

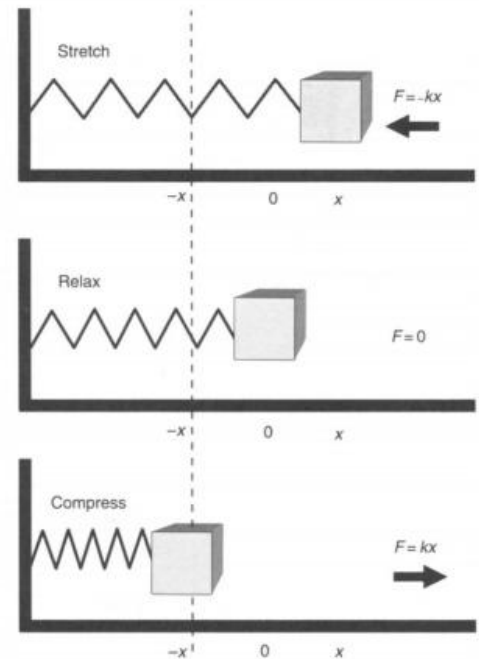
Monitoração de Máquinas Rotativas

Prof. Eduardo Loureiro, DSc.

MONITORAÇÃO DE MÁQUINAS ROTATIVAS - VIBRAÇÕES

Vibração é o movimento de uma máquina ou de uma parte da máquina para frente e para trás de seu ponto de repouso.

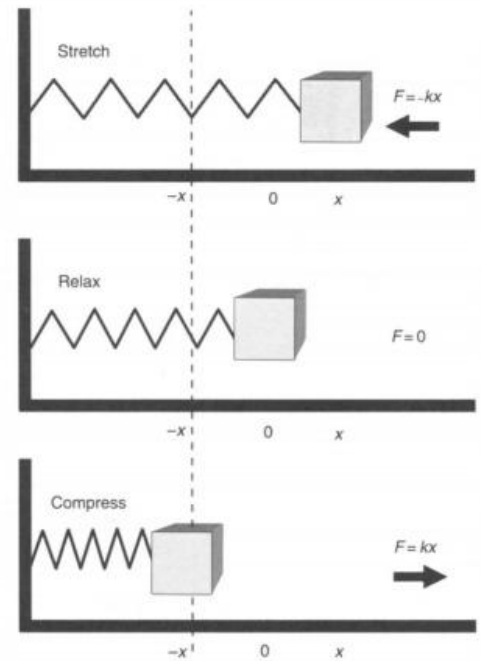
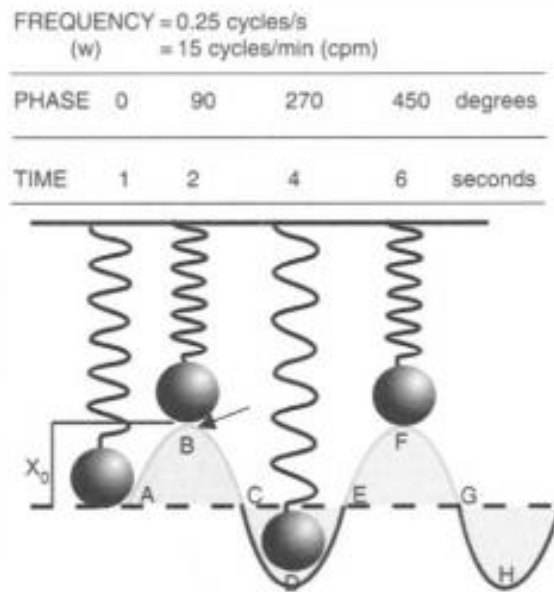
Se uma força for aplicada à massa, ela se desloca para a esquerda comprimindo a mola. Quando a massa é liberada, move-se de volta para a posição neutra e continua movendo-se para a direita até a tensão na mola parar a massa. E o ciclo teoricamente se repetirá indefinidamente se não houver amortecimento ou agentes externos (atrito)



