

VIBROMETRIA

Princípios e exemplos de aplicação

Chedas Sampaio

Sumário

- Introdução.
- Quantificação da vibração.
- Vibração periódica.
- Ressonância e frequências naturais.
- Vibração versus Condição.
- Diagnóstico de avarias.
- Desequilíbrio.
- Ressonância.
- Desalinhamento.

Introdução

Vibrações

Estudo das Vibrações...Porquê!!??

A VIBRAÇÃO ESTÁ SEMPRE PRESENTE. DE FACTO NADA ESTÁ PARADO NA NATUREZA.

Geralmente a vibração não é boa. Ela causa desgaste excessivo das chumaceiras, causa fracturas, causa o alívio de apertos, causa o deficiente funcionamento de relés, causa a fractura de soldas em equipamentos electrónicos, causa ruído e causa incomodidade.

Escola Náutica I.D.Henrique

3

Introdução

Vibrações

Estudo das Vibrações...Porquê!!??

Nem toda a vibração é má. Alguma é benigna. É o caso dos martelos pneumáticos, é o caso dos vibradores hidráulicos de betão, é o caso das vibrações normais das máquinas (turbulências hidráulicas, passagem de pás, desequilíbrio residual...).

COMPETE AO ANALISTA DISTINGUIR A VIBRAÇÃO BOA DA MÁ. É A VIBRAÇÃO QUE RESULTARÁ EM AVARIA QUE NECESSITA SER IDENTIFICADA E CORRIGIDA.

Escola Náutica I.D.Henrique

4

Introdução

Vibrações

Estudo das Vibrações...Porquê!!??

BOAS RAZÕES:

- Terramotos e Vento
- Música
- Acústica
- Análise Modal
- Testes de vibração (análise modal, resistência de equipamentos, testes de recepção)
- Choques
- Isolamento (cancelamento activo e passivo)
- Controlo de Condição (Manutenção Industrial)

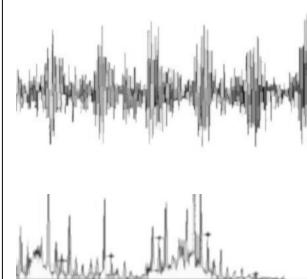
Escola Náutica I.D.Henrique

5

Introdução

Medição e Análise de Vibrações

É a técnica com MAIOR APLICAÇÃO



Escola Náutica I.D.Henrique

6

Introdução

Medição e Análise de Vibrações

Vantagens:

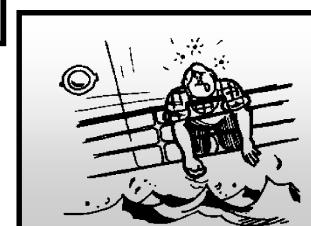
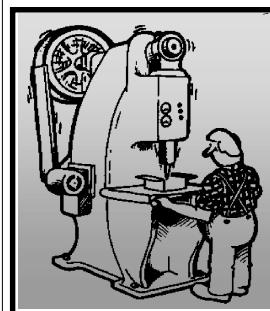
- Detecta a maior parte das avarias.
- Detecta as avarias na sua fase incipiente (ideal para aplicação do método da análise de tendência).
- Detecta as avarias sem ser necessário parar a máquina.
- Permite diagnosticar a causa da avaria.

Escola Náutica I.D.Henrique

7

Introdução

Tipos de Vibrações



Escola Náutica I.D.Henrique

8

Introdução

Tipos de Vibrações

Vibração aleatória

Vibração transiente

Vibração periódica

Escola Náutica I.D.Henrique

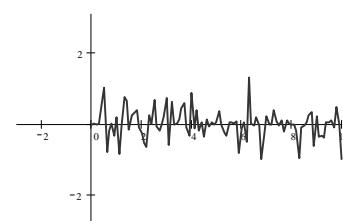
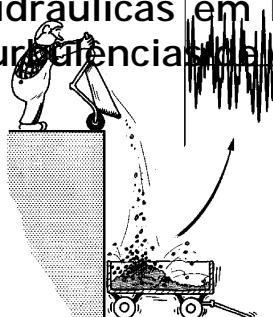
9

Introdução

Tipos de Vibrações

Vibração aleatória

Nas máquinas rotativas, são normalmente de origem hidráulica ou aerodinâmica. São exemplos a cavitação e certas instabilidades hidráulicas em bombas centrífugas, bem como turbulências de arrojamento em ventiladores.



Escola Náutica I.D.Henrique

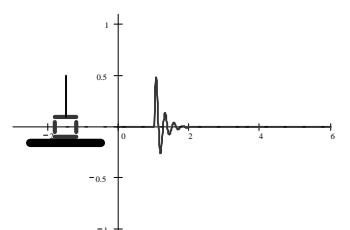
10

Introdução

Tipos de Vibrações

Vibração transiente

Nas máquinas ocorrem normalmente nos arranques e paragens, ou quando muda a condição de funcionamento. Têm interesse para a identificação de frequências de ressonância, velocidades críticas e choques em rolamentos e engrenagens.



Escola Náutica I.D.Henrique

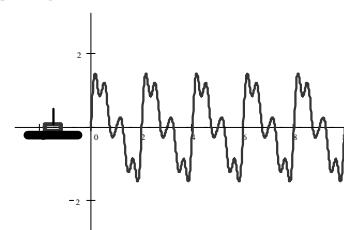
11

Introdução

Tipos de Vibrações

Vibração periódica

São as mais importantes quando se trata de caracterizar a condição das máquinas. A cada ciclo de rotação dá-se uma repetição da ocorrência dos fenómenos na máquina, a maior parte das quais se manifestam na forma de vibrações periódicas.



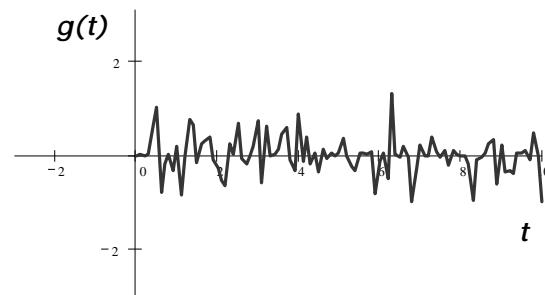
Escola Náutica I.D.Henrique

12

Quantificação da vibração

Quantificação da Vibração

COMO QUANTIFICAR A VIBRAÇÃO?



Escola Náutica I.D.Henrique

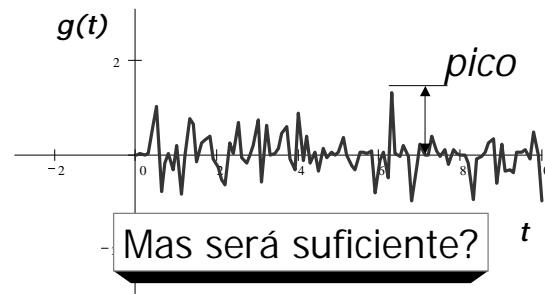
13

Quantificação da vibração

Quantificação da Vibração

COMO QUANTIFICAR A VIBRAÇÃO?

Uma forma será obviamente medir a maior amplitude de vibração ou PICO.



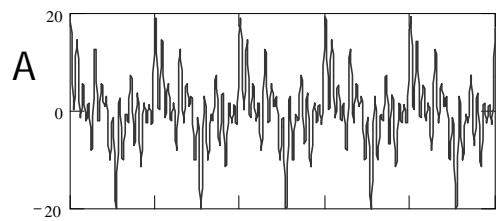
Escola Náutica I.D.Henrique

14

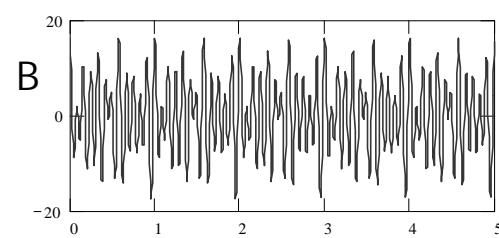
Quantificação da vibração

Pico

Vejamos estas duas vibrações.



Pico=19.3

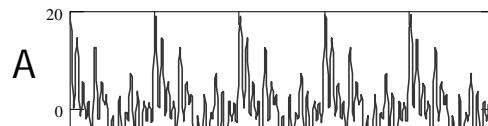


Pico=16.4

Quantificação da vibração

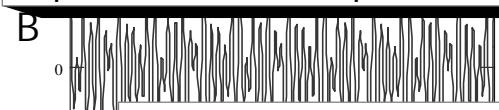
Pico

Vejamos estas duas vibrações.



Pico=19.3

De facto A apresenta um pico superior. Mas, também é verdade que B apresenta valores superiores a maior parte do tempo.



Pico=16.4

Então, como traduzir esta situação?

Quantificação da vibração

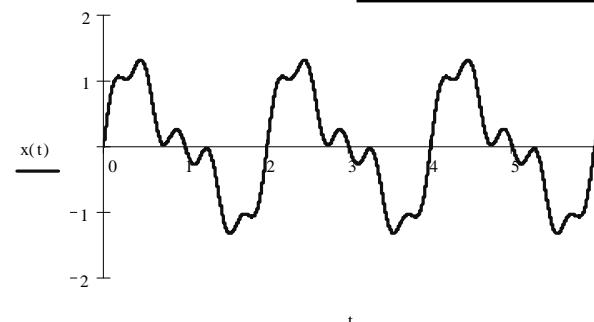
RMS

A solução está no ROOT MEAN SQUARE ou VALOR EFICAZ.

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

ou

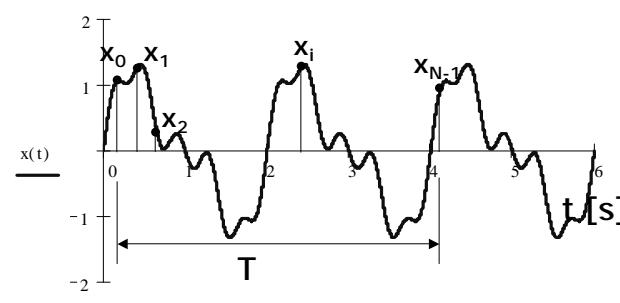
$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^{N-1} x_i^2}{N}}$$



Quantificação da vibração

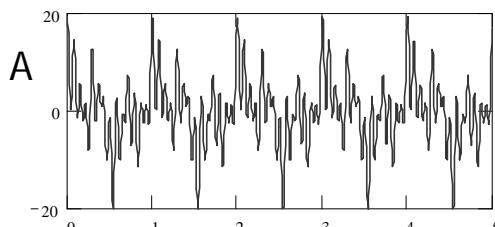
RMS

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^{N-1} x_i^2}{N}} = \sqrt{\frac{x_0^2 + x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_i^2 + \dots + x_{N-1}^2}{N}}$$



Quantificação da vibração

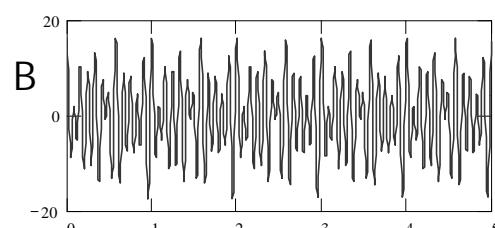
RMS

Voltando ao nosso exemplo.

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^{N-1} x_i^2}{N}}$$

RMS=6.9

Pico=19.3

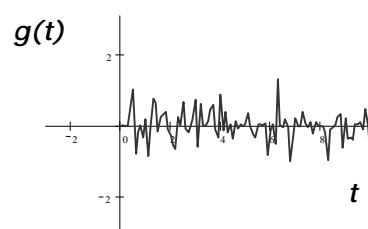


RMS=7.8

Pico=16.4

Quantificação da vibração

Unidades de medida da Vibração

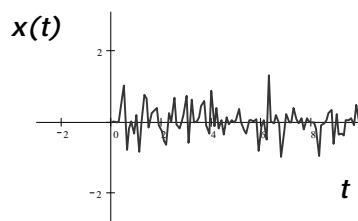
Em que unidades se medirá a vibração?

Quantificação da vibração

Unidades de medida da Vibração

Em que unidades se medirá a vibração?

O *deslocamento*, $x(t)$ [μm], será naturalmente a unidade mais óbvia pois é aquela que mais se aproxima da ideia de oscilação em torno de um ponto médio. Mais vibração pode significar, como é do senso comum, maiores amplitudes de deslocamento.

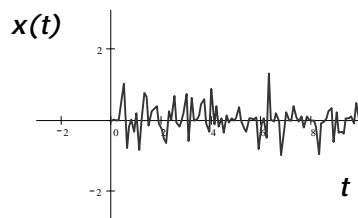


Quantificação da vibração

Unidades de medida da Vibração

Em que unidades se medirá a vibração?

Mas se a amplitude se mantiver e a frequência aumentar também costumamos considerar que há mais vibração. Então como descrever esta situação?

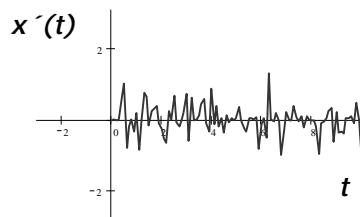


Quantificação da vibração

Unidades de medida da Vibração

Em que unidades se medirá a vibração?

