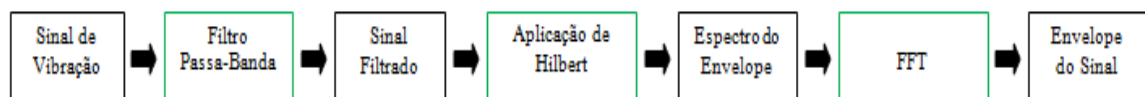
Análise de Envelope

A detecção por envelope é uma técnica que tem a finalidade de identificar defeitos em rolamentos através da extração das frequências características de defeito do sinal vibração de um rolamento que apresenta defeito. Em complemento, temos que a análise do envelope tem o objetivo de trocar a análise de frequências em uma ampla faixa de frequências portadoras, para uma faixa menor de frequências características de falha (BARILLI, 2013).

A técnica do envelope é uma ferramenta que permite diagnosticar defeitos em rolamentos, os quais provocam vibrações quando estão em contato sob carga com outra superfície do rolamento, ou seja, o impacto produz uma ressonância no sistema. As falhas nos rolamentos ocorrem devido a esses sinais de ressonância que normalmente encontram-se em uma faixa de frequência específica. Então, na análise de envelope são usados filtros para que o sinal possa ser filtrado ao redor de uma das frequências de ressonância, deste modo eliminam-se ruídos que dificultem a detecção de falhas utilizando a referida técnica, e após essa filtragem o sinal isolado passa pelo processo de demodulação para obtenção do envelope do sinal. Aplicando-se a FFT à este sinal obtém-se linhas espectrais nas frequências características de defeitos de rolamentos, o que permite a identificação e localização de falhas neste componente mecânico.

De acordo com o autor acima, a técnica do envelope é utilizada de acordo com a sequência de passos, como mostra a figura 3.23.

Figura 3.23 - Passo a passo da análise do envelope



Fonte: (Santos, 2017, p.38)

1º passo: Utilizar a transformada de Fourier para que o sinal seja transformado do domínio do tempo para o domínio da frequência, e a partir deste novo domínio definir a faixa de frequência para que seja determinado uma faixa de filtragem.

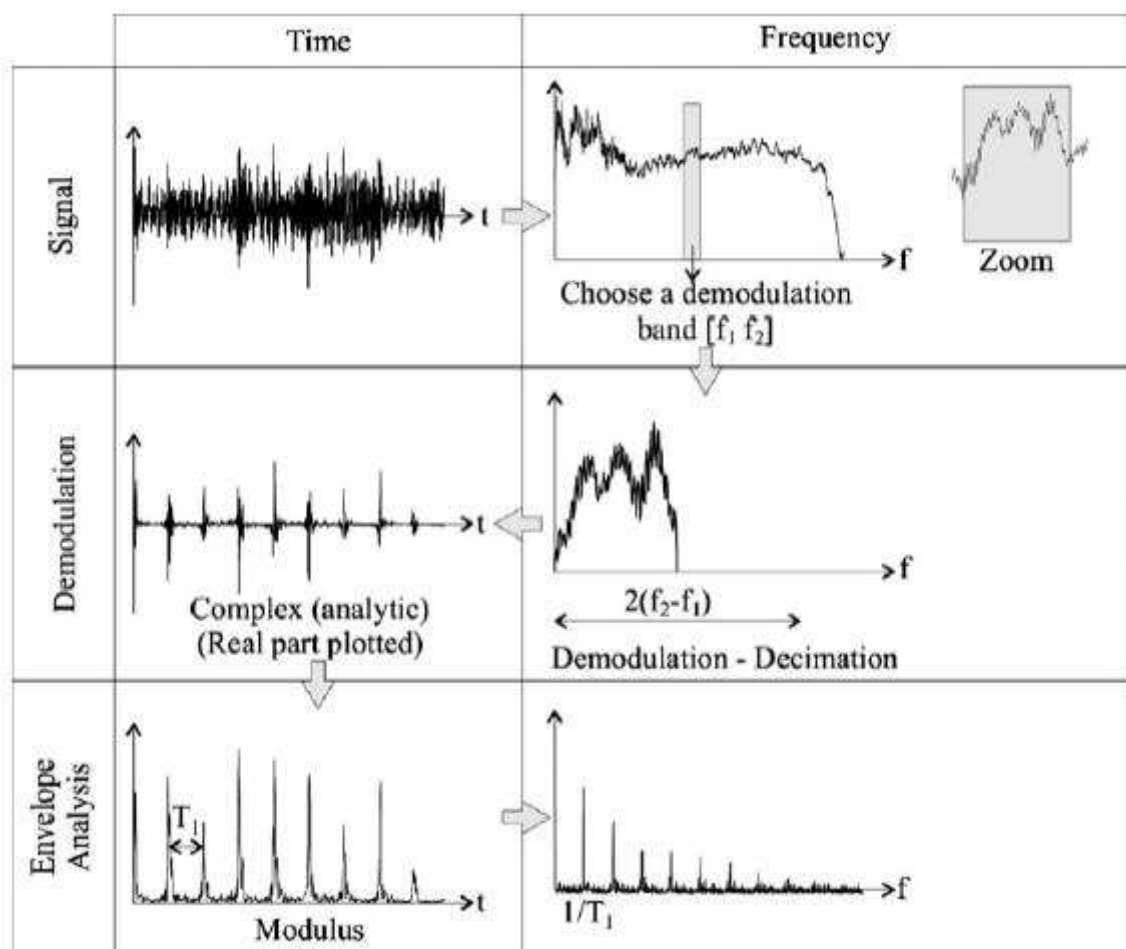
2º passo: Aplicar o filtro passa-banda para que frequências indesejáveis sejam eliminadas, e aplicar filtro passa-alta para eliminação da componente DC.