MONITORAÇÃO DE MÁQUINAS ROTATIVAS - VIBRAÇÕES

Este movimento é chamado harmônico simples.

$$X = X_0 \text{sen} \omega t \quad \omega = 2\pi f$$



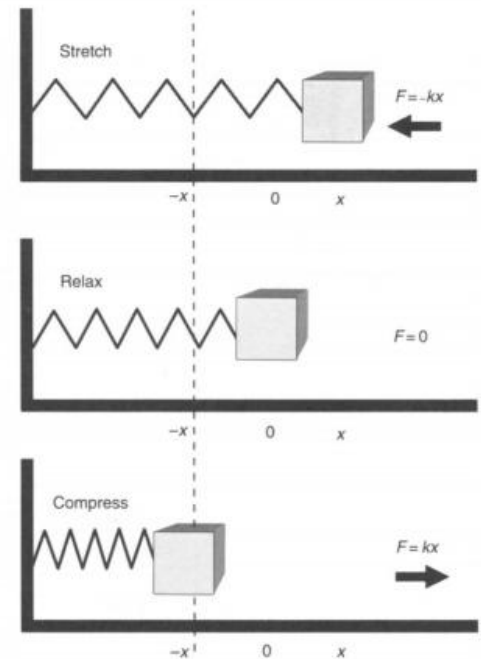
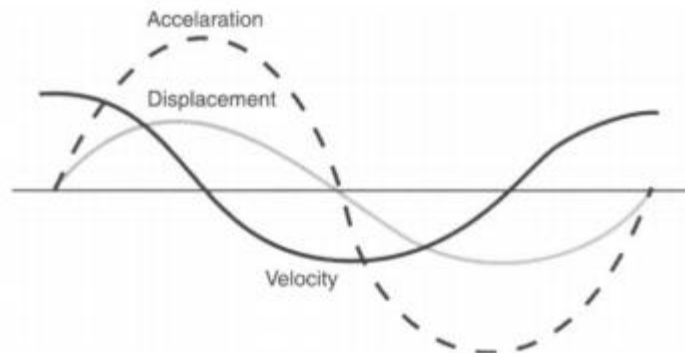
MONITORAÇÃO DE MÁQUINAS ROTATIVAS - VIBRAÇÕES

Quando a massa percorre seu caminho alternativo, a velocidade muda de zero para um valor máximo.

$$\text{velocity} = \frac{dX}{dt} = X_0 \cdot \omega \cdot \cos \omega t$$

Do mesmo jeito a aceleração varia:

$$\text{acceleration} = \frac{d(\text{velocity})}{dt} = -X_0 \cdot \omega^2 \cdot \sin \omega t$$



MONITORAÇÃO DE MÁQUINAS ROTATIVAS - VIBRAÇÕES

O comprimento do eixo x corresponde a um segundo.

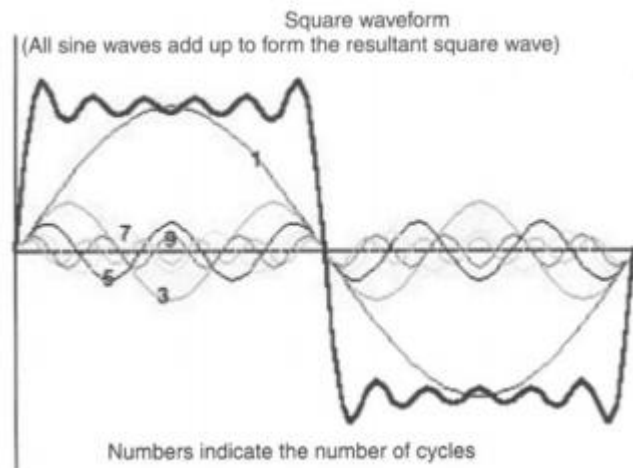
A onda 1 tem uma frequência de 1 Hz.

A onda 3 tem uma frequência de 3 Hz.

A onda 5 tem uma frequência de 5 Hz...