Basta derivar uma vez a função *deslocamento* e, como sabemos, obtém-se a *velocidade* $x'(t)$ [mm/s]. A *velocidade* já contém informação sobre a frequência.

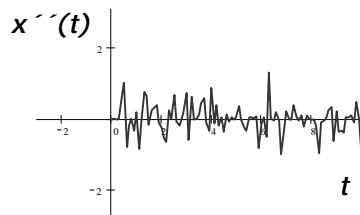


Quantificação da vibração

Unidades de medida da Vibração

Em que unidades se medirá a vibração?

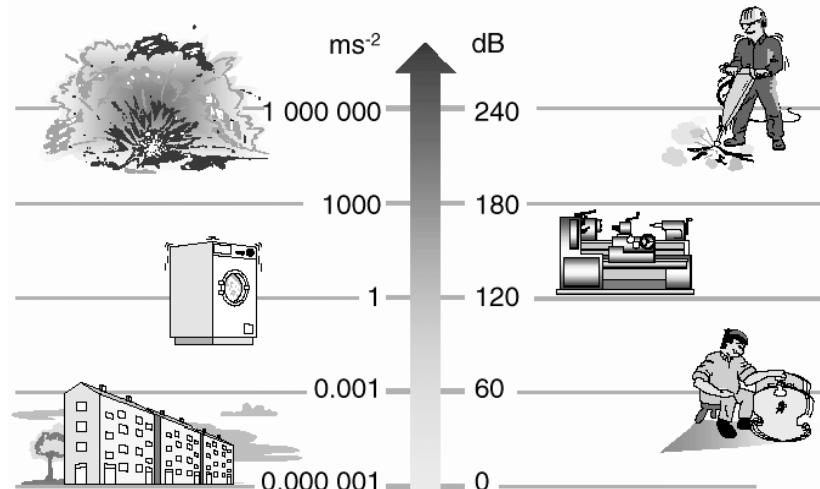
Se medimos velocidade também podemos medir a *aceleração* $x''(t)$ [m/s^2] ou [g] ($=9.8\text{m/s}^2$). Esta obtém-se derivando uma vez a *velocidade* e duas vezes o *deslocamento*.



Quantificação da vibração

Unidades de medida da Vibração

Valores reais



Vibração periódica

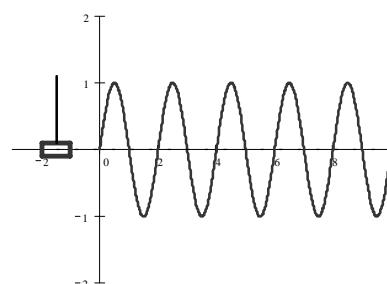
Vibração periódica

A forma mais simples de vibração periódica é a **VIBRAÇÃO HARMÓNICA**.

Este movimento pode ser visualizado na oscilação de uma massa suspensa numa mola cujo amortecimento seja praticamente nulo.

Vibração periódica

Harmónica



Escola Náutica I.D.Henrique

27

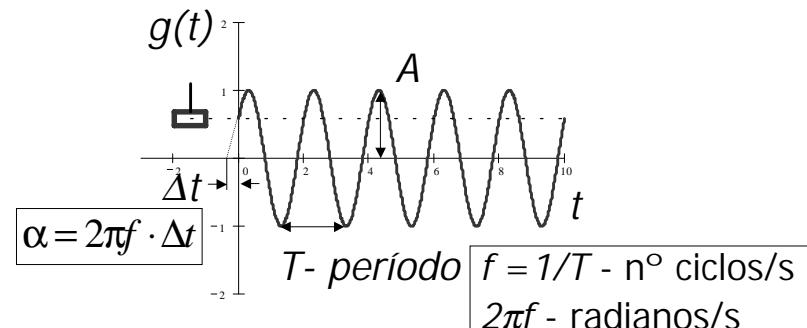
Vibração periódica

Harmónica

Caracterização

Matematicamente, uma função harmónica é uma função sinusoidal e escreve-se:

$$g(t) = A \cdot \sin(2\pi f \cdot t + \alpha)$$



Escola Náutica I.D.Henrique

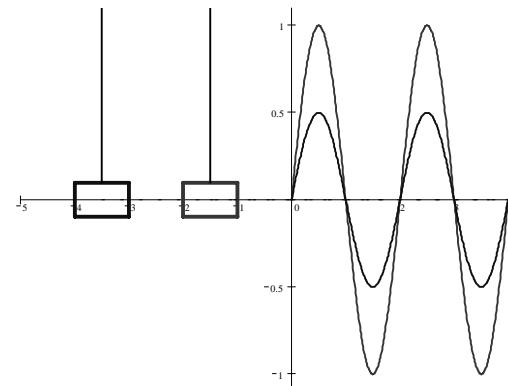
28

Vibração periódica

Harmónica

Caracterização

$$g(t) = A \cdot \sin(2\pi f \cdot t + \alpha)$$
AMPLITUDE DE PICO, A

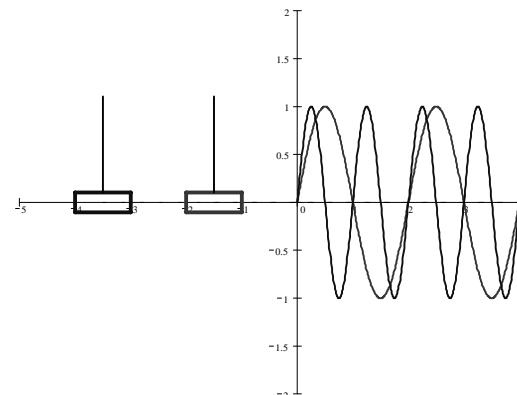


Vibração periódica

Harmónica

Caracterização

$$g(t) = A \cdot \sin(2\pi f \cdot t + \alpha)$$
FREQUÊNCIA, f

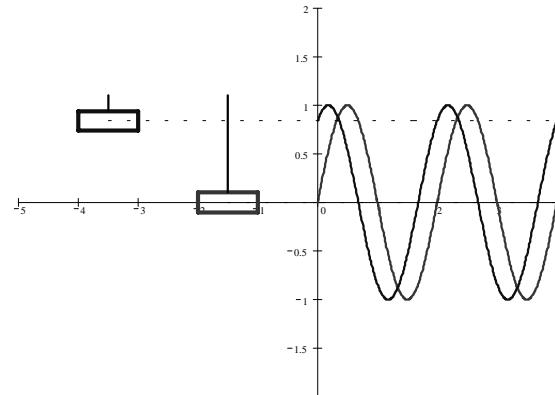


Vibração periódica

Harmónica

Caracterização

$$g(t) = A \cdot \text{sen}(2\pi f \cdot t + \alpha)$$

FASE, α 

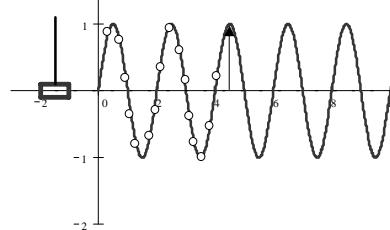
Vibração periódica

Harmónica

Quantificação

Tal como já vimos, quantifica-se a vibração medindo a sua amplitude máxima (**PICO**) e o seu valor eficaz (**RMS**):

$$g(t) = A \cdot \text{sen}(2\pi f \cdot t + \alpha)$$

 $Pico = A$  **$RMS = 0.707 \cdot Pico$**

Vibração periódica

Harmónica

Quantificação. Unidades

Já anteriormente vimos que $g(t)$

$$g(t) = A \cdot \sin(2\pi f \cdot t + \alpha)$$

pode ser medida em unidades de:

$$x(t) = X \cdot \sin(2\pi f \cdot t + \alpha)$$

deslocamento

$$x'(t) = X \cdot 2\pi f \cdot \sin(2\pi f \cdot t + \alpha + \pi/2)$$

velocidade

$$x''(t) = X (2\pi f)^2 \cdot \sin(2\pi f \cdot t + \alpha + \pi)$$

aceleração

Vibração periódica

Harmónica

Quantificação. Unidades

Reparando que a aceleração, $x''(t)$, também pode ser escrita como:

$$x''(t) = -X (2\pi f)^2 \cdot \sin(2\pi f \cdot t + \alpha)$$



$$x''(t) = X (2\pi f)^2 \cdot \sin(2\pi f \cdot t + \alpha + \pi)$$

aceleração

Vibração periódica

Harmónica

Quantificação. Unidades

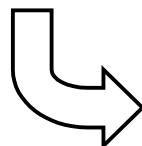
Conclui-se que:

$$x(t) = X \cdot \operatorname{sen}(2\pi f \cdot t + \alpha)$$

deslocamento

$$x''(t) = -X (2\pi f)^2 \cdot \operatorname{sen}(2\pi f \cdot t + \alpha)$$

aceleração



$$x'''(t) = -(2\pi f)^2 \cdot x(t)$$

Vibração periódica

Harmónica

Quantificação. Unidades

Para as amplitudes de pico podemos tirar as seguintes relações:

$$x'(t) = X \cdot 2\pi f \cdot \operatorname{sen}(2\pi f \cdot t + \alpha + \pi/2)$$

velocidade

$$X' = X \cdot 2\pi f$$

$$x''(t) = X (2\pi f)^2 \cdot \operatorname{sen}(2\pi f \cdot t + \alpha + \pi)$$

aceleração

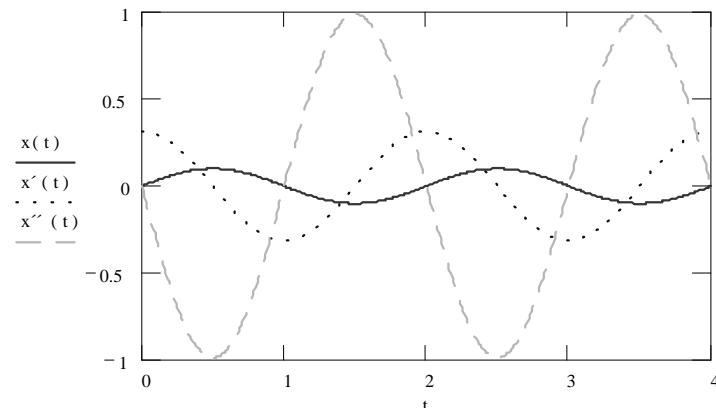
$$X'' = X \cdot (2\pi f)^2$$

Vibração periódica

Harmónica

Quantificação. Unidades

Graficamente, a relação entre as três unidades é:



Escola Náutica I.D.Henrique

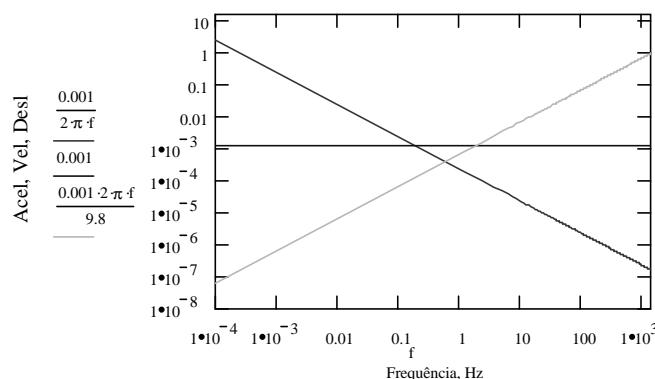
37

Vibração periódica

Harmónica

Quantificação. Unidades

Deslocamento e aceleração para uma velocidade constante de 0.001 mm/s:



Escola Náutica I.D.Henrique

38

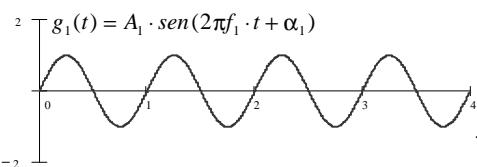
Vibração periódica

Não Harmónica

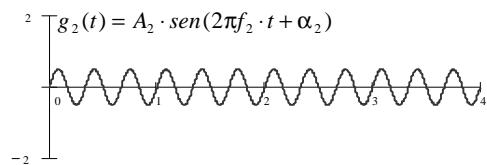
A soma de duas ou mais vibrações harmónicas de diferentes frequências produz uma vibração periódica não-harmónica.

Vibração periódica

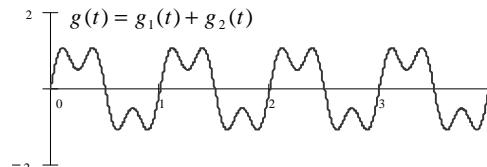
Não Harmónica



+



=

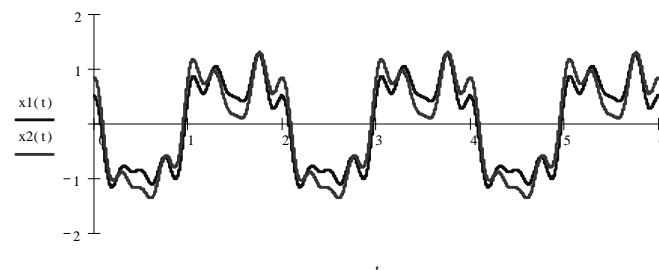


Vibração periódica

Não Harmónica

Caracterização

Já vimos que duas vibrações harmónicas se distinguem pela frequência, amplitude de pico e fase. Mas então como distinguir duas vibrações periódicas não-harmónicas?



