

MANUTENÇÃO PREDITIVA MONITORANDO SEVERIDADE DE VIBRAÇÕES

Prof. Dr. Adyles Arato Jr

Unesp / Ilha Solteira

Organização:

APRESENTAÇÃO

Um termo que anda “na moda” atualmente, é a disponibilidade. Quando se refere a equipamentos mecânicos, o conceito mais aceito para este termo é:

“ a porcentagem de tempo do equipamento que ele esta em condições de realizar sua tarefa, calculado como parcela total do tempo útil de trabalho da empresa...”.

Nestas condições, se pode dizer que um equipamento com maior disponibilidade pode gerar mais lucros, ou seja, quanto menos tempo a máquina estiver parada por problemas de manutenção melhor.

O que afeta a disponibilidade?

- Tempo de preparação da máquina
- Paradas para inspeção
- Paradas para manutenção preventiva
- Paradas inesperadas devido a quebras

Como resolver?

Aplicar alguma técnica que:

- Permita a inspeção sem parar
- Permita programar a parada de manutenção
- Consiga prever uma futura “quebra”

Manutenção Condicional ou Preditiva

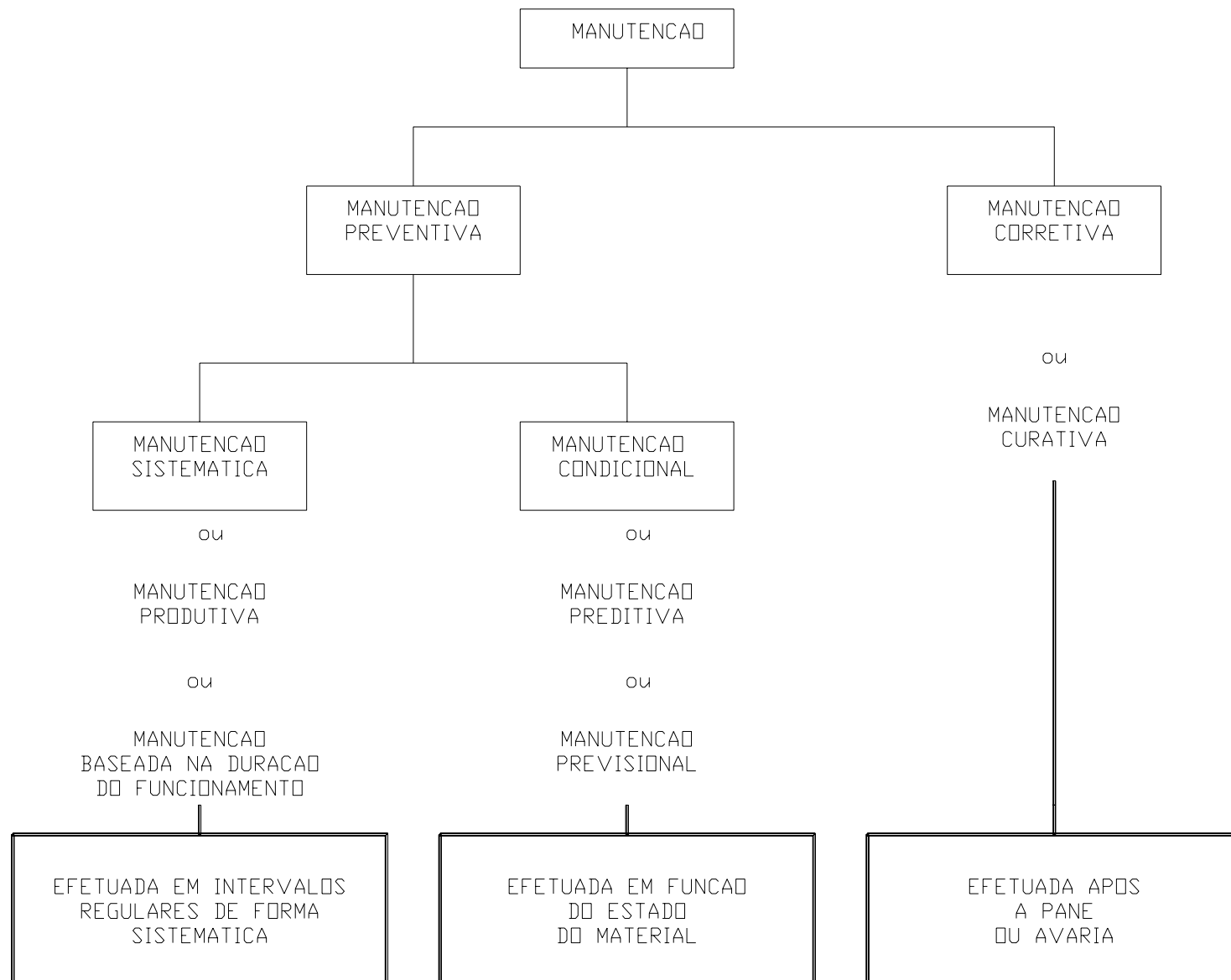
“.... A condição e desgaste histórico do equipamento é identificado monitorando-se alguns parâmetros de seu funcionamento sem parar, ou parando muito rapidamente o equipamento....”

Neste mini-curso, se fará um estudo da aplicação de uma das técnicas usando análise de vibrações: o ***monitoramento medindo-se a severidade de vibração***, porque:

- é simples,
- bem aceita internacionalmente e
- normatizada por normas internacionais e a ABNT.