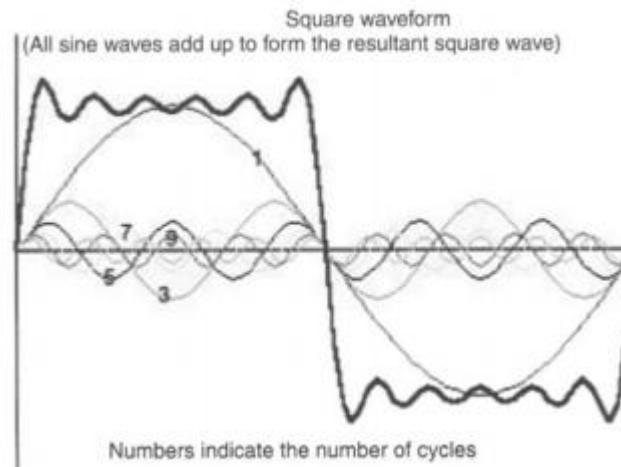
A série ímpar de ondas 1,3,5,7,9.. São chamadas de harmônicas ímpares da frequência fundamental.

A primeira onda da série é denominada frequência fundamental.



MONITORAÇÃO DE MÁQUINAS ROTATIVAS - VIBRAÇÕES

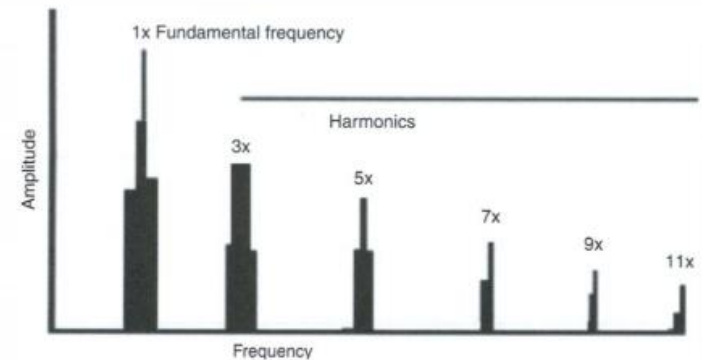
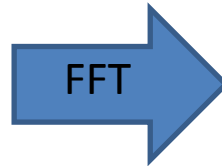
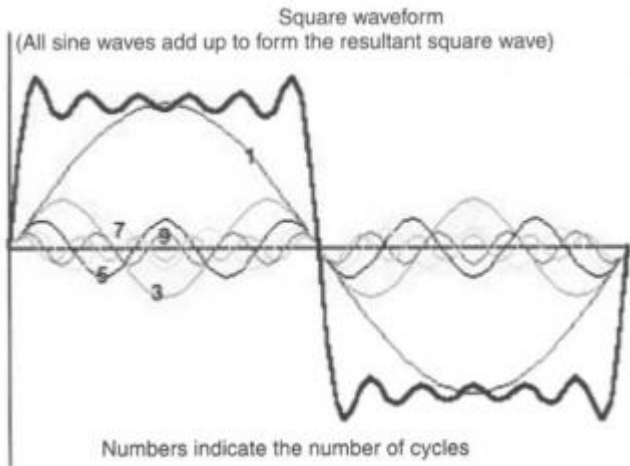
Se a frequência fundamental for somada com as harmônicas ímpares. A onda resultante é a representada pela linha mais grossa na figura e se assemelha a uma forma de onda quadrada.



MONITORAÇÃO DE MÁQUINAS ROTATIVAS - VIBRAÇÕES

Se uma série de ondas senoidais podem ser somadas para formar uma forma de onda mais complexa, isto pode ser revertido?

Sim. Utilizando a Transformada de Fourier.