Escola Náutica I.D.Henrique

41

Vibração periódica

Não Harmónica

Caracterização

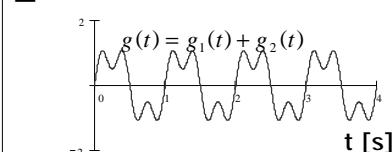
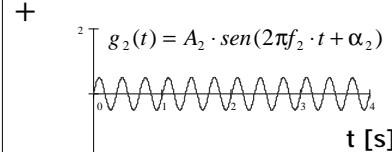
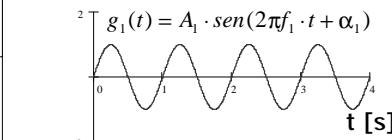
A RESPOSTA ESTÁ NA
ANÁLISE EM FREQUÊNCIA

Escola Náutica I.D.Henrique

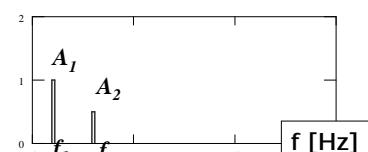
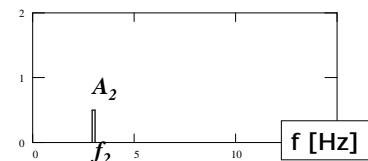
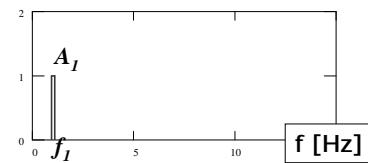
42

Vibração periódica

Análise em Frequência



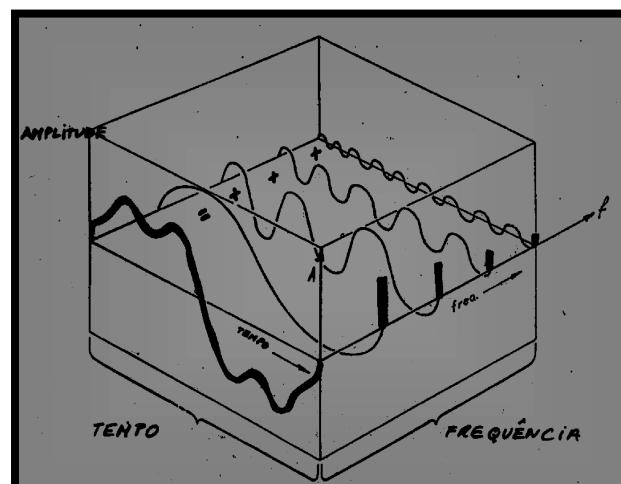
Escola Náutica I.D.Henrique



43

Vibração periódica

Análise em Frequência



Escola Náutica I.D.Henrique

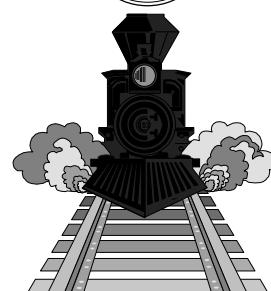
44

Vibração periódica

Análise em Frequência

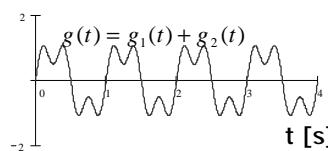
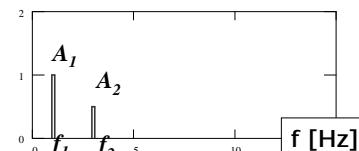
Tempo

2:00
2:40
3:20
4:00
4:40
5:20
6:00

Mesma informação**Frequência (Período)**
todos 0:40**Fase****1º comboio 2:00**

Vibração periódica

Análise em Frequência

**Sinal no TEMPO****Sinal em FREQUÊNCIA**

Vibração periódica

Análise em Frequência

Transformadas de Fourier

Segundo *Jacques Fourier* (1768-1830), qualquer função complexa, periódica ou não periódica, pode ser decomposta numa série de componentes harmónicas de diferentes frequências. Esta técnica baseia-se nas conhecidas *Transformadas de Fourier*:

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

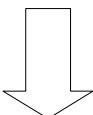
$$g(t) = \int_{-\infty}^{\infty} G(f) e^{j2\pi ft} df$$

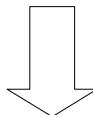
Vibração periódica

Análise em Frequência

Transformadas de Fourier

As *Transformadas de Fourier* assumem no processamento de sinal digital a seguinte forma:

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


$$g(t) = \int_{-\infty}^{\infty} G(f) e^{j2\pi ft} df$$


$$G_k = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} g_i e^{-j\frac{2\pi ik}{N}}$$

$$g_i = \sum_{k=0}^{N-1} G_k e^{j\frac{2\pi ik}{N}}$$

Vibração periódica

Análise em Frequência

Transformadas Discretas de Fourier

... sendo conhecidas como *Transformadas Discretas de Fourier*, ou DFT(*discrete fourier transforms*).

DFT Directa
tempo → frequência

DFT Inversa
frequência → tempo

$$G_k = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} g_i e^{-j \frac{2\pi i k}{N}}$$

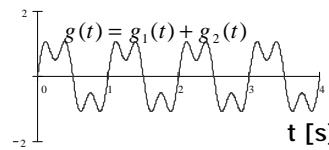
$$g_i = \sum_{k=0}^{N-1} G_k e^{j \frac{2\pi i k}{N}}$$

Vibração periódica

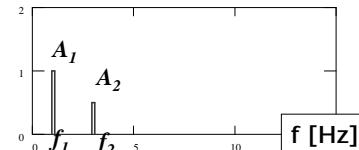
Análise em Frequência

Transformadas Discretas de Fourier

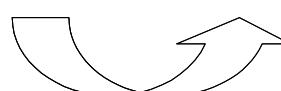
É a *DFT* que permite o cálculo do *espectro de frequência* a partir do sinal no tempo:



Sinal no TEMPO



Espectro de Frequência

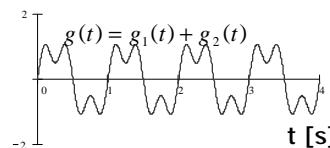


Vibração periódica

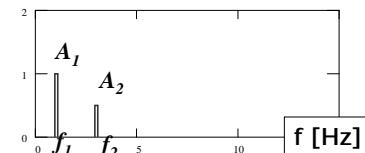
Análise em Frequência

Transformadas Discretas de Fourier

... ou a reconstituição do *sinal no tempo* a partir do espectro:



Sinal no TEMPO



Espectro de Frequência



Escola Náutica I.D.Henrique

52

Vibração periódica

Análise em Frequência

Fast Fourier Transform

... ou FFT, é o nome que se dá à Transformada Discreta de Fourier quando é calculada segundo um algoritmo engenhoso, desenvolvido nos anos 60, e que hoje é implementado em todos os analisadores de vibrações.

Escola Náutica I.D.Henrique

53

Ressonância e frequências naturais

Frequência natural

Todos os objectos físicos, quando afastados da sua posição de equilíbrio estático, têm tendência para vibrar a determinadas frequências.

Especialmente nos metais, essas frequências são bem evidentes no tom característico que emitem (diapasão, sino, ...).

Estes tons únicos dependem da rigidez do material, da sua forma e da sua massa. Estes tons são as chamadas Frequências Naturais.

Escola Náutica I.D.Henrique

54

Ressonância e frequências naturais

Frequência natural

Se dermos um impacto num objecto verificamos que os tons se mantém à mesma frequência mas as suas amplitudes vão-se reduzindo até deixarem de soar.

Mas, se forçarmos o mesmo objecto a vibrar àquelas frequências naturais, à custa de qualquer força externa, então as amplitudes de vibração aumentarão para valores muito elevados

Este fenómeno é chamado de

Ressonância.

Escola Náutica I.D.Henrique

55

Ressonância e frequências naturais

Frequência natural

Tacoma Bridge – USA 1940



Este fenómeno é chamado de
Ressonância.

Escola Náutica I.D.Henrique

56

Ressonância e frequências naturais

Frequência natural

Normalmente as primeiras 3 ou 4 frequências naturais são as mais preocupantes uma vez que necessitam de menor energia para serem forçadas.

A primeira frequência natural é muitas vezes próxima do valor dado pela fórmula:

$$\omega_n = 2\pi f = \sqrt{\frac{k}{m}} \text{ [rad/s]}$$

Escola Náutica I.D.Henrique

57

Ressonância e frequências naturais

Frequência natural

Normalmente as primeiras 3 ou 4 frequências naturais são as mais preocupantes uma vez que necessitam de menor energia para serem forçadas.

A primeira frequência natural é próxima do valor dado pela

$$\omega_n = 2\pi f = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

Rigidez
k [N/m]Massa
m [kg]

Ressonância e frequências naturais

Frequência natural

Por esta fórmula podemos ver que se aumentarmos a rigidez do objecto ou dos seus apoios, aumentamos a frequência natural. Se aumentarmos a sua massa diminuimos a frequência natural.

$$\omega_n = 2\pi f = \sqrt{\frac{k}{m}} \text{ [rad/s]}$$

Ressonância e frequências naturais

Frequência natural

Estas conclusões aplicam-se também aos componentes das máquinas, às estruturas, aos edifícios, etc...

Quando um jarro está rachado soa a chocho (som mais grave <> frequências naturais inferiores), isto porque a rigidez diminuiu.

$$\omega_n = 2\pi f = \sqrt{\frac{k}{m}} \text{ [rad/s]}$$

Ressonância e frequências naturais

Frequência natural

Se uma conduta vibra demais é provável que esteja em ressonância. Para alterar esta situação basta alterar-lhe as suas frequências naturais.

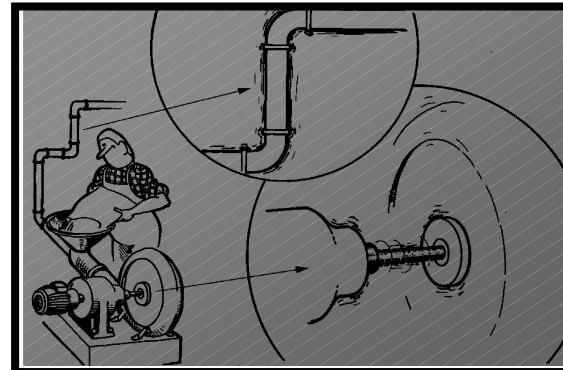
Se soldarmos massas diminuímos as freq.naturais, se aumentarmos os pontos de fixação aumentamos a rigidez e também as freq.naturais.

$$\omega_n = 2\pi f = \sqrt{\frac{k}{m}} \text{ [rad/s]}$$

Vibrações versus Condição

Vibrações das Máquinas

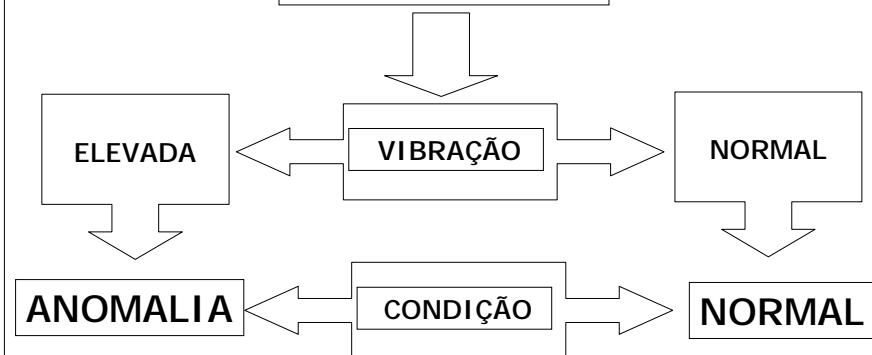
A vibração das máquinas é normalmente periódica porque o seu funcionamento é cíclico .