SUMÁRIO

- **CONCEITOS E TÉCNICAS DA MANUTENÇÃO PREDITIVA**
- **ALGUNS MÉTODOS DE MANUTENÇÃO PREDITIVA**
 - **Análise de Óleo**
 - **Sistemas Especialistas**
 - **Métodos de Observação**
- **ANÁLISE DE VIBRAÇÕES NA MANUTENÇÃO PREDITIVA**
 - **Descrição e Medição de Vibrações Mecânicas**
- **FONTES COMUNS DE VIBRAÇÕES E RUÍDO**
- **INSTRUMENTAÇÃO BÁSICA PARA MEDIDA DE VIBRAÇÕES**

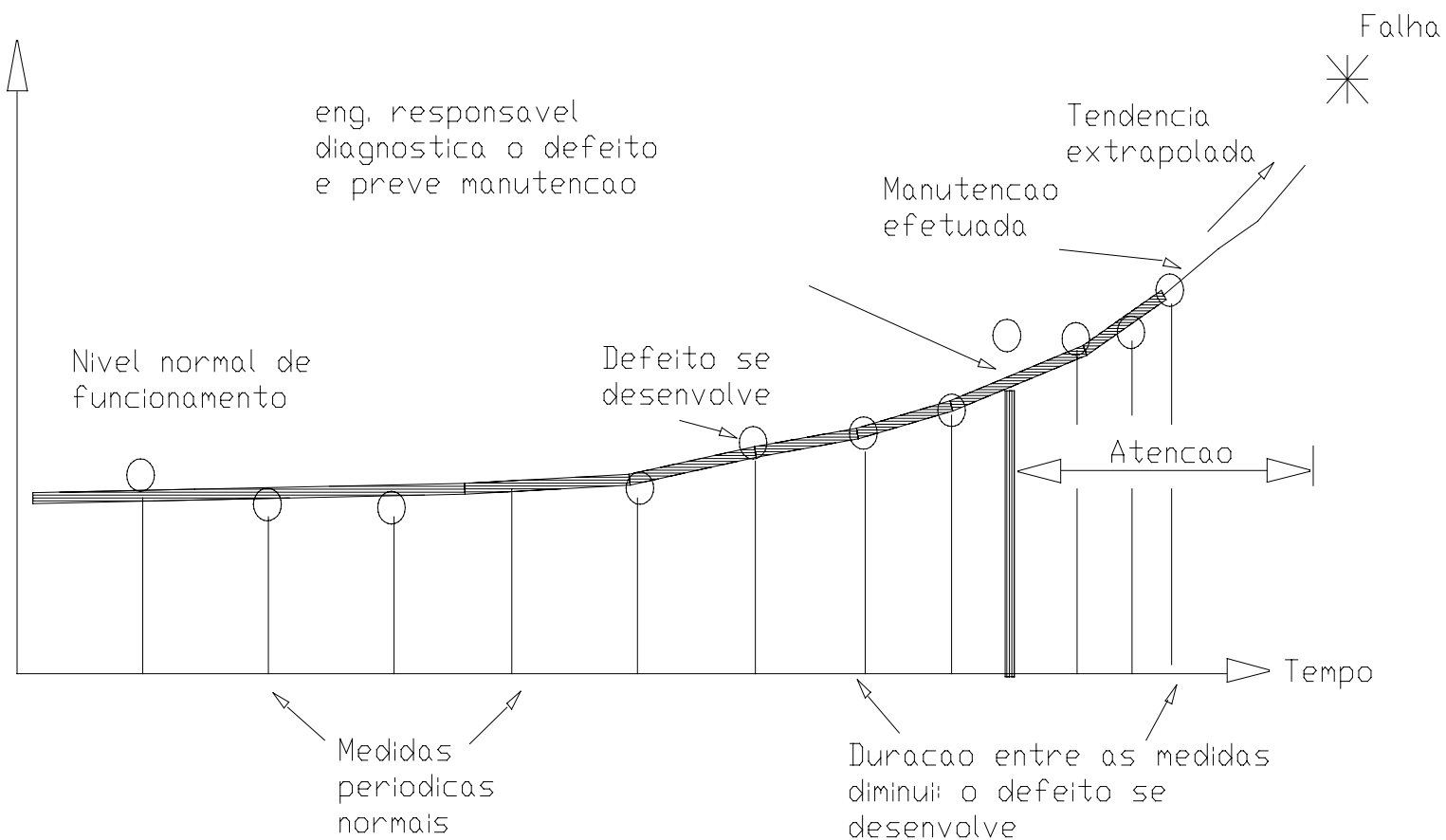


FASES DA MANUTENÇÃO PREDITIVA

A prática da Manutenção Preditiva envolve três fases:

- Estabelecimento de um diagnóstico
- Análise da tendência.
- Detecção do defeito.

FASES DA MANUTENÇÃO PREDITIVA



VANTAGENS DA MANUTENÇÃO PREDITIVA

- Aumento do tempo médio entre cada revisão;
- eliminação de panes não atendidas;
- diminuição do estoque de peças de reposição;
- diminuição do custo de cada intervenção;
- eliminação da substituição de componentes em estado operacional;
- minimização de eventos catastróficos decorrentes de quebra de componentes durante o serviço.

ALGUNS MÉTODOS DE MANUTENÇÃO PREDITIVA

- Análise de Vibração;
- Análise de Óleos;
- Sistemas especiais;
- Método de observação.