3º passo: Aplicar a transformada de Hilbert para obtenção do envelope, a partir do processo de demodulação.

4º passo: Aplicar a transformada de Fourier ao envelope do sinal para obtenção das frequências características de defeito do rolamento.

O processo de análise do envelope utilizando-se a transformada de Hilbert é mostrado na figura 3.24.

Figura 3.24 - Processo de análise do envelope



Fonte: (Barilli, 2013, p.20)

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Máquinas rotativas estão sujeitas à fadiga, desgaste e deformação, onde estes efeitos provocam um aumento dos níveis de vibração nos componentes mecânicos, por exemplo, em rolamentos. Por isso, se faz necessário a utilização de técnicas de medição de vibração, como a análise do envelope, que possam detectar qualquer alteração nos sinais de vibração, permitindo então a detecção da falha.

Os sinais de vibração são obtidos através de transdutores que transformam vibrações mecânicas em sinais eletrônicos, onde estes são fixados em determinados pontos da máquina. Dentre os transdutores podem ser citados os sensores de deslocamento, sensores de velocidade, sensores de aceleração, sensores de fase e frequência.

Após a captação do sinal de vibração, este é analisado por técnicas eficazes que produzem um diagnóstico seguro sobre falhas em máquinas rotativas. Estas técnicas encontram-se no domínio do tempo, domínio da frequência e domínio tempo-frequência.

O nível RMS, fator de crista e as órbitas de Lissajous são técnicas de medição de vibração no domínio do tempo, porém estas não são muito utilizadas por não oferecerem informações confiáveis sobre os defeitos nos componentes mecânicos.

O sinal de vibração é transformado do domínio do tempo para o domínio da frequência através da técnica computacional chamada de Transformada Rápida de Fourier (FFT), a qual possibilita a análise do sinal através do gráfico de espectro de frequência, que mostra a frequência de ressonância (portadora) permitindo o conhecimento do tipo de falha e a localização da mesma. Dentre as técnicas no domínio da frequência temos a Transformada Rápida de Fourier, a análise de envelope e o Cepstrum.

Para as técnicas no domínio tempo-frequência tem-se a Short-Time Fourier Transform (STFT), a Wigner-Ville Distribution (WVD) e a Wavelet Transform (WT).

Os rolamentos são suscetíveis a falhas que podem acontecer devido a defeitos nas pistas externas, internas, nos elementos rolantes ou no retentor. As frequências características de defeitos em rolamentos que são a BPFO, BPFI, BSF e FTF podem ser calculadas, conforma já descrito no trabalho, onde se comparando estas com o resultado obtido no gráfico de espectro de frequência pode-se indicar e localizar os defeitos nos rolamentos.

A análise do envelope é uma técnica que procura identificar defeitos em rolamentos através da extração das frequências características de defeito. Para o uso desta técnica é necessário o conhecimento sobre a Transformada de Fourier, Transformada de Hilbert, batimentos, modulação AM e demodulação AM.

Neste trabalho comentou-se sobre a vantagem das técnicas do domínio tempo-frequência, que é a capacidade de lidar com sinais estacionários e não-estacionários, em relação às técnicas no domínio da frequência, então deixo como sugestão de trabalho a comparação entre as técnicas destes domínios, utilizando-se métodos experimentais ou computacionais.