Vibrações versus Condição

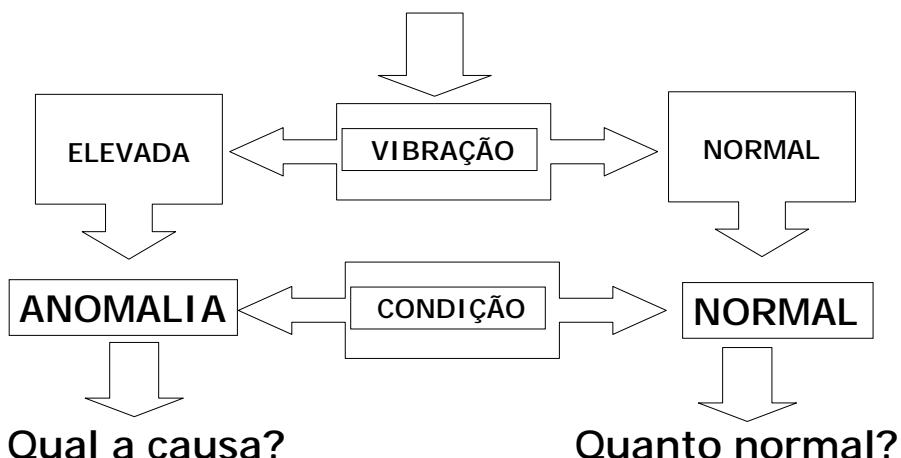
Vibrações das Máquinas

Forças cíclicas geradas no funcionamento das máquinas



Vibrações versus Condição

Vibrações das Máquinas



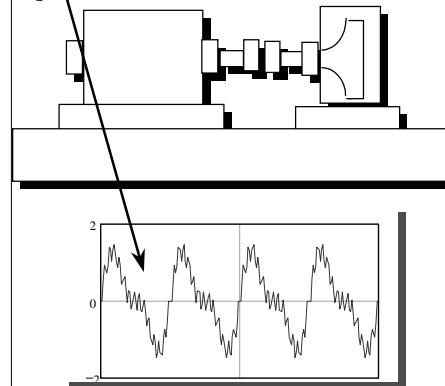
Escola Náutica I.D.Henrique

64

Vibrações versus Condição

Vibrações das Máquinas

A vibração das máquinas é um sinal periódico e normalmente complexo

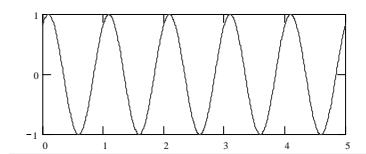


Escola Náutica I.D.Henrique

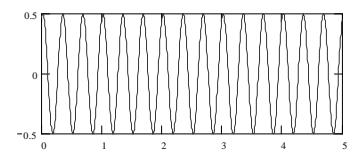
65

Vibrações versus Condição

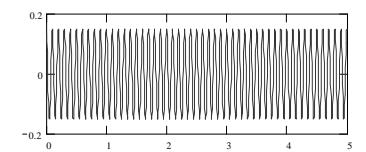
Vibrações das Máquinas

desequilíbrio**desalinhamento**

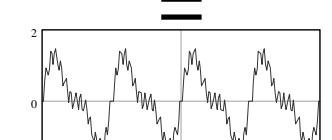
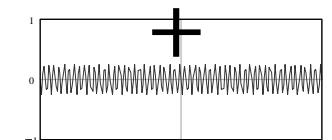
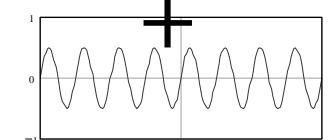
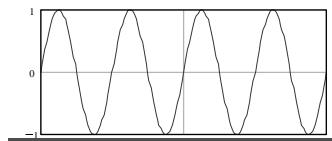
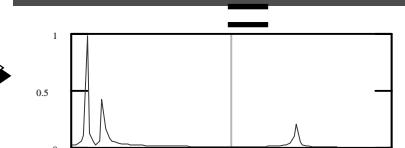
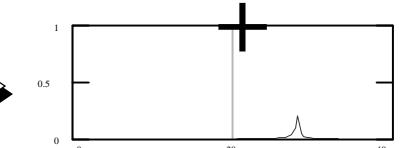
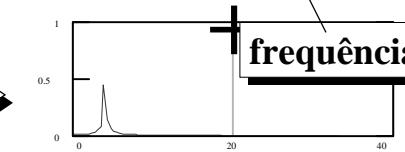
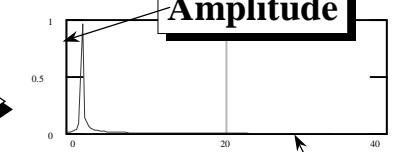
+

**rolamentos**

+

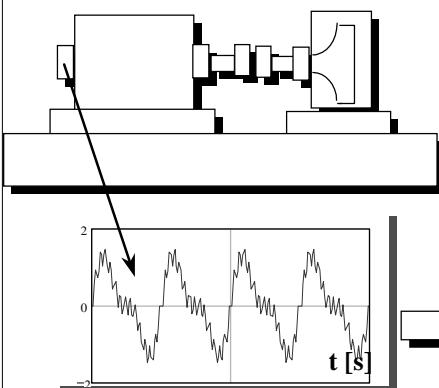
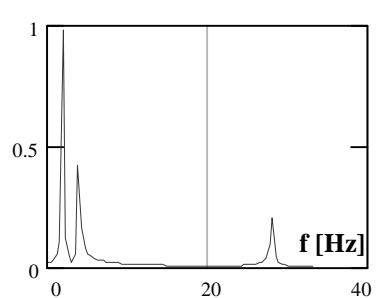


Vibrações versus Condição

Amplitude**frequência**

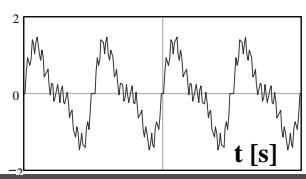
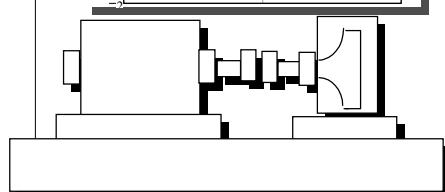
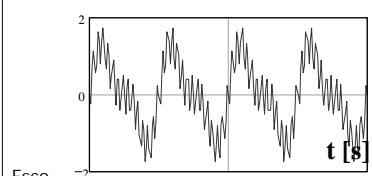
Vibrações versus Condição

Vibrações das Máquinas

sinal no tempo...**...ou em frequência**

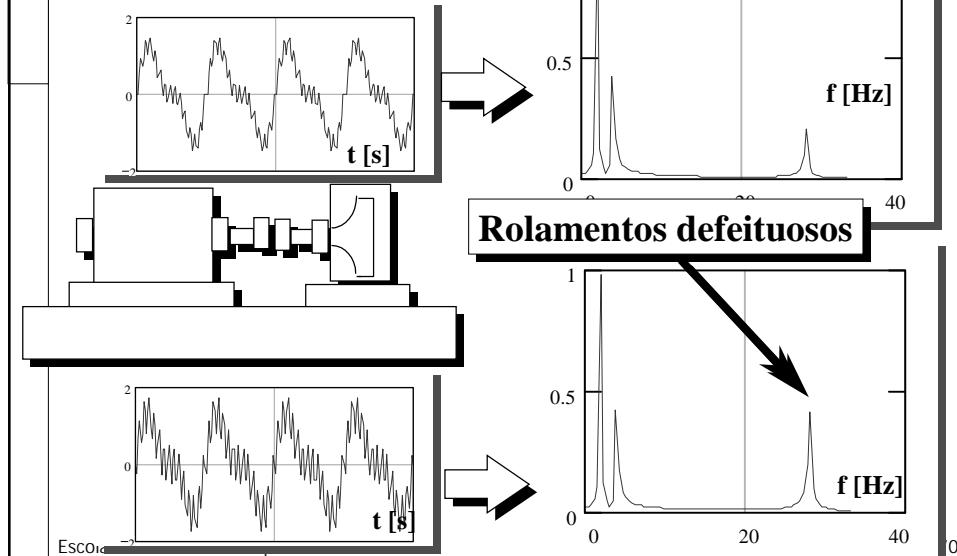
Vibrações versus Condição

Vibrações das Máquinas

**Estes dois sinais são iguais?****O que terá acontecido?**

Vibrações versus Condição

Vibrações das Máq



Vibrações versus Condição

Vibrações das Máquinas

Representação da vibração em frequência

A importância desta representação ressalta do facto da maioria das avarias em sistemas mecânicos se fazerem sentir a frequências relacionadas com a velocidade do veio, ou outro componente, bem como com a especificidade da própria máquina ou componente.

Vibrações versus Condição

Vibrações das Máquinas

A frequência relaciona-nos
a vibração com o defeito
ou componente

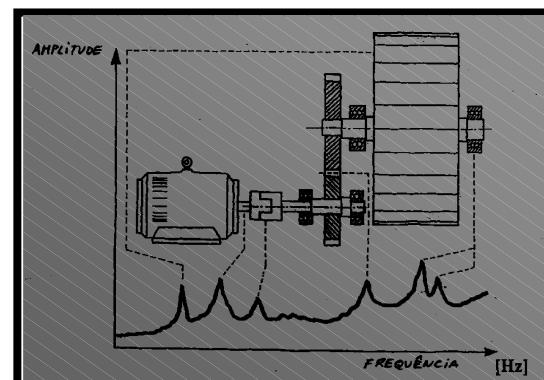
A amplitude relaciona-nos
a vibração com a
gravidade do defeito

A fase permite-nos distinguir
avarias que se fazem sentir à
mesma frequência

Vibrações versus Condição

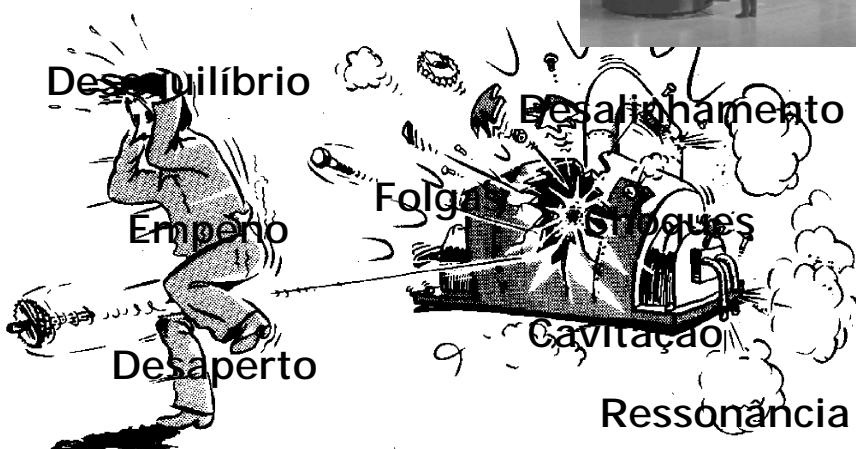
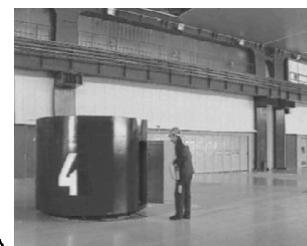
Vibrações das Máquinas

As frequências permitem-nos identificar a origem da avaria ou o componente com defeito.



Vibrações versus Condição

Avarias típicas



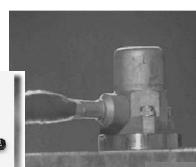
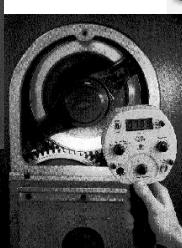
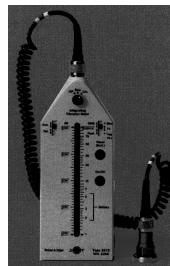
Escola Náutica I.D.Henrique

74

Vibrações versus Condição

Instrumentação

Instrumentação

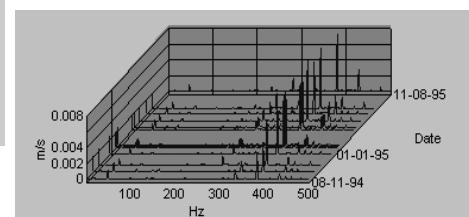
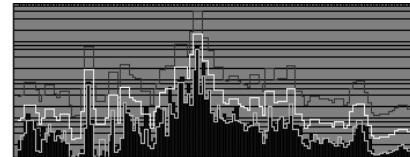
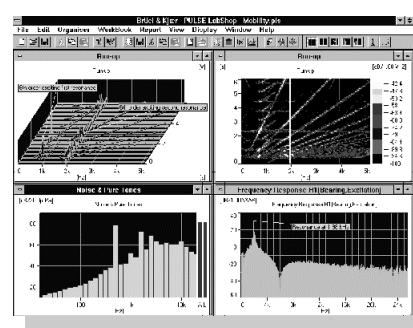


Escola Náutica I.D.Henrique

75

Vibrações versus Condição Técnicas de análise

Técnicas de análise



Escola Náutica I.D.Henrique

76

Diagnóstico de avarias

Diagnóstico de avarias



Escola Náutica I.D.Henrique

77

Diagnóstico de avarias

Objectivo do Diagnóstico de Avarias

Identificar a origem da avaria

para:

- evitar a falha catastrófica
- permitir decidir da necessidade da paragem
- permitir o planeamento da intervenção
- decidir o momento adequado da reparação
- optimizar o tempo de operacionalidade

Diagnóstico de avarias

Procedimento

- Listar as avarias possíveis
- Com os meios disponíveis tentar eliminar hipóteses (começar na mais fácil e caminhar para a mais difícil)
- No fim, ficar só com uma possibilidade