MONITORAÇÃO DE MÁQUINAS ROTATIVAS - VIBRAÇÕES

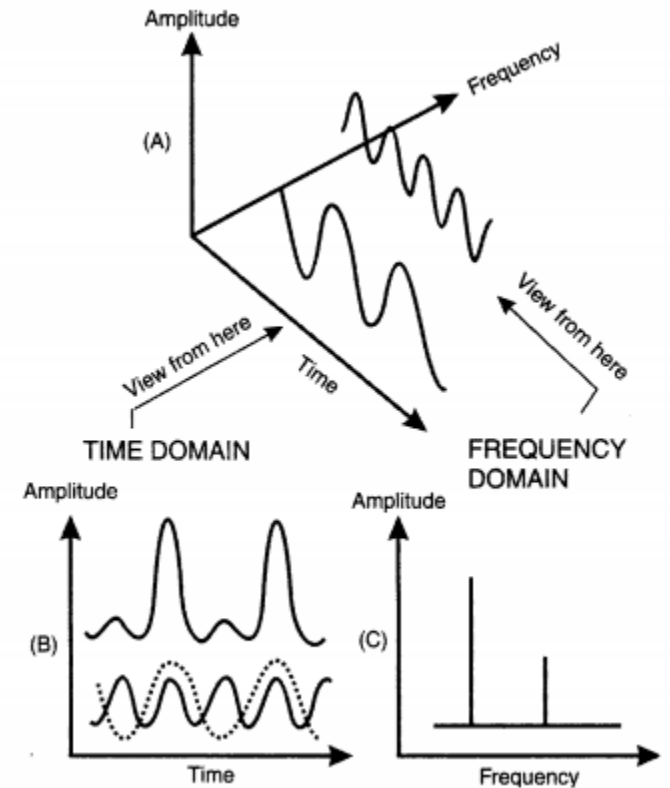
TRANSFORMADA DE FOURIER

Uma vibração pode ser representada por amplitudes de deslocamento, velocidade e aceleração em dois domínios (tempo e frequência).

As amplitudes são mostradas como séries de ondas senoidais e cossenoidais.

Essas ondas têm uma magnitude e uma fase.

A transformação do domínio do tempo para o domínio das frequências é feita pela Transformada Rápida de Fourier – FFT.



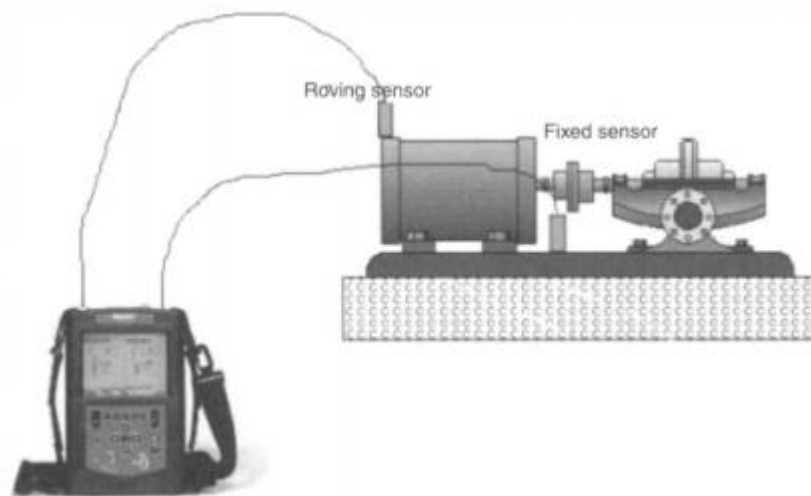
MONITORAÇÃO DE MÁQUINAS ROTATIVAS - VIBRAÇÕES

A vibração de uma máquina é um movimento físico.

Os transdutores de vibrações convertem este movimento em sinais elétricos.

Os sinais elétricos são passados para coletores de dados ou analisadores.

Os analisadores processam os sinais pra fornecer a FFT e outros parâmetros.



MONITORAÇÃO DE MÁQUINAS ROTATIVAS

Falhas comuns em equipamentos rotativos diagnosticadas por análise de vibrações:

1. Desbalanceamento
2. Eixo empenado
3. Excentricidade
4. Desalinhamento
5. Folgas na fixação
6. Correias
7. Engrenagens
8. Rolamentos
9. Falhas elétricas
10. Cavitação
11. Forças hidráulicas e aerodinâmicas

Convenções:

Pontos de medição:

Primeiro caracter: - Identificação dos mancais.