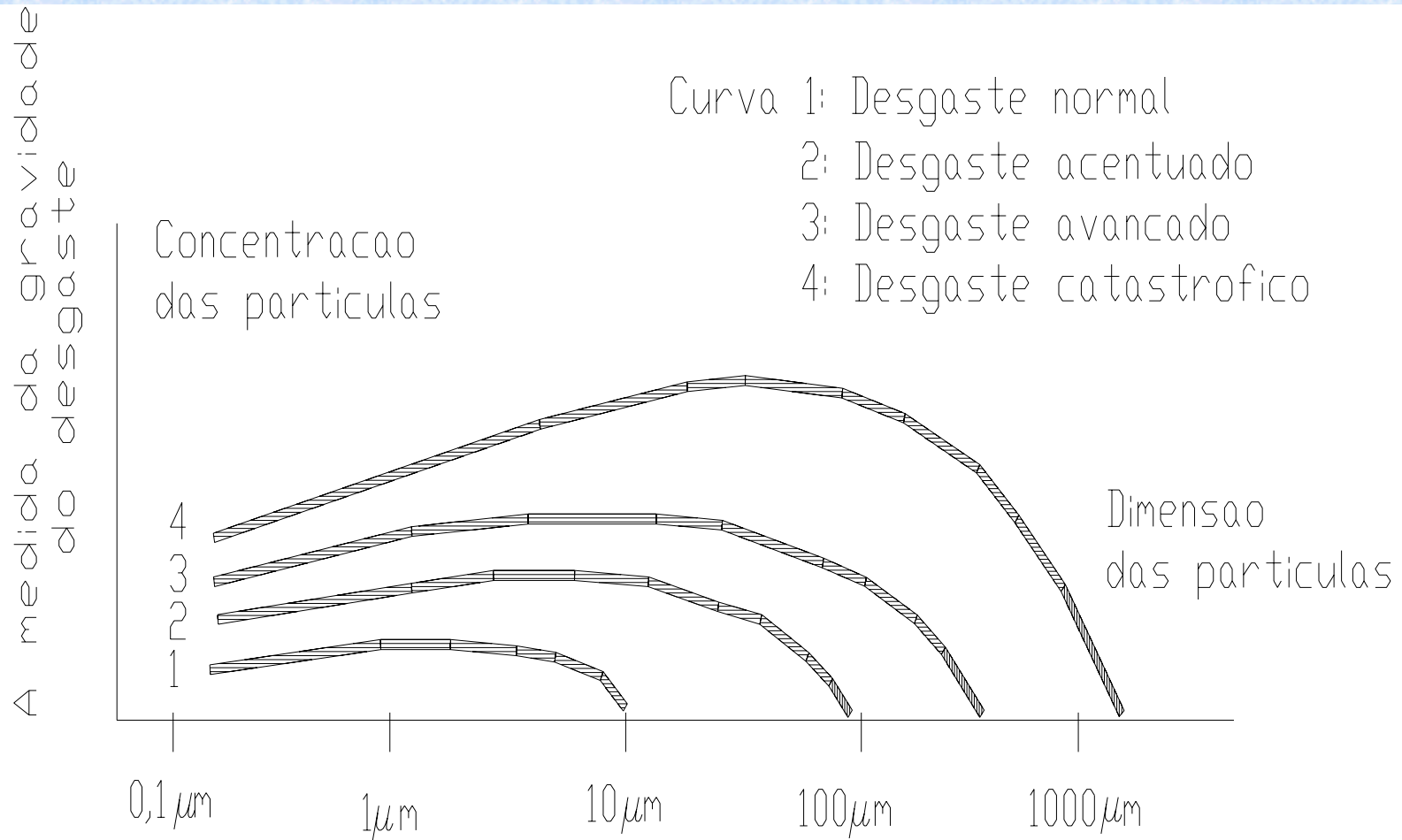
Análise de Óleo

- **Objetivo inicial:** economizar através da otimização do intervalo entre as trocas.
- **Objetivo decorrente:** controle de defeitos para a Manutenção Preditiva

Analise de óleo: Metodologia

- Medir a **taxa** de contaminação do óleo
- Analisar as **características** desta contaminação verificando:
 - O tipo de contaminante (Natureza),
 - A dimensão das partículas e
 - A forma das partículas do contaminante (Morfologia).