Diagnóstico de avarias

Procedimento

- Listar as avarias possíveis
- Com os meios ~~disponíveis~~ tentar eliminar hipóteses (começar na mais fácil e caminhar para a mais difícil)
- No fim, ficar só com uma possibilidade



Trabalho de diagnóstico = Trabalho de detective

Escola Náutica I.D.Henrique

80

Diagnóstico de avarias

Procedimento. Análise de vibrações

- Inspeccionar cuidadosamente a máquina
- Procurar desapertos, desagregações de material, fugas de lubrificante,...
- Apalpar chumaceiras para sentir temperatura e vibração
- Ouvir (ouvido, sonómetro ou chave de fendas)
- Verificar cuidadosamente os parâmetros processuais

Escola Náutica I.D.Henrique

81

Diagnóstico de avarias

Procedimento. Análise de vibrações

- Determinar onde a vibração é mais forte
- Medir
- Verificar concordância com observação
- Verificar repetibilidade da medição

Escola Náutica I.D.Henrique

82

Diagnóstico de avarias

Meios de Diagnóstico

- Os nossos sentidos (olfacto, tacto, audição,...)
- As técnicas de medição e análise de vibrações
- Outras técnicas (Parâmetros processuais, Endoscopia, Termografia, ...)
- Registo histórico
- Normas
- Análise de tendência
- **BOM SENSO & EXPERIÊNCIA**

Escola Náutica I.D.Henrique

83

Diagnóstico de avarias

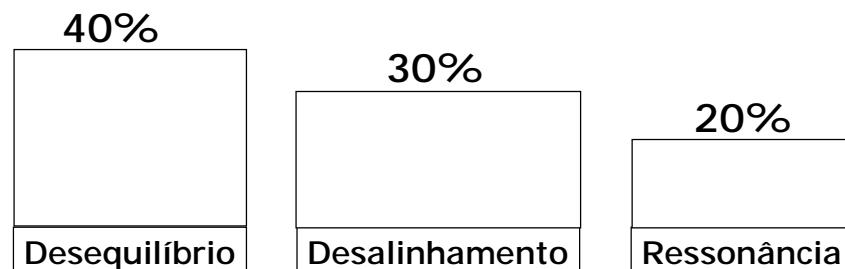
Sintomatologia

Avarias mais frequentes

- Desequilíbrio
- Desalinhamento
- Desaperto
- Empeno
- Ressonância
- Engrenagens
- Rolamentos
- Motores eléctricos

Diagnóstico de avarias

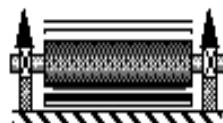
Avarias mais comuns



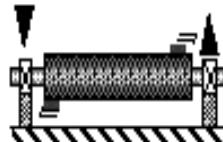
Constituem 90% de todos os problemas de vibrações

Desequilíbrio

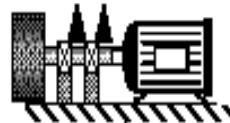
Desequilíbrio



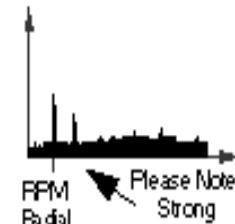
Static Unbalance



Dynamic Unbalance



Overhung Rotor Unbalance



Desequilíbrio

Desequilíbrio

O desequilíbrio é uma das causas de avaria mais comuns em máquinas rotativas.

É o fenómeno que resulta de uma distribuição assimétrica de massa e que se traduz em vibração excessiva do rotor.

É tanto mais importante quanto mais rotativa for a máquina ou mais exigente o nível de fiabilidade exigido.

Desequilíbrio

Desequilíbrio

A vibração é produzida pela força centrífuga que resulta da interacção da componente de massa desequilibrada com a aceleração radial devido à rotação.

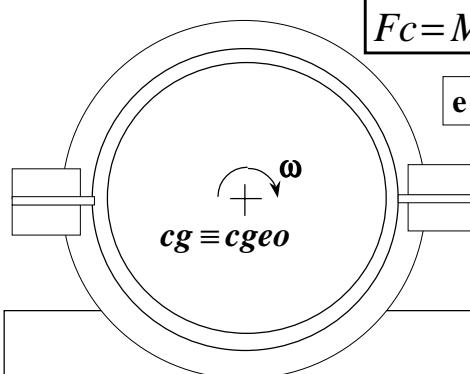
Desequilíbrio

Desequilíbrio

No caso de um rotor, de massa M , com uma distribuição de massas perfeita, o *centro de gravidade*, cg , coincide com o *centro geométrico*, $cgeo$, e portanto a *força centrífuga*, Fc , será nula.

$$Fc = M\omega^2 = M0\omega^2 = 0$$

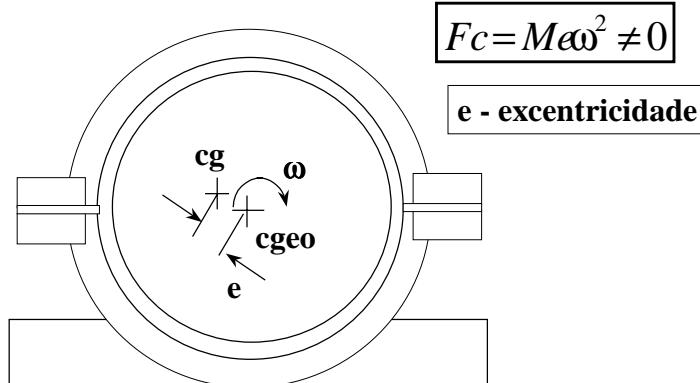
e - excentricidade



Desequilíbrio

Desequilíbrio

Mas se o centro de gravidade não coincidir com o centro de geométrico teremos uma força centrífuga proporcional à excentricidade e ao quadrado da rotação.



Escola Náutica I.D.Henrique

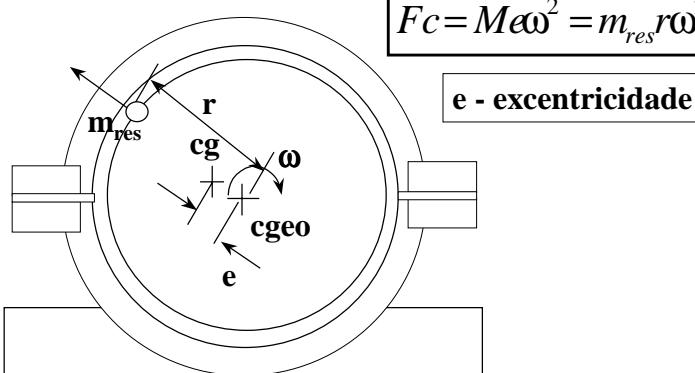
90

Desequilíbrio

Desequilíbrio

Como a excentricidade do centro de gravidade é devida à distribuição assimétrica de massas, a força centrífuga também pode ser expressa em função da *massa de desequilíbrio residual*, m_{res} , e da sua *distância ao centro de geométrico*.

$$F_c = M e \omega^2 = m_{res} r \omega^2$$



Escola Náutica I.D.Henrique

91

Desequilíbrio

Causas de desequilíbrio residual

- Processo de fabrico (fundição)
- Heterogeneidades de material
- Chavetas
- Montagem incorrecta
- Equilibragem incorrecta (não consideração das chavetas, do modo de vibração, das tolerâncias de montagem e da temperatura normal de serviço)

Escola Náutica I.D.Henrique

92

Desequilíbrio

Causas de desequilíbrio residual

- Processo de fabrico (fundição)
- Heterogeneidades de material
- Chavetas **ISO 1940**
- Montagem incorrecta
- Equilibragem incorrecta (não consideração das chavetas, do modo de vibração, das tolerâncias de montagem e da temperatura normal de serviço)

ISO 8821

Escola Náutica I.D.Henrique

93

Desequilíbrio

Causas de desequilíbrio

- Agregação ou disagregação de material
- Corrosão
- Erosão
- Desgaste
- Fractura
- Desaperto mecânico
- Tensões térmicas
- ...

Escola Náutica I.D.Henrique

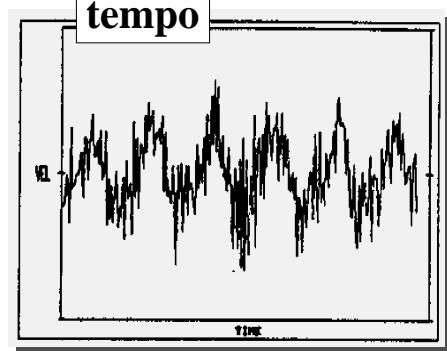
94

Desequilíbrio

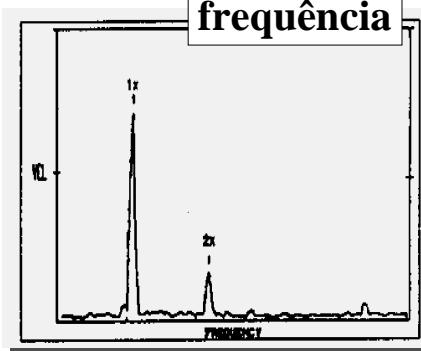
Sintomatologia

Amplitude

tempo



frequência



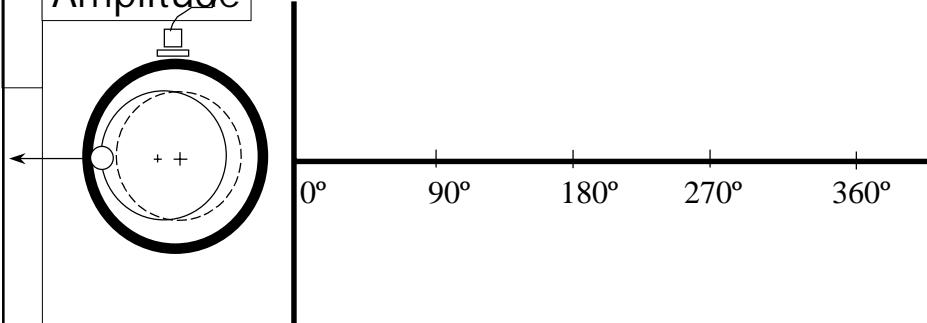
Escola Náutica I.D.Henrique

95

Desequilíbrio

Sintomatologia

Amplitude



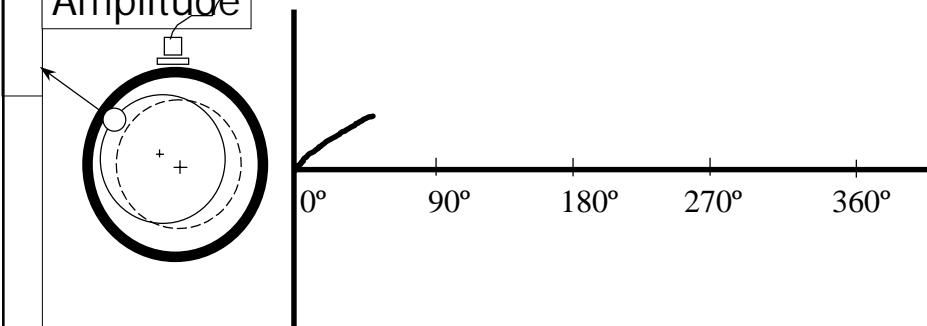
Escola Náutica I.D.Henrique

96

Desequilíbrio

Sintomatologia

Amplitude



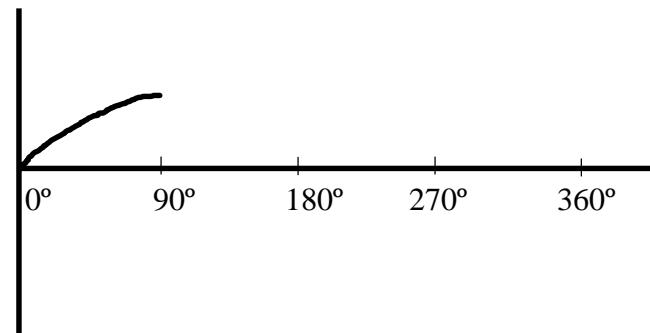
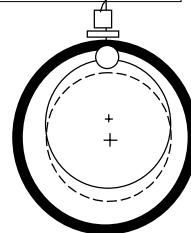
Escola Náutica I.D.Henrique

97

Desequilíbrio

Sintomatologia

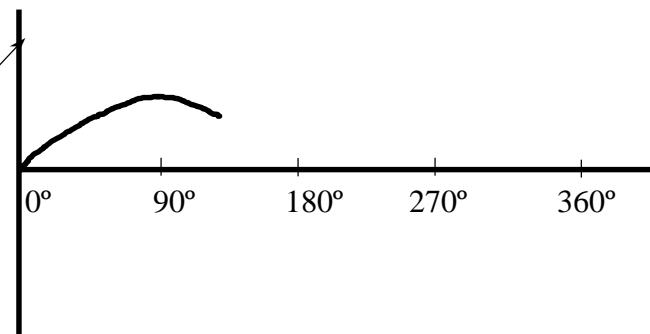
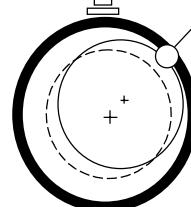
Amplitude