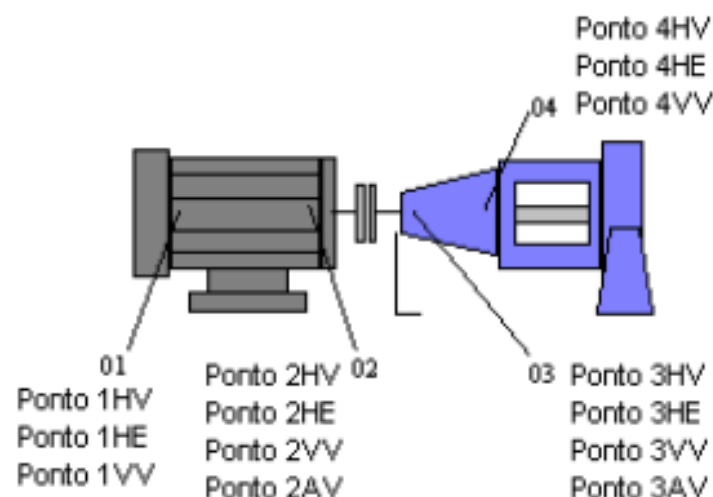
- 1 - mancal do acionador do lado não acoplado
- 2 - mancal do acionador do lado acoplado
- 3 - mancal do equipamento do lado acoplado
- 4 - mancal do equipamento do lado não acoplado

Segundo caracter: direção de medição:

- H - horizontal
- V - vertical
- A - axial

Terceiro caracter: grandeza medida:

- V - Velocidade de vibração- mm/s (rms)
- A - Aceleração - Gs (pico)
- E - Envelope de Aceleração - Gs (pico a pico).



ISO 2372 – ISO Guideline for Machinery Vibration Severity					
Ranges of Vibration severity		Examples of quality judgment for separate classes of machines			
Velocity – in/s – Peak	Velocity – mm/s – rms	Class I	Class II	Class III	Class IV
0.015	0.28				
0.025	0.45				
0.039	0.71				
0.062	1.12				
0.099	1.8				
0.154	2.8				
0.248	4.5				
0.392	7.1				
0.617	11.2				
0.993	18				
1.54	28				
2.48	45				
3.94	71				





A – Good 
 B – Acceptable 
 C – Still acceptable 
 D – Not acceptable 

Figure 2.13
ISO 2372 – ISO guideline for machinery vibration severity

Class I Individual parts of engines and machines integrally connected with a complete machine in its normal operating condition (production electrical motors of up to 15 kW are typical examples of machines in this category).

Class II Medium-sized machines (typically electrical motors with 15–75 kW output) without special foundations, rigidly mounted engines or machines (up to 300 kW) on special foundations.

Class III Large prime movers and other large machines with rotating masses mounted on rigid and heavy foundations, which are relatively stiff in the direction of vibration.

Class IV Large prime movers and other large machines with rotating masses mounted on foundations, which are relatively soft in the direction of vibration measurement (for example – turbogenerator sets, especially those with lightweight substructures).