Análise da dimensão das partículas



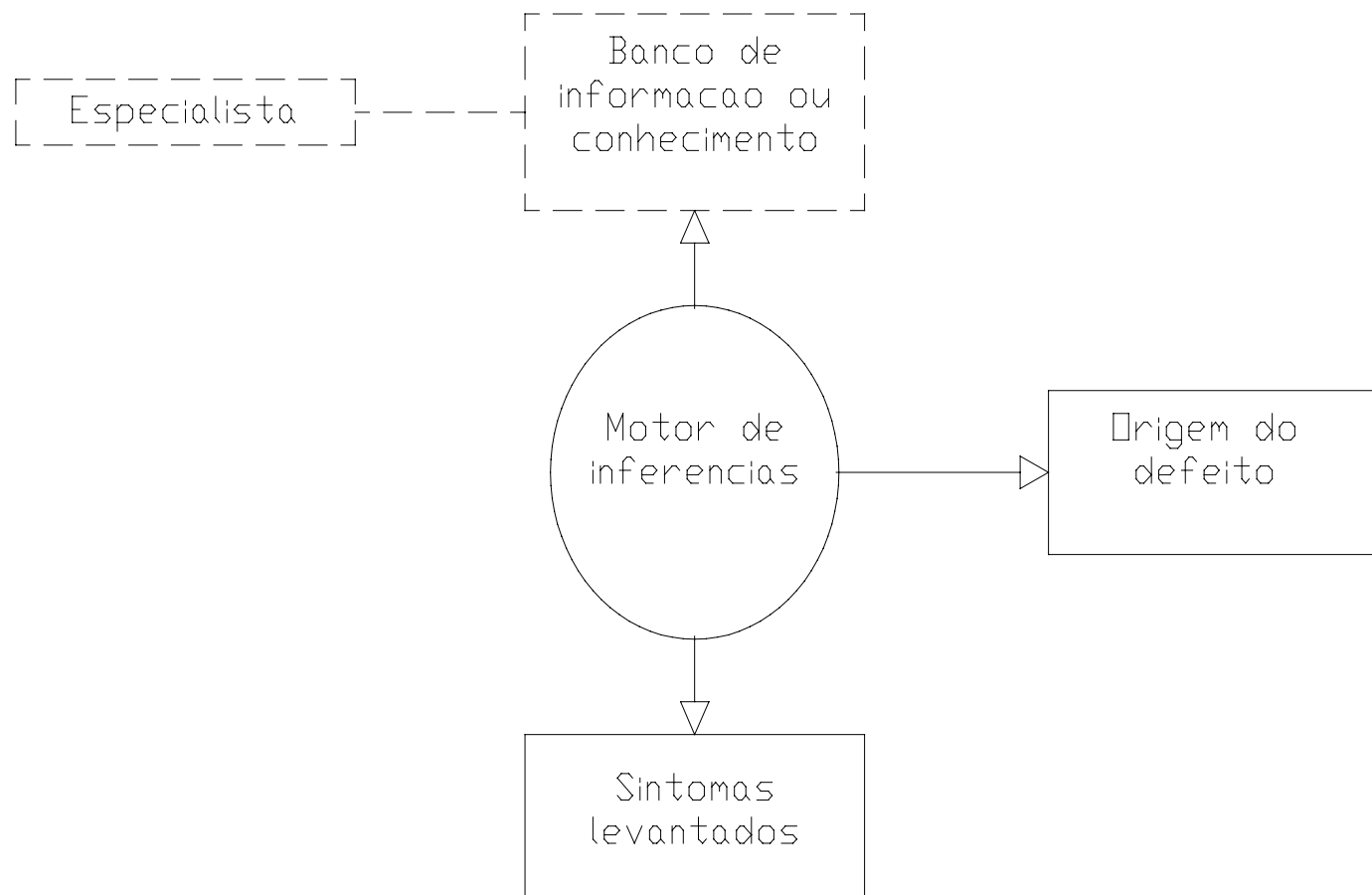
Morfologia das partículas e modo de desgaste

Forma das partículas	Tipo de desgaste	Importância do desgaste
Pequenas plaquetas (de 0,3 a 5 μm)	Desgaste de adesão	Desgaste anormal
Grandes plaquetas (5 a 150 μm)	Atrito	Desgaste perigoso
Escamas (10 μm a 1 mm)	Escamação	Desgaste perigoso
Lascas enroladas ou encurvadas	Abrasão	Grave, sobretudo se as lascas foram numerosas
Esferas plásticas	Depósito de aditivos	
Esferas metálicas		
Pequenas (1 a 5 μm)	Fadiga dos rolamentos	Ocorrência grave
Grandes (>10 μm)	Cavitação - erosão	Ocorrência grave
Magmas, aglomerados (2 a 150 μm)	Corrosão - oxidação	Ocorrência grave

Principais técnicas utilizadas na análise do resíduo sólido dos óleos

- a) Ferrografia por leitura direta. Feita com base na extração das partículas contaminantes magnetizáveis, contidas no lubrificante, pela ação de um campo magnético.
- b) Espectometria de emissão. Permite a determinação da natureza e concentração dos elementos presentes na amostra através da faixa e intensidade da radiação luminosa emitida pela amostra, quando submetida a uma excitação.
- c) Ferrografia analítica. Permite se fazer um estudo profundo das partículas cujo tamanho esteja entre 1 e 250 μm . Constrói um ferrograma, que é uma chapa de vidro sobre a qual são distribuídos os contaminantes em função do seu tamanho. A análise é complementada utilizando-se microscopia óptica.

Sistemas Especialistas



Métodos de Observação

- Analise do estado da superfície
(Exame visual, endoscopia, holografia, molde e impressão);
- Analise estrutural;
(Ultra som, magno flux, radiografia, líquidos penetrantes)
- Analise da dissipação de energia;
(Termografia, termometria)
- Analise dos efluentes.
(procedimentos químicos diversos para avaliar concentrações)

ANÁLISE DE VIBRAÇÕES NA MANUTENÇÃO PREDITIVA

- As estruturas das máquinas, excitadas pelos esforços dinâmicos decorrentes de seu funcionamento, respondem com sinais vibratórios cuja frequência é idêntica àquela dos esforços que os provocam.
- O sinal de vibração tomado em algum ponto, será a soma das respostas vibratórias da estrutura as diferentes frequências dos esforços excitadores.

PREMISSAS

- A deterioração do equipamento traduz-se por uma modificação na distribuição da “energia vibratória”
- A consequência freqüente é o aumento do nível de vibrações
- Pode-se, acompanhando a evolução desses sinais, identificar aparecimento de esforços dinâmicos novos (defeitos) ou,
- O aumento abrupto da amplitude da resposta, indicadores da degradação do funcionamento.

ABORDAGENS

- Análise por nível global de vibração,
(o controle do estado do equipamento é realizado com base em um algum valor global calculado para o sinal de vibração)
- Análise por espectro da vibração,
(é realizada uma análise espectral do sinal vibratório obtido)
- Análise por processamento do sinal de vibração.