Desequilíbrio

Sintomatologia

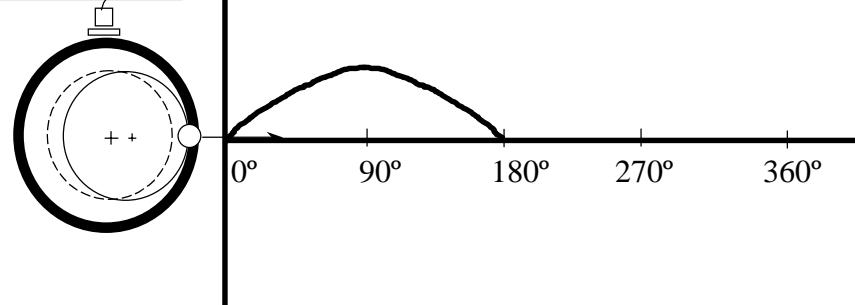
Amplitude



Desequilíbrio

Sintomatologia

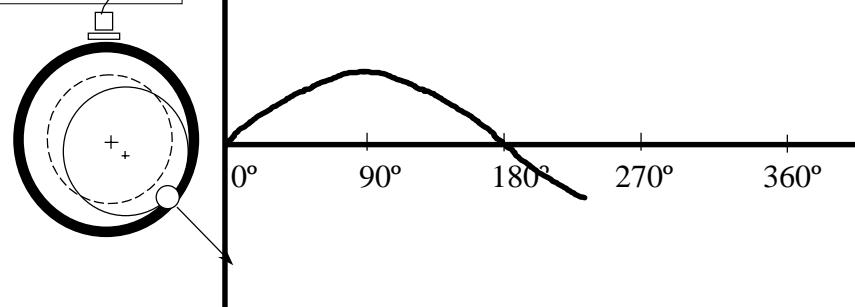
Amplitude



Desequilíbrio

Sintomatologia

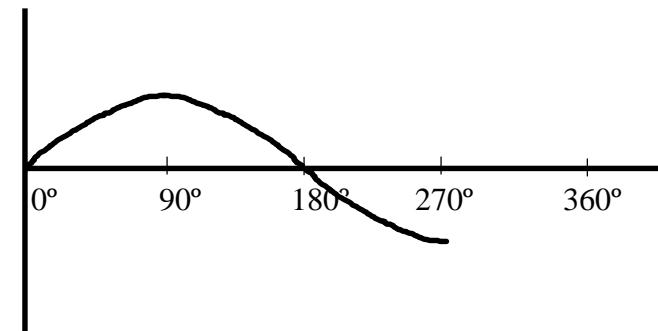
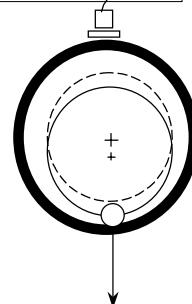
Amplitude



Desequilíbrio

Sintomatologia

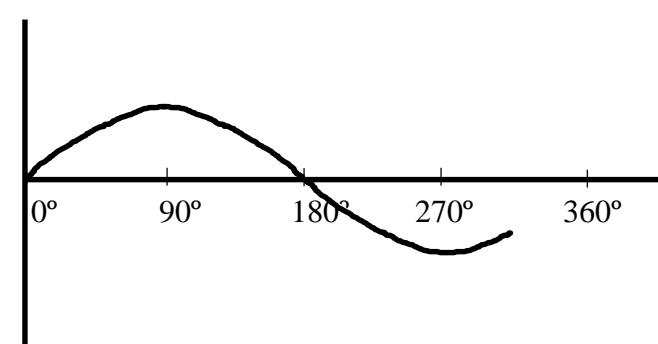
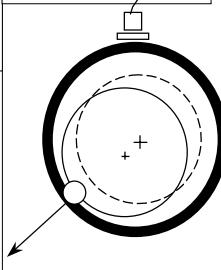
Amplitude



Desequilíbrio

Sintomatologia

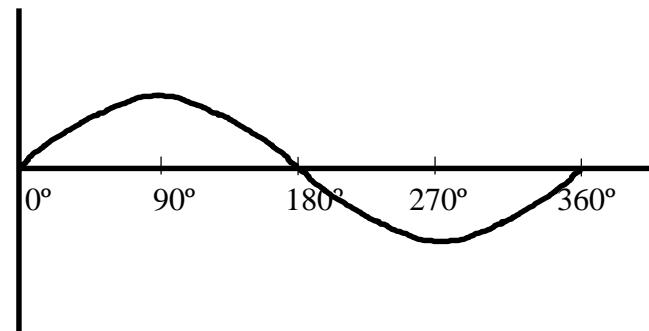
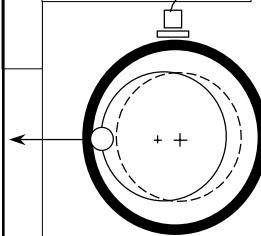
Amplitude



Desequilíbrio

Sintomatologia

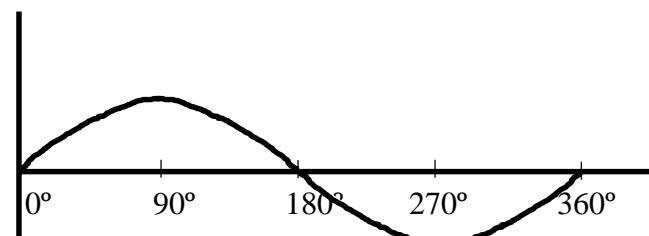
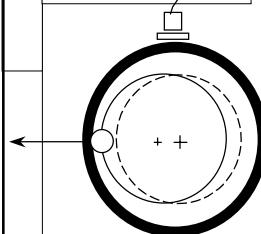
Amplitude



Desequilíbrio

Sintomatologia

Amplitude



O deslocamento do rotor da sua linha de centros origina uma vibração sinusoidal a $1 \times RPM$ (também conhecida por *whirl síncrono*).

Desequilíbrio

Sintomatologia

Amplitude

Assim, quando no espectro de frequência a componente 1xRPM apresentar consistentemente tendência crescente é provável o desenvolvimento de uma situação de desequilíbrio.

Desequilíbrio

Sintomatologia

Amplitude

- Sinal sinusoidal a 1xRPM
- A amplitude aumenta com o quadrado da velocidade:

Exemplo

$V=1.3 \text{ mm/s}$ e $\omega=3000 \text{ RPM}$

se $\omega=3100 \text{ RPM}$ deveremos medir

$$V=1.3 \times (3100/3000)^2 = 1.4 \text{ mm/s}$$

Desequilíbrio

Sintomatologia

Amplitude

- A amplitude é maior na direcção de menor rigidez das chumaceiras
- A amplitude é maior nas chumaceiras mais carregadas pelo desequilíbrio
- Componente axial muito inferior à radial (excepção feita quando o rotor se situa exteriormente aos apoios - suspenso)
- Não depende da temperatura
- A relva do espectro mantém o valor médio
- A amplitude é estável

Escola Náutica I.D.Henrique

108

Desequilíbrio

Sintomatologia

Fase

A fase desempenha um papel importante na detecção e análise do desequilíbrio.

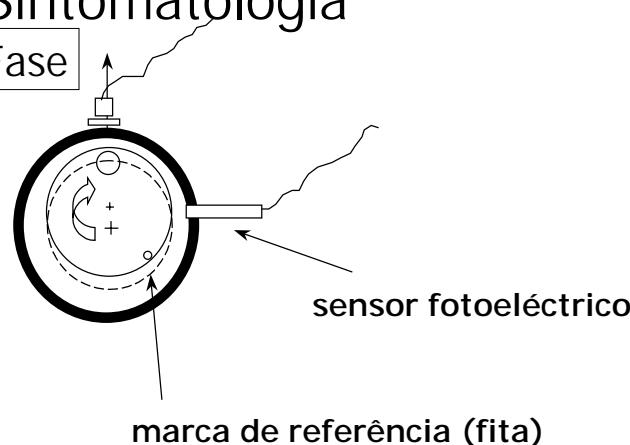
Escola Náutica I.D.Henrique

109

Desequilíbrio

Sintomatologia

Fase



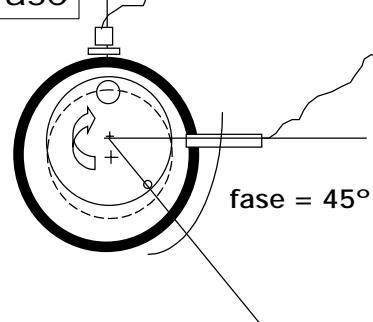
Escola Náutica I.D.Henrique

110

Desequilíbrio

Sintomatologia

Fase



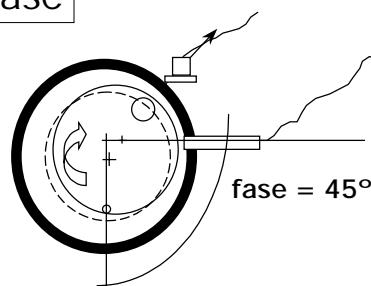
Escola Náutica I.D.Henrique

111

Desequilíbrio

Sintomatologia

Fase



$$\text{fase} = 45^\circ + \text{deslocamento do acelerómetro}$$

A fase acompanha a localização do transdutor, enquanto que a amplitude não se altera substancialmente (excepção feita ao caso de chumaceiras com grande diferença de rigidez entre direcções radiais).

Desequilíbrio

Sintomatologia

Fase

- A fase é estável (excepção para velocidades perto das críticas)
- Para chumaceiras com mobilidade semelhante em ambas as direcções radiais é vulgar que a diferença de fase entre medições verticais seja igual à entre horizontais

Desequilíbrio

Sintomatologia

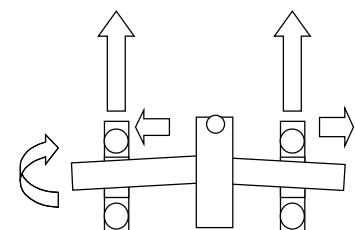
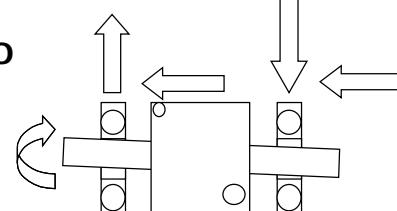
Harmónicas

- Harmónicas nxRPM com amplitudes pequenas (podem ser grandes no caso de desequilíbrio grave ou quando a rigidez dos apoios difere substancialmente com a direcção)

Desequilíbrio

Sintomatologia

Rotor apoiado

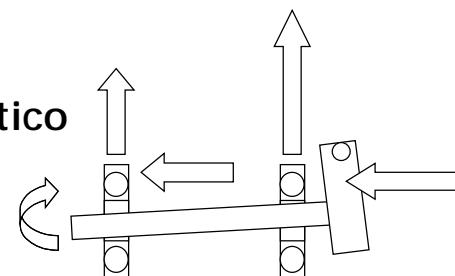
Desequilíbrio estático**Desequilíbrio dinâmico**

Desequilíbrio

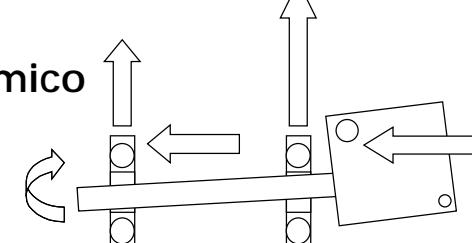
Sintomatologia

Rotor suspenso

Desequilíbrio estático



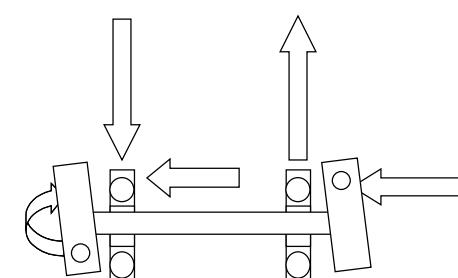
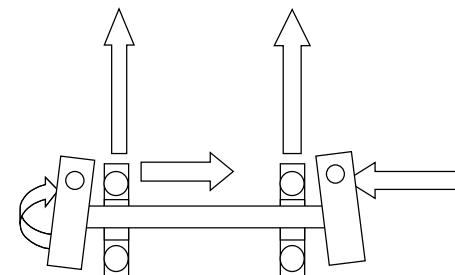
Desequilíbrio dinâmico



Desequilíbrio

Sintomatologia

Rotor suspenso



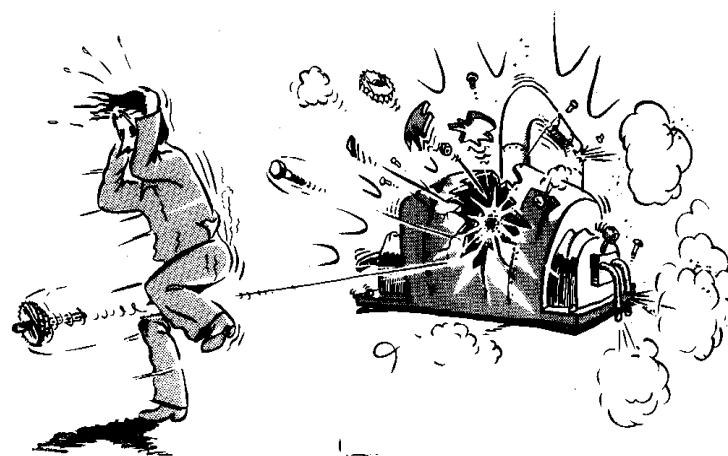
Desequilíbrio

Técnicas aconselhadas

- **Detecção:** NG e EF PBC com médias de espectros
- **Diagnóstico:** EF FFT com médias de espectros, medição de fase e sinal no tempo
- Medir em todas as chumaceiras nas direcções radiais
- Para equilibrar medir na direcção horizontal (elimina o efeito da força da gravidade)
- Confirmar suspeitas com inspecção visual. Procurar vestígios de erosão, agregação ou desagregação de material. Efectuar prova de funcionamento com registo das curvas de desempenho (ex: bombas centrífugas)

Ressonância

Ressonância



Ressonância

Descrição

As *frequências de ressonância* de uma máquina são as frequências às quais ela vibra com máxima amplitude em resposta a uma força de excitação.