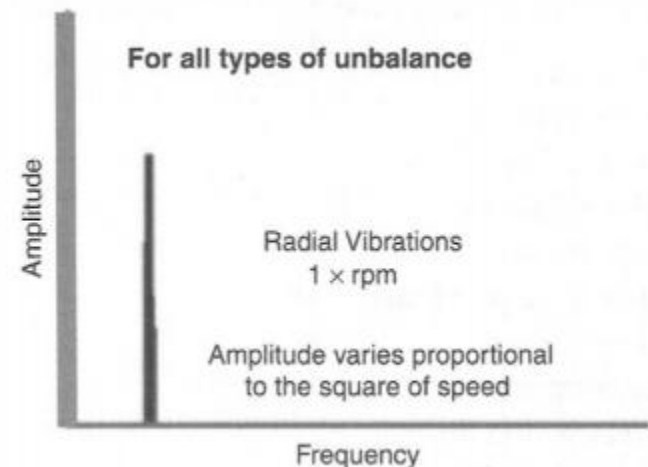
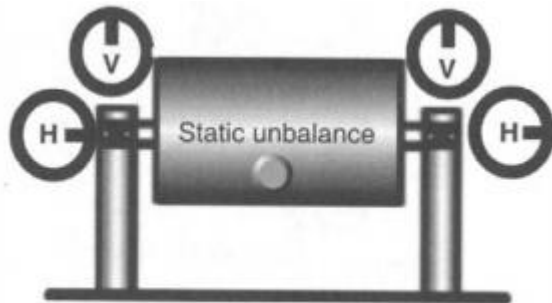
MONITORAÇÃO DE MÁQUINAS ROTATIVAS

Desbalanceamento estático:

Para todos os tipos de desbalanceamento, o espectro FFT irá mostrar uma frequência predominante de vibração $\rightarrow 1 \times \text{rpm}$.

O desbalanceamento estático estará em fase ($15\text{-}20^\circ$). Se o sensor é movido da direção vertical (V na figura) para a posição horizontal (H na figura) ficará defasado em 90° ($\pm 30^\circ$).

Um outro teste é mover o sensor de um mancal para outro no mesmo plano (vertical ou horizontal). A fase permanecerá a mesma.



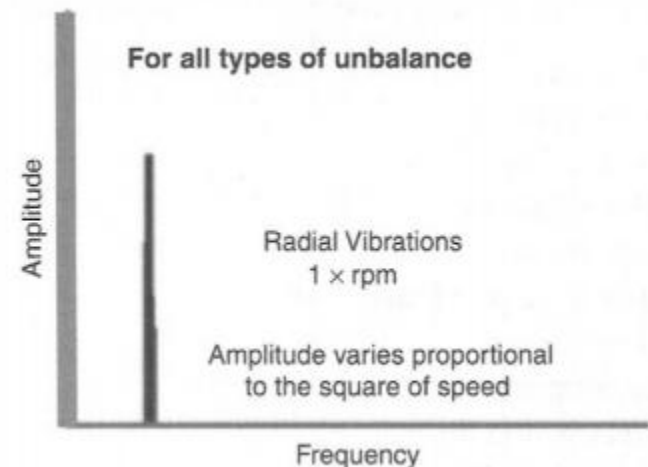
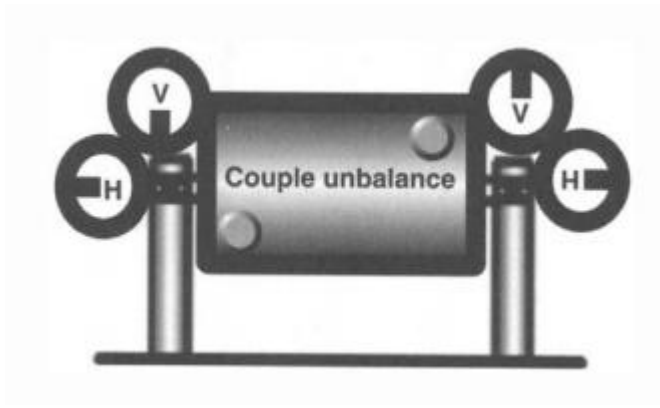
MONITORAÇÃO DE MÁQUINAS ROTATIVAS

Desbalanceamento binário:

Para todos os tipos de desbalanceamento, o espectro FFT irá mostrar uma frequência predominante de vibração $\pm 1 \times \text{rpm}$.

Este defeito pode causar altas vibrações radiais e axiais.

Existe uma diferença de fase de 180° entre os dois mancais nos planos horizontal e vertical.