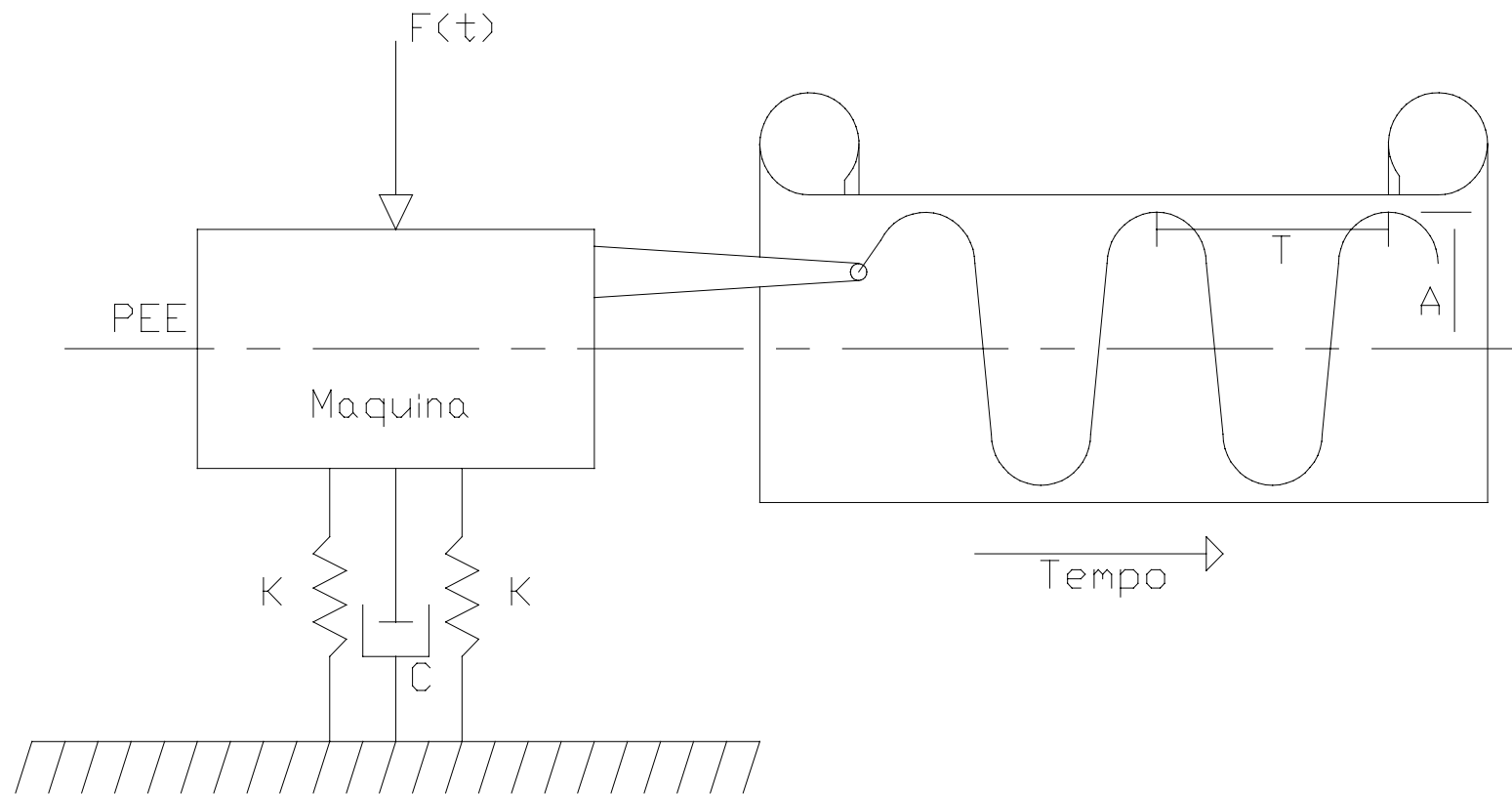
MANUTENÇÃO PREDITIVA PELO NÍVEL DE VIBRAÇÃO

- **Valor eficaz da velocidade de vibração:** Velocidade RMS do sinal absoluto tomado sobre a estrutura. Recomendado para monitorar máquinas rotativas ou equipamentos mais complexos, cuja faixa de rotação esteja entre 600 a 12000 rpm.
- **Valor da amplitude de vibração:** Valor de pico ou pico a pico da oscilação relativa eixo – mancal. Recomendado para o monitoramento de máquinas simples, tais como turbinas hidráulicas, que tenham baixas velocidades de rotação, ou seja, 60 a 900 rpm.