Algumas das frequências de ressonância estão relacionadas com a velocidade de rotação do veio e por isso são identificadas como *velocidades críticas*.

As velocidades críticas são influenciadas pela massa e rigidez do rotor e chumaceiras mas também pelo líquido circulante. As condições de funcionamento alteram o valor da sua ocorrência.

Escola Náutica I.D.Henrique

120

Ressonância

Descrição

As *velocidades críticas* variam com o regime de funcionamento e com o desgaste do sistema rotor e respectivo suporte.

Outras ressonâncias estão relacionadas com os componentes fixos da máquina, como a sua caixa, suporte, sistema de encanamentos, chumaceiras e fundação (*ressonâncias estruturais*).

As frequências de ressonância são reguladas pelas frequências naturais, amortecimento e forças de excitação. O amortecimento regula a amplitude, evitando que a resposta do sistema amplie indefinidamente até ao colapso.

Escola Náutica I.D.Henrique

121

Ressonância

Causas da ressonância

- Excitação pelo desequilíbrio residual do veio
- Excitação por choques
- Desapertos
- Deficiente montagem

Escola Náutica I.D.Henrique

122

Ressonância

Consequências da ressonância

- Amplitudes de vibração anormalmente elevadas
- Vibração extremamente direccional
- Variações de fase acentuadas
- Modo de vibração facilmente reconhecível
- Ocorrência sistemática de fendas nos mesmos sítios

Escola Náutica I.D.Henrique

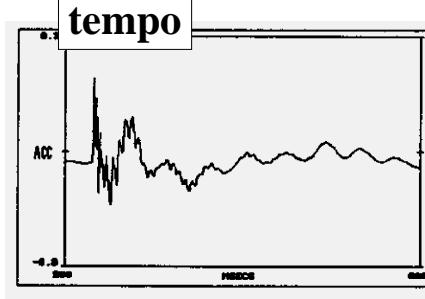
123

Ressonância

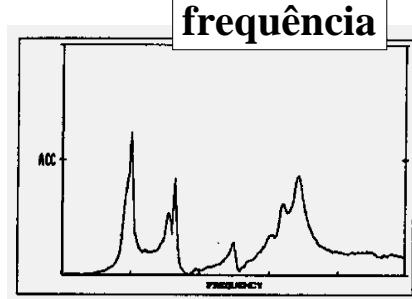
Sintomatologia

Amplitude

tempo



frequência



Escola Náutica I.D.Henrique

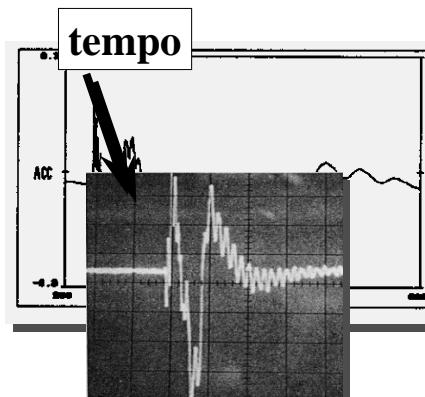
124

Ressonância

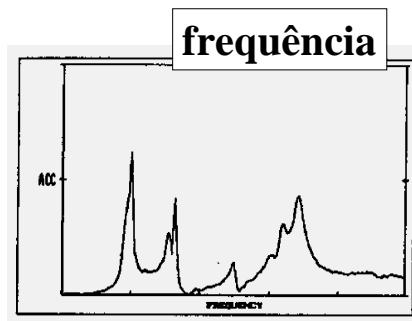
Sintomatologia

Amplitude

tempo



frequência



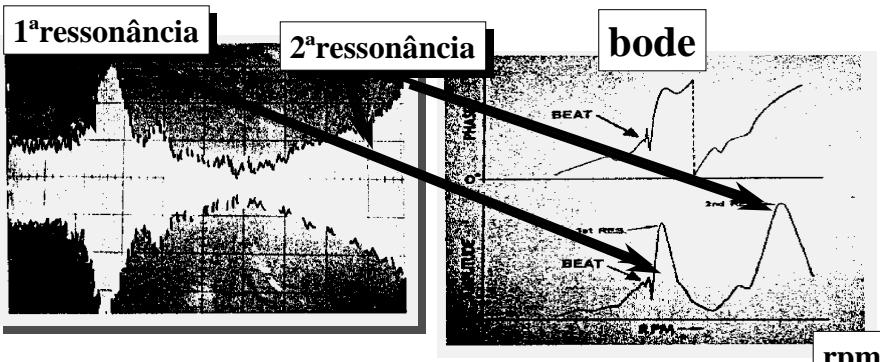
Escola Náutica I.D.Henrique

125

Ressonância

Sintomatologia

Amplitude



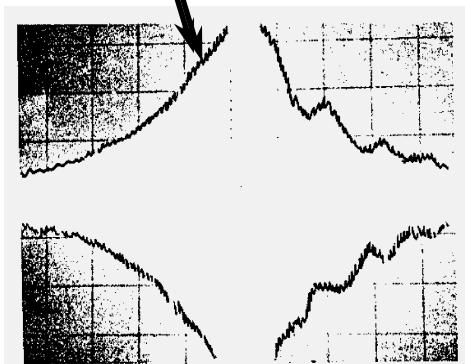
126

Ressonância

Sintomatologia

Amplitude

ressonância



tempo
teste de paragem (coast down)

Escola Náutica I.D.Henrique

127

Ressonância

Sintomatologia

Amplitude

- Amplitude anormalmente elevada
- Amplitude reduz substancialmente quando varia a velocidade
- Vibração muito direccional e muito superior ($>5x$) à vibração nas outras direcções
- No espectro de frequência a ressonância estrutural não varia com a variação de velocidade

Ressonância

Sintomatologia

Fase

- Grandes variações de fase em velocidades próximas da ressonância
- Quando a velocidade passa pela ressonância, a fase varia 180°

Ressonância

Sintomatologia

Harmónicas

- nxRPM elevadas
- amplitude das harmónicas altera-se substancialmente com pequenas variações de velocidade

Ressonância

Técnicas aconselhadas

- *Detecção:* NG e EF PBC com médias de espectros
- *Diagnóstico:* EF FFT, medição de fase e sinal no tempo
- Medir só na direcção radial. Medir na axial em caso de suspeita de problemas na fundação
- Efectuar testes de arranque e paragem (*run up* e *coast down*) com medição de cascata
- Testes de variação de velocidade (aconselhável em turbinas e compressores mas não em bombas centrífugas em virtude das freq.'s naturais variarem com a condição de funcionamento - efeito de Lomakin)

Ressonância

Técnicas aconselhadas

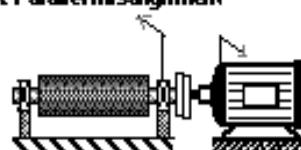
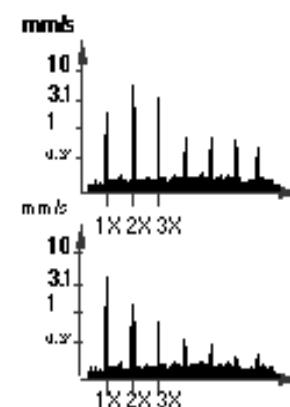
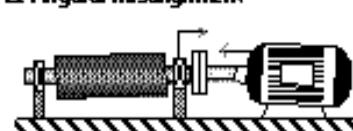
- Medição de fase por variação de velocidade
- Utilização da lâmpada estroboscópica para visualização do modo de vibração e fase
- Teste do impacto
- Tentar sentir nos pés e mãos os pontos de maior vibração
- Verificar apertos
- Verificar correcção da montagem do sistema de encanamentos

Escola Náutica I.D.Henrique

132

Desalinhamento

Desalinhamento

A. Parallel misalignment**B. Angular misalignment**

Escola Náutica I.D.Henrique

133

Desalinhamento

Desalinhamento

Existe desalinhamento sempre que as linhas de centros do veio e chumaceiras não coincidam ou que as linhas de centros dos veios da máquina mandante e accionada não coincidam.

O alinhamento perfeito não existe e, portanto, há que saber lidar com este problema.

Desalinhamento

Desalinhamento

Os acoplamentos flexíveis são uma solução para este problema. Estes servem para suportar o desalinhamento mas não eliminam a vibração daí resultante.

A vibração, quando em excesso, tenderá a desgastar rapidamente as chumaceiras, os retentores e os acoplamentos.

A substituição ou reparação destes componentes com uma frequência inferior a 5 anos será provavelmente indicador de problemas de desalinhamento.

Desalinhamento

Causas do desalinhamento

- Deficiente montagem do acoplamento
- Chumaceiras desalinhadas
- Pernos da fundação, ou estrutura de suporte, aliviados
- Apoios que cederam
- Tensões térmicas não previstas

Escola Náutica I.D.Henrique

136

Desalinhamento

Tipos de desalinhamento

- Desalinhamento de chumaceiras
- Desalinhamento de engrenagens
- Desalinhamento entre transmissões ou acoplamentos

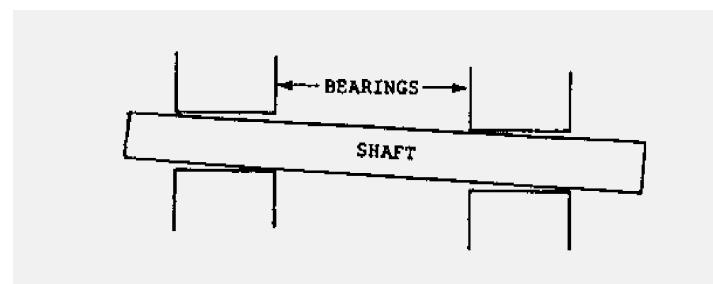
Escola Náutica I.D.Henrique

137

Desalinhamento

Tipos de desalinhamento

Desalinhamento de chumaceiras :



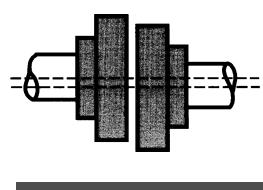
Escola Náutica I.D.Henrique

138

Desalinhamento

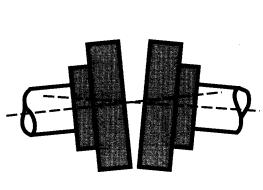
Tipos de desalinhamento

Desalinhamento entre transmissões ou acoplamentos :



desalinhamento paralelo
(horizontal ou vertical)

+



desalinhamento angular

=

desalinhamento usual

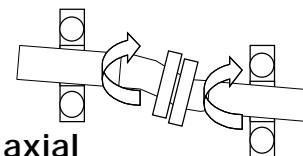
Escola Náutica I.D.Henrique

139

Desalinhamento

Sintomatologia

Amplitude



- Vibração elevada na direcção axial
- Componente a 2xRPM axial maior que a 1xRPM
- Maiores amplitudes nas chumaceiras do lado do acoplamento
- As amplitudes na direcção axial poderão ser superiores às radiais
- A razão de amplitudes entre a componente axial e radial pode ser usada como indicador de severidade (pode ir até 2x). Nesta comparação podem usar-se as componentes a 1 e 2xRPM de ambas as direcções
- Não é sensível à variação de velocidade

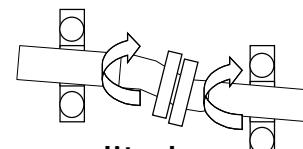
Escola Náutica I.D.Henrique

140

Desalinhamento

Sintomatologia

Amplitude



- Se só desalinhamento angular : amplitude síncrona dominante em ambas as direcções (radial e axial)
- Se só desalinhamento paralelo : amplitude síncrona elevada na direcção axial. Componente predominante na direcção radial a 2xRPM
- Vibração ocorre na direcção oposta ao plano do desalinhamento paralelo

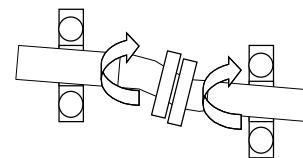
Escola Náutica I.D.Henrique

141

Desalinhamento

Sintomatologia

Amplitude

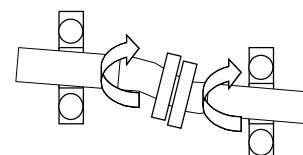


O desalinhamento também provoca tensões nos elementos internos do acoplamento que em cada rotação são pressionados e afastados entre si. O efeito deste tocar cíclico entre elementos é o aparecimento de uma vibração real à frequência de n^o de elementos x RPM.