MONITORAÇÃO DE MÁQUINAS ROTATIVAS

Eixo empenado (curvo):

As vibrações são fortes na direção axial e radial.

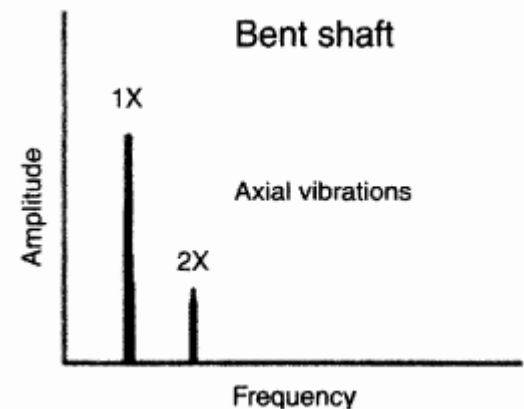
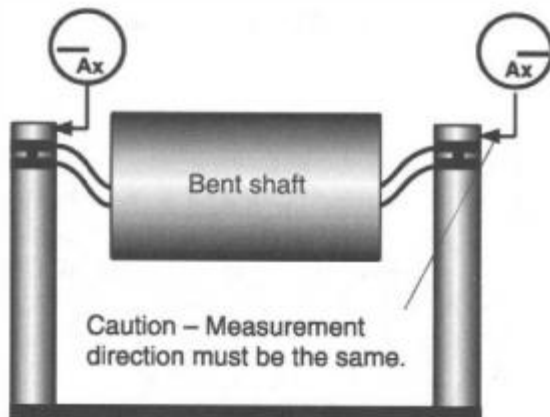
As vibrações axiais podem ser maiores que as radiais.

A FFT apresentará componentes 1x e 2x.

Se a amplitude de 1x é dominante então a curvatura é próximo ao centro do eixo.

Se for o contrário, a curvatura é próximo das extremidades do eixo.

A leitura será defasada 180° entre a direção radial e a axial.

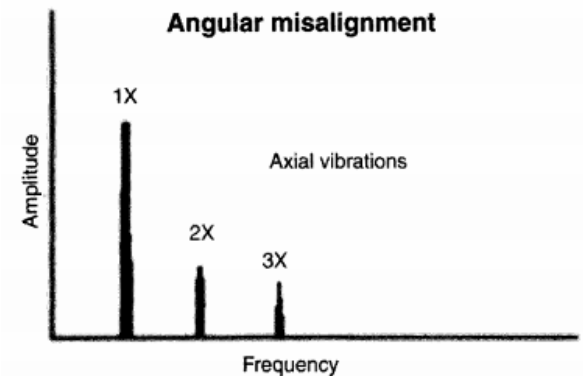
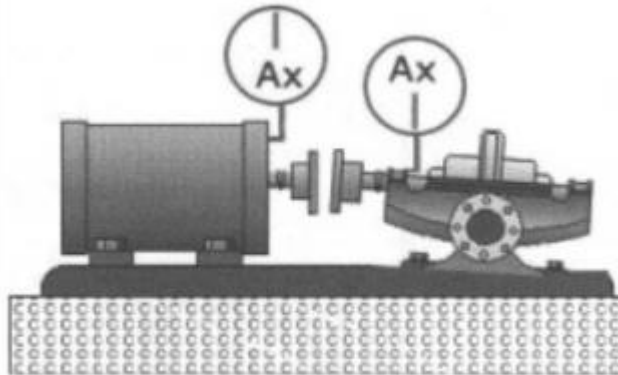


MONITORAÇÃO DE MÁQUINAS ROTATIVAS

Desalinhamento angular:

Desalinhamento raramente é visto com apenas pico com frequência de de 1x rpm. Normalmente, há alta vibração axial com 1x e 2x rpm. Entretanto, não é raro encontrar 1x, 2x e 3x rpm.