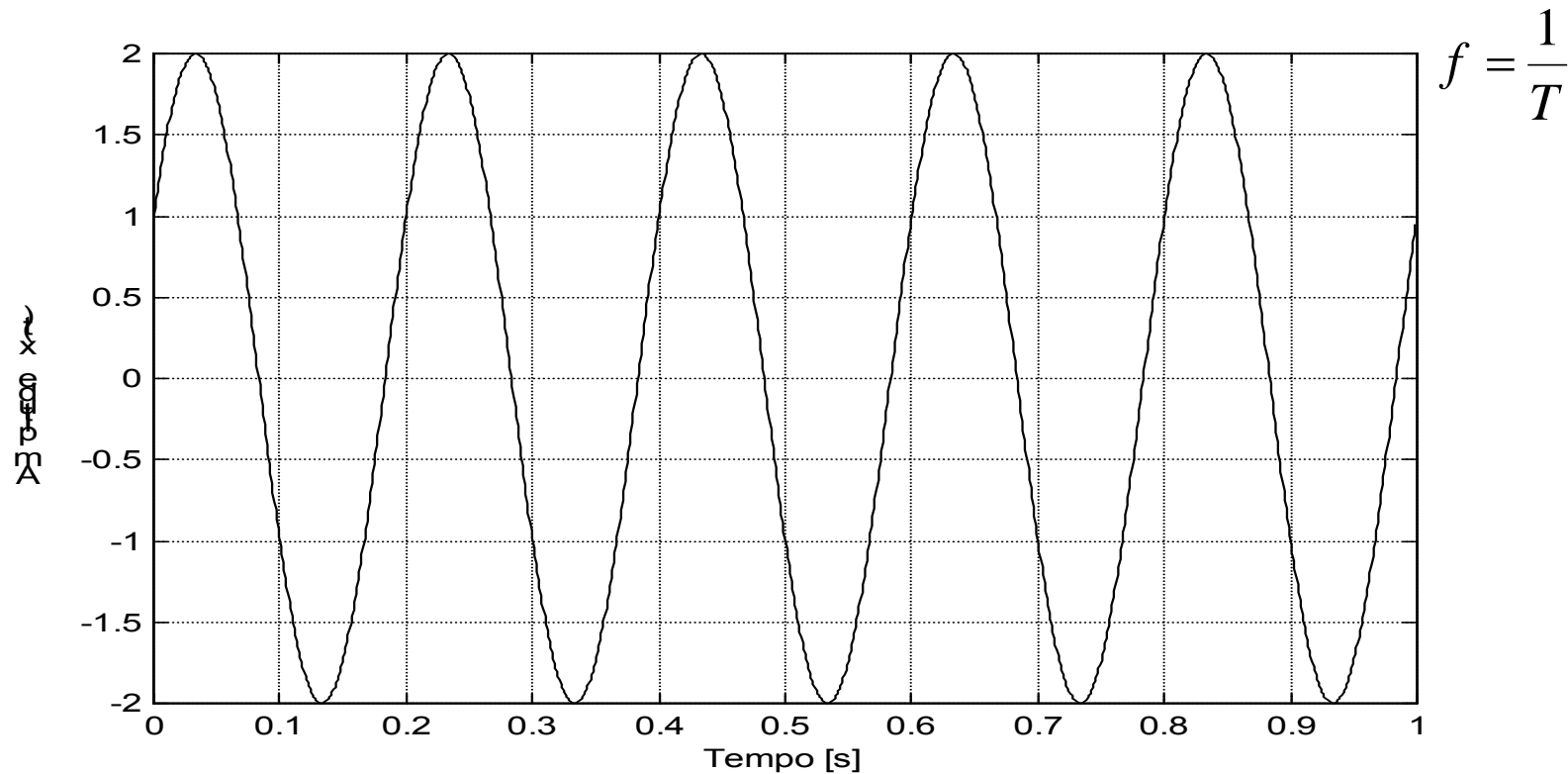
MANUTENÇÃO PREDITIVA PELO ESPECTRO DE VIBRAÇÃO

- É realizada uma análise espectral do sinal vibratório obtido,
- A análise espectral vai revelar “picos” de amplitude nas frequências associadas ao funcionamento da máquina,
- Observando-se o espectro é possível se identificar as frequências devidas ao funcionamento normal e as devidas a defeitos.

Descrição de Vibrações Mecânicas



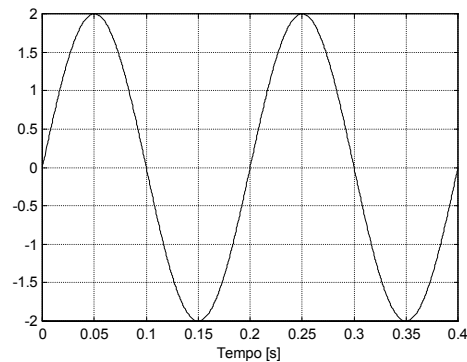
Descrição de Vibrações Mecânicas



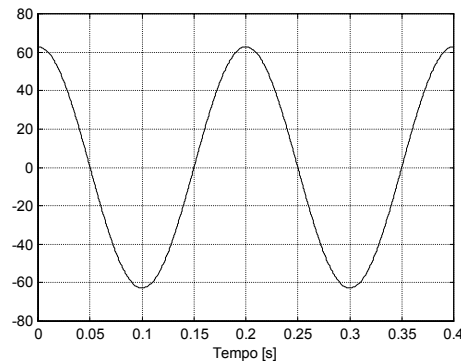
$$x(t) = X \operatorname{sen}(\omega t + \varphi) \quad \varphi = \operatorname{sen}^{-1} \frac{X_0}{X}$$

Descrição e Medição de Vibrações Mecânicas

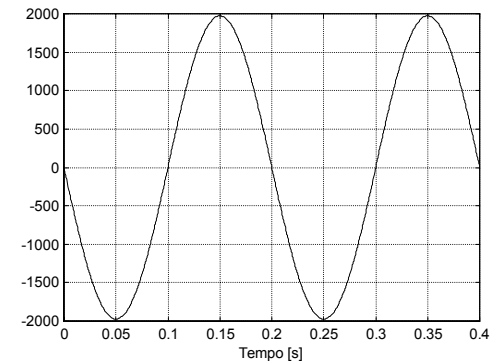
Considerando um sinal puramente senoidal:



$$x(t) = X \sin(\omega t + \varphi)$$

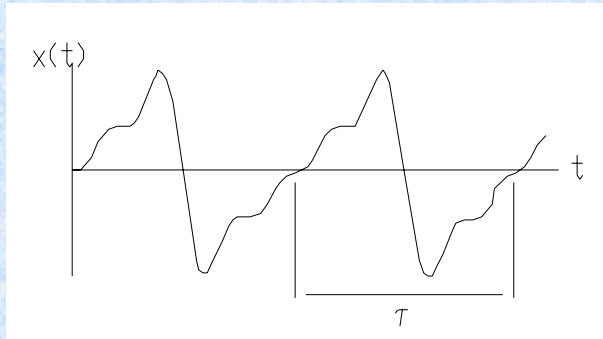


$$v(t) = \frac{dx}{dt} = X\omega \cos(\omega t + \varphi)$$



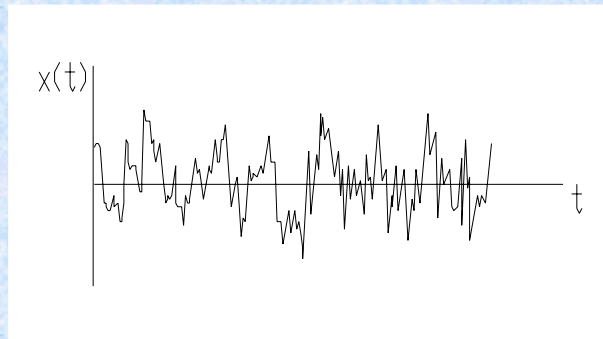
$$a(t) = \frac{dv}{dt} = -X\omega^2 \sin(\omega t + \varphi)$$

Sinais de vibração típicos



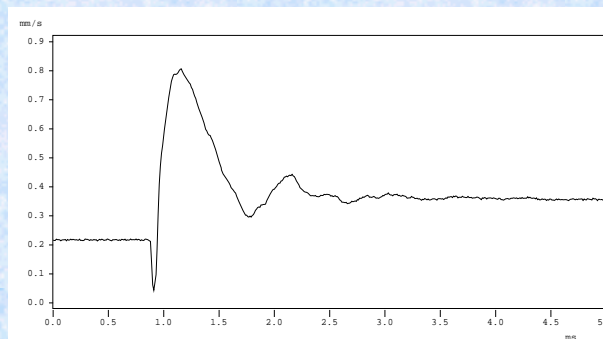
Vibrações Periódicas:

Vibrações que se **repetem** segundo um dado período de tempo.



Vibrações Aleatórias:

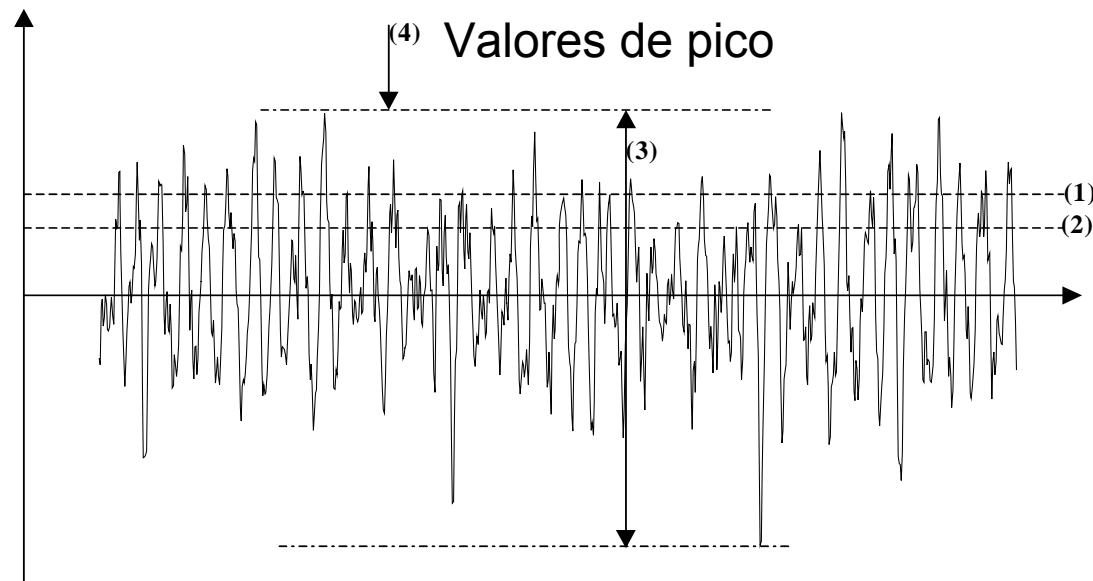
Vibrações que são **imprevisíveis**, quanto ao seu valor instantâneo, para qualquer instante de tempo futuro.



Vibrações Transitórias:

Vibrações que existem apenas num espaço **limitado no tempo**, sendo nula em qualquer outro tempo.

Medição através de valores globais



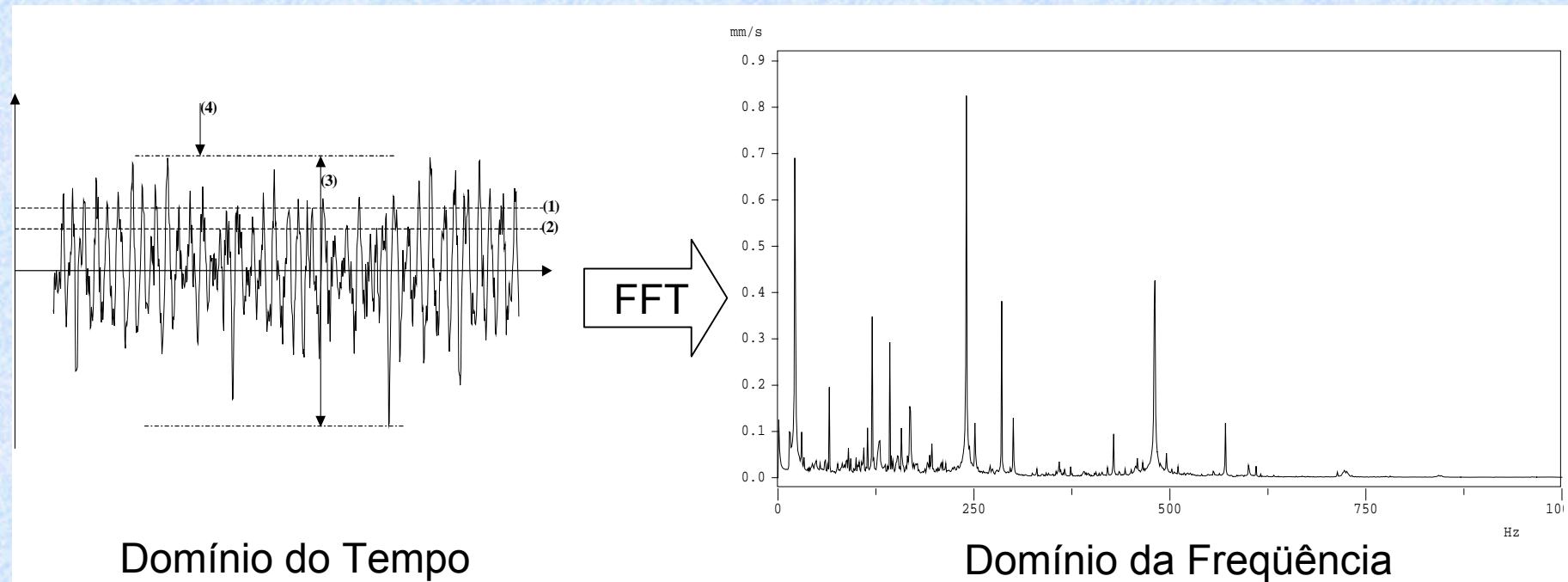
(1) = Nível do valor eficaz (RMS): $x_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt}$