Desalinhamento

Sintomatologia

Amplitude

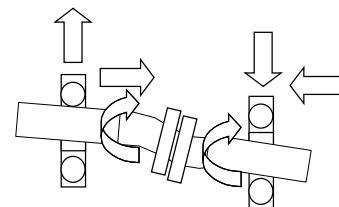


O desalinhamento depende da temperatura. Todos os materiais se dilatam com o aumento de temperatura. O movimento daí resultante provoca alterações no alinhamento. Assim, a alteração na vibração, especialmente nas harmónicas, durante o aquecimento das máquinas é um forte indicador de desalinhamento.

Desalinhamento

Sintomatologia

Fase. Desalinhamento de chumaceiras.



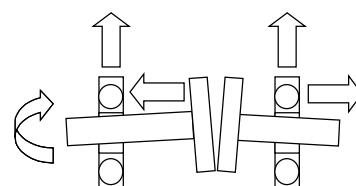
Escola Náutica I.D.Henrique

144

Desalinhamento

Sintomatologia

Fase. Desalinhamento do acoplamento.



Escola Náutica I.D.Henrique

145

Desalinhamento

Sintomatologia

Fase

- Estável
- As chumaceiras de apoio dos extremos do veio apresentam desfasamento de 180° na direcção axial (desal. angular) e/ou radial (desal. paralelo)
- A regra anterior só é válida para veios rígidos. No caso dos flexíveis há que conhecer a dinâmica destes (modos de vibração)
- Se a diferença de fase de aprox. 180° for notada nas chumacéreas de cada lado do acoplamento, deve-se suspeitar de desalinhamento deste ou avaria do acoplamento flexível. Se o desfasamento se verificar entre chumaceiras do mesmo lado do acoplamento, é provável o empeno do veio ou desalinhamento severo de chumaceiras

Escola Náutica I.D.Henrique

146

Desalinhamento

Sintomatologia

Harmónicas

O desalinhamento manifesta-se no domínio da frequência como uma série de harmónicas de $1 \times RPM$ ($2, 3, 4, \dots$).

As harmónicas ocorrem por causa da tensão induzida no veio pelo desalinhamento. As harmónicas não são na verdade vibrações àquelas frequências mas o efeito na FFT da truncagem da sinusoide $1 \times RPM$.

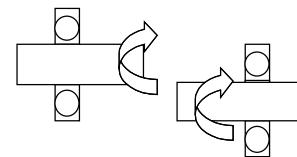
Escola Náutica I.D.Henrique

147

Desalinhamento

Sintomatologia

Harmónicas

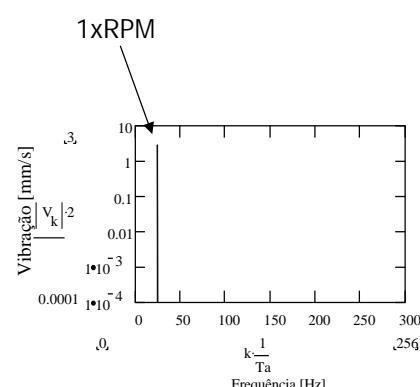
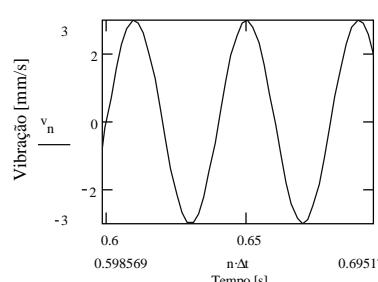
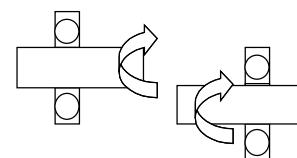


Dois veios desalinhados e não acoplados podem rodar livremente nos seus eixos próprios. Assim, a vibração a 1xRPM (desequilíbrio residual do veio) é uma sinusoide perfeita.

Desalinhamento

Sintomatologia

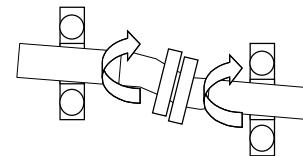
Harmónicas



Desalinhamento

Sintomatologia

Harmónicas

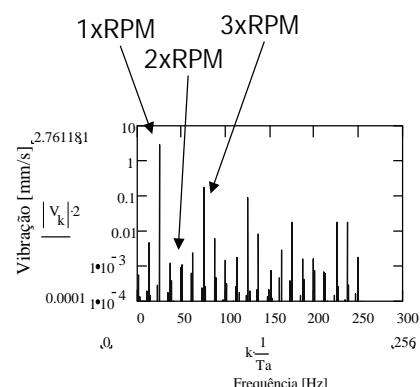
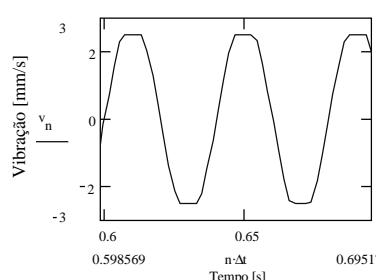
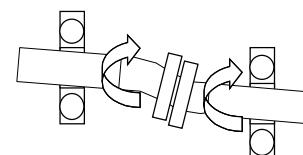


Quando os dois veios são acoplados ficam em tensão um contra o outro. O resultado deste esforço é a distorção da onda sinusoidal a 1xRPM que não consegue atingir a máxima amplitude. A FFT da sinusoide deformada apresenta muitas harmónicas de 1xRPM.

Desalinhamento

Sintomatologia

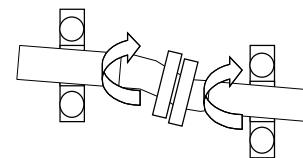
Harmónicas



Desalinhamento

Sintomatologia

Harmónicas



A distorção harmónica é uma medida efectiva do desalinhamento. Esta medida poderá ser usada como parâmetro para *análise de tendência*.

Desalinhamento

Sintomatologia

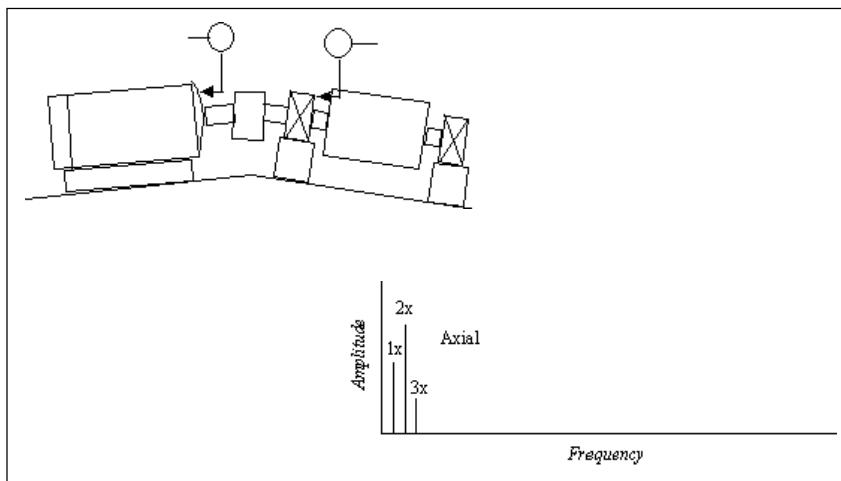
Harmónicas

- Se só desalinhamento angular : componentes axiais a 2, 3 ou mais xRPM
- Se só desalinhamento paralelo : componente radial, predominante no espectro, a 2xRPM
- Normal o aparecimento das harmónicas (radiais e axiais) 2 e 3xRPM
- Possível o aparecimento das harmónicas (radiais e axiais) 4 a 10xRPM mas de amplitude reduzida

Desalinhamento

Exemplos

Desalinhamento angular



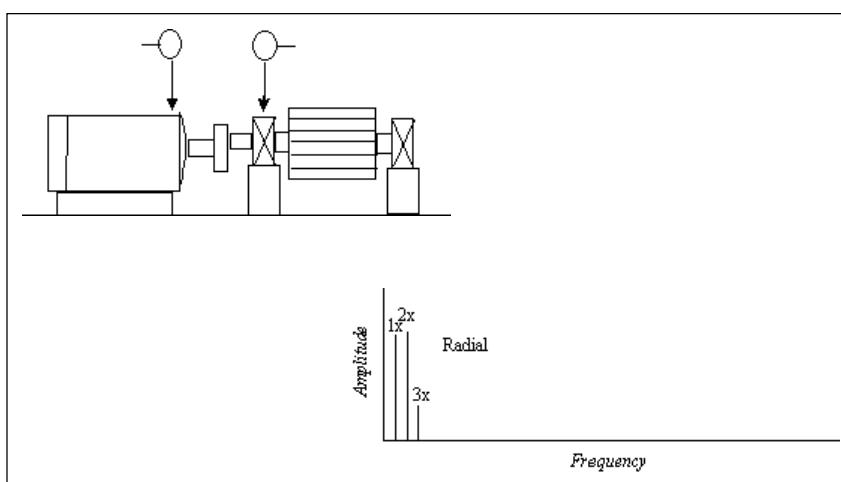
Escola Náutica I.D.Henrique

154

Desalinhamento

Exemplos

Desalinhamento paralelo



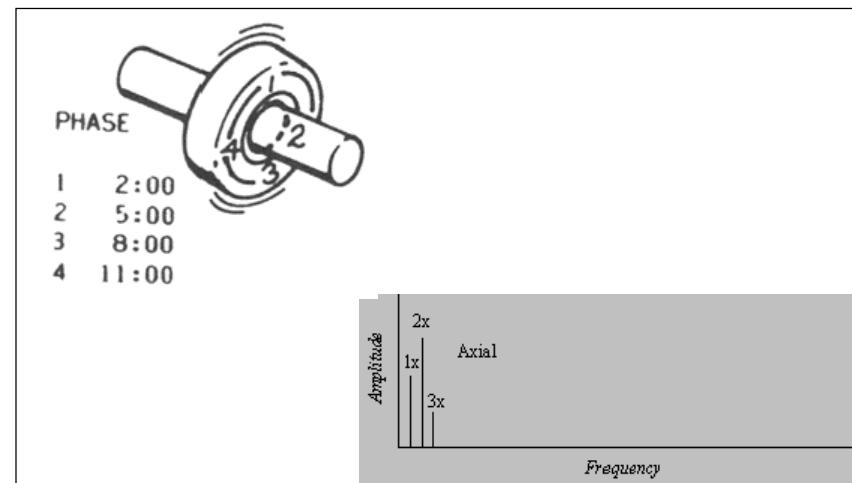
Escola Náutica I.D.Henrique

155

Desalinhamento

Exemplos

Chumaceira desalinhada ou enjambrada



Escola Náutica I.D.Henrique

156

Desalinhamento

Técnicas aconselhadas

- **Detecção:** NG e EF PBC
- **Diagnóstico:** EF FFT com médias de espectros, sinal no tempo e medição de fase. Medir em aceleração para realçar as harmónicas.
- Medir em todas as chumaceiras e no mesmo lado destas
- Medir na direcção axial e na vertical e/ou horizontal
- Efectuar medições a frio e a quente (as vibrações a quente deverão ser inferiores às obtidas logo após o arranque)

Escola Náutica I.D.Henrique

157

Desalinhamento

Técnicas aconselhadas

- Isolamento temporário da fonte de calor ou arrefecimento da estrutura de suporte das chumaceiras com acompanhamento da evolução das vibrações
- Desaperto e aperto, um por um, dos pernos do fixe com observação simultânea das vibrações (colocar o sensor onde as vibrações são mais elevadas)
- Desacoplar as máquinas. Se a vibração desaparecer é um problema de acoplamento, senão é outro e da máquina que apresenta essa vibração.

Escola Náutica I.D.Henrique

158

Desalinhamento

Técnicas aconselhadas

- Utilizar estroboscópio caso o desalinhamento seja visível a olho nú ou para acoplamentos flexíveis
- Confirmar suspeitas com medição de temperatura das chumaceiras, inspecção visual das sapatas com máquina parada e em funcionamento, etc...

Escola Náutica I.D.Henrique

159

Referências bibliográficas

Referências bibliográficas

- Integração de técnicas de controlo de condição aplicadas a bomba centrífugas – Chedas Sampaio; Tese de Mestrado IST 1995
- Machinery Vibration, measurement and analysis – Victor Wowk; McGraw Hill 1991

FIM