Uma diferença de fase de 180° será observada quando medindo a fase axial nos mancais das duas máquinas (ver figura)



MONITORAÇÃO DE MÁQUINAS ROTATIVAS

MEDIÇÃO DE FASE

Na análise de vibração, os instrumentos que medem fase são usados em conjunto com os analisadores. O analisador capta a forma de onda da vibração e os instrumentos abaixo fornecem informação sobre fase e rpm.

Estroboscópios

Fotocélulas

Analisadores de dois canais

MONITORAÇÃO DE MÁQUINAS ROTATIVAS

ESTROBOSCÓPIO

Contém uma lâmpada que emite luz de alta intensidade com uma certa frequência. Proporciona um método para visualizar diferenças de fase.

1. Uma marca de referência é feita no rotor.
2. O estroboscópio é alimentado pelo sinal de vibração 1x rpm do analisador.
3. A marca de referência aparece estacionária em uma posição angular.
4. Registra-se esta posição angular.
5. O sensor de vibração é fixo em outra posição.
6. A marca de referência é vista na mesma ou em outra posição angular.
7. A defasagem entre as duas posições em que os sensores foram colocados é a diferença das posições angulares registradas.



MONITORAÇÃO DE MÁQUINAS ROTATIVAS

ESTROBOSCÓPIO

Vantagens

1. Leves, de uso fácil e portáteis.
2. Podem ser usados para medir rpm, usando um acionador interno para fazer o eixo parecer estacionário.
3. Defeitos nos acoplamento podem ser visualizados “congelando” o movimento rotativo.



MONITORAÇÃO DE MÁQUINAS ROTATIVAS

ESTROBOSCÓPIO

Desvantagens

1. Máquinas que não tenham referências em suas partes rotativas precisam ser paradas para colocação da marca de referência.
2. Só fornece defasagem para vibrações 1X rpm.
3. É difícil obter leitura acuradas em graus.
4. Extremo cuidado é requerido em áreas perigosas.
5. O operador deve estar muito próximo da máquina para fazer a leitura.



MONITORAÇÃO DE MÁQUINAS ROTATIVAS

ANALISADORES DE DOIS CANAIS

Um analisador de um canal pode apenas receber os dados de um acelerômetro por vez.

Com um analisador de dois canais pode-se receber dados de entrada de dois sensores ao mesmo tempo de diferentes posições na máquina.

Então duas formas de onda de vibrações podem ser coletadas e analisadas.



MONITORAÇÃO DE MÁQUINAS ROTATIVAS

ANALISADORES DE DOIS CANAIS

Vantagens

1. Não há necessidade de marcas de referência no eixo.
2. As diferenças de fase obtidas são muito precisas.
3. Pode fornecer diferenças de fase em qualquer frequência.



MONITORAÇÃO DE MÁQUINAS ROTATIVAS

ANALISADORES DE DOIS CANAIS

Vantagens

1. Não há necessidade de marcas de referência no eixo.
2. As diferenças de fase obtidas são muito precisas.
3. Pode fornecer diferenças de fase em qualquer frequência.

Desvantagem

1. Custo.



MONITORAÇÃO DE MÁQUINAS ROTATIVAS

TERMOGRAFIA

É uma técnica de monitoração de máquinas rotativas bastante útil:

1. Não há contato com a superfície.
2. Não envolve ações arriscadas.
3. Não é afetada por ondas eletromagnéticas
4. É usada enquanto a máquina funciona.
5. Fornece informação instantânea.
6. Dados podem ser coletados e armazenados em formato digital.

MONITORAÇÃO DE MÁQUINAS ROTATIVAS

TERMOGRAFIA

É uma técnica de monitoração de máquinas rotativas bastante útil, porém tem algumas desvantagens:

1. O custo do hardware pode ser bem alto.
2. Alguns sistemas têm limitações de software.
3. Alguma fonte de radiação térmica próxima da área sendo monitorada pode afetar os dados coletados.
4. Distância, condições atmosféricas e temperatura podem afetar a qualidade das imagens.

Bomba e tubulação:

<https://www.youtube.com/watch?v=eO577YqMpBw>