(2) = Nível do valor médio: $x_m = \frac{1}{T} \int_0^T |x(t)| dt$

Outras medidas globais:

- Fator de forma: $F_f = \frac{x_{RMS}}{x_m}$
- Fator de crista: $F_c = \frac{x_{pico}}{x_{RMS}}$
- Para vibrações senoidais: $x_{RMS} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} x_m = \frac{1}{\sqrt{2}} x_{pico}$

Descrição no domínio da frequência



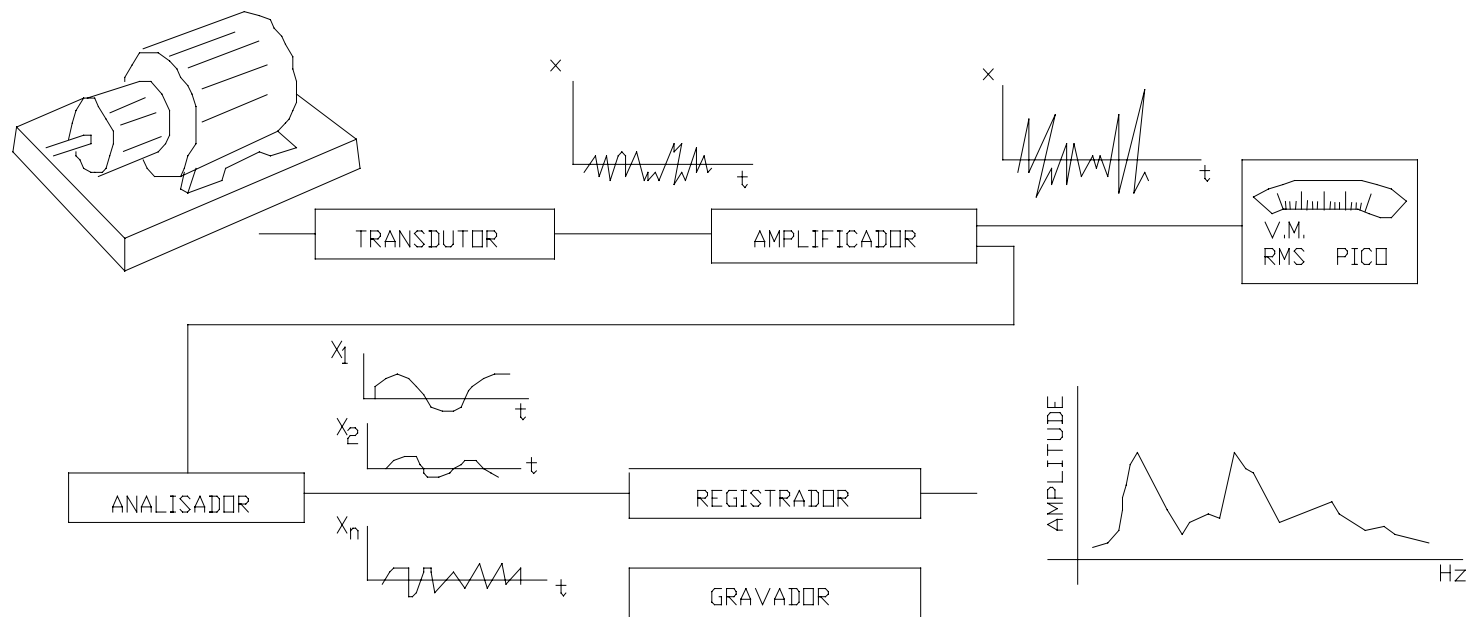
$$x(t) = X_1 \text{sen}(\omega_1 t + \varphi_1) + X_2 \text{sen}(\omega_2 t + \varphi_2) + \cdots + X_n \text{sen}(\omega_n t + \varphi_n)$$

Fontes comuns de vibração e ruído

- Desbalanceamento
 - Desalinhamento
 - Engrenamento
 - Rolamentos
 - Eixo torto
 - Cavitação
 - Atrito
 - Problemas elétricos.
- 80% dos problemas

Instrumentação básica para medir vibrações

- A especificação da instrumentação básica a ser adotada deve seguir os requisitos definidos pela NBR 10273 ou ISO 2954.



Transdutores do tipo Sísmicos