REFERÊNCIAS

- ABREU & OLIVEIRA. **Automação, monitoração de vibração e ambiental**. Disponível em: <<https://pt.slideshare.net/MarcoAntonioCosta/anlise-de-vibracao>>. Acesso em: 19 Outubro 2017.
- ABREU, R. A.; BRITO, J. N.; LAMIM, P. C. Identificação de falhas em rolamentos através da detecção de envelope e da decomposição em wavelets. **CREEM**, Uberlândia, 2007. 1-10.
- ALMEIDA, M. T.; ALMEIDA, F. R. V. **Princípios de diagnósticos de defeitos em máquinas rotativas**. Itajubá: FUPAI/MTA, 2013.
- BALBINOT, A.; BRUSAMARELLO, V. J. **Instrumentação e fundamentos de medidas**. 2ª. ed. Rio de Janeiro: LTC, v. 2, 2013.
- BARILLI, R. J. D. C. **Análise de falhas em mancais de rolamento utilizando a técnica do envelope**. Dissertação (Graduação) - Engenharia Naval e Oceânica pela Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2013.
- GIROD, B.; RABENSTEIN, R.; STENGER, A. **Sinais e Sistemas**. 1ª edição. ed. Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos S.A., 2003. 340 p.
- GONÇALVES, J. F. **Identificação de defeitos em rolamentos de esferas por análise de vibração utilizando transformada de Hilbert**. Dissertação (Graduação) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, p. 27. 2012.
- HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. **Fundamentos de Física - gravitação, ondas e termodinâmica**. 8ª. ed. Rio de Janeiro: LTC, v. 2, 2009. 295 p.
- KOKIL, S. Detection of Fault in Rolling Element Bearing using Condition Monitoring by Experimental Approach. **Internacional Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)**, 3, n. 8, Agosto 2014. 859-866.
- MARTINS, M. L. et al. Análise da aplicação da FFT (Fast Fourier Transform) no diagnóstico de falha em máquinas rotativas. **CILAMCE**, Distrito Federal, n. 37, p. 1-12, Novembro 2016.
- MENEZES, P. A. **Análise de vibrações aplicadas à detecção de falhas em rolamentos de cubo de roda**. Bacharelado em Engenharia Automotiva pela Universidade de Brasília. Brasília. 2015.
- MESQUITA, A. et al. Detecção de falhas em rolamentos usando transformadas tempo-frequência - comparação com análise de envelope. **MECOM**, Santa Fé, 21, Outubro 2002. 1938 - 1954.

MUCHERONI, M. F. Vibrações Mecânicas I e II. **Escola de Engenharia de São Carlos**, 2011. Disponível em: <<http://www2.eesc.usp.br/labdin//mucheroni/Vibr%20Mec%2002.pdf>>. Acesso em: 9 Outubro 2017.

NEPOMUCENO, L. X. E. A. **Técnicas de Manutenção Preditiva**. São Paulo: Edgard Blucher, v. 1, 1989. 501 p.

OPPENHEIM, A.; WILLSKY, A. **Sinais e Sistemas**. 2ª ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010.

PONCI, L. P.; CUNHA, P. M. R. Teknikao - Tecnologia em análise de vibrações e balanceamento. **Previsão de Falha de Rolamentos por Análise Espectral e de Envelope**, 2011. Disponível em: <<http://teknikao.blogspot.com.br/2011/05/previsao-de-falha-de-rolamentos-por.html>>. Acesso em: 9 Novembro 2017.

PRUFTECHNIK. **Accelerometers**. Disponível em: <<https://www.pruftechnik.com/us/products/condition-monitoring-systems/sensors-and-accessories-for-condition-monitoring/accelerometers.html>>. Acesso em: 20 Outubro 2017.

RAO, S. S. **Vibrações Mecânicas**. 4ª ed. São Paulo: Pearson, 2008.

REIS, R. D. A. et al. Emprego da transformada de Wavelet na detecção de falhas em rolamentos. **Vértices**, Campos dos Goytacazes, v. 18, n. 3, p. 157 - 171, Novembro 2016.

SANTOS, R. D. S. **Deteção de falhas em rolamentos de máquinas rotativas utilizando técnicas de processamento de sinais**. Dissertação (Doutorado) - Engenharia Mecânica pela Universidade Estadual Paulista. Guaratinguetá. 2017.

SHABANA, A. A. Theory of vibration: an introduction. In: LING, F. **Mechanical Engineering Series**. 2ª. ed. Berlin: Springer, 1995. Cap. 1, p. 1 - 31.

SHIGLEY, J.; MISCHEKE, C.; BUDYNAS, R. **Projeto de Engenharia Mecânica**. 7ª ed. Porto Alegre: Bookman, 2005.

SICK SENSOR INTELLIGENCE. **Sensor de Proximidade Indutivo**. Disponível em: <<https://www.sick.com/br/pt/sensores-de-proximidade/sensores-de-proximidade-indutivos/c/g190731>>. Acesso em: 19 Outubro 2017.

SKF. **Apostila de tecnologia de vibrações**, 2004. Disponível em: <<https://pt.scribd.com/doc/139193419/Vibracoes-SKF>>. Acesso em: 23 Outubro 2017.

THOMAZINI, D.; DE ALBUQUERQUE, P. B. **Sensores Industriais: fundamentos e aplicações**. 4ª ed. Érica, 2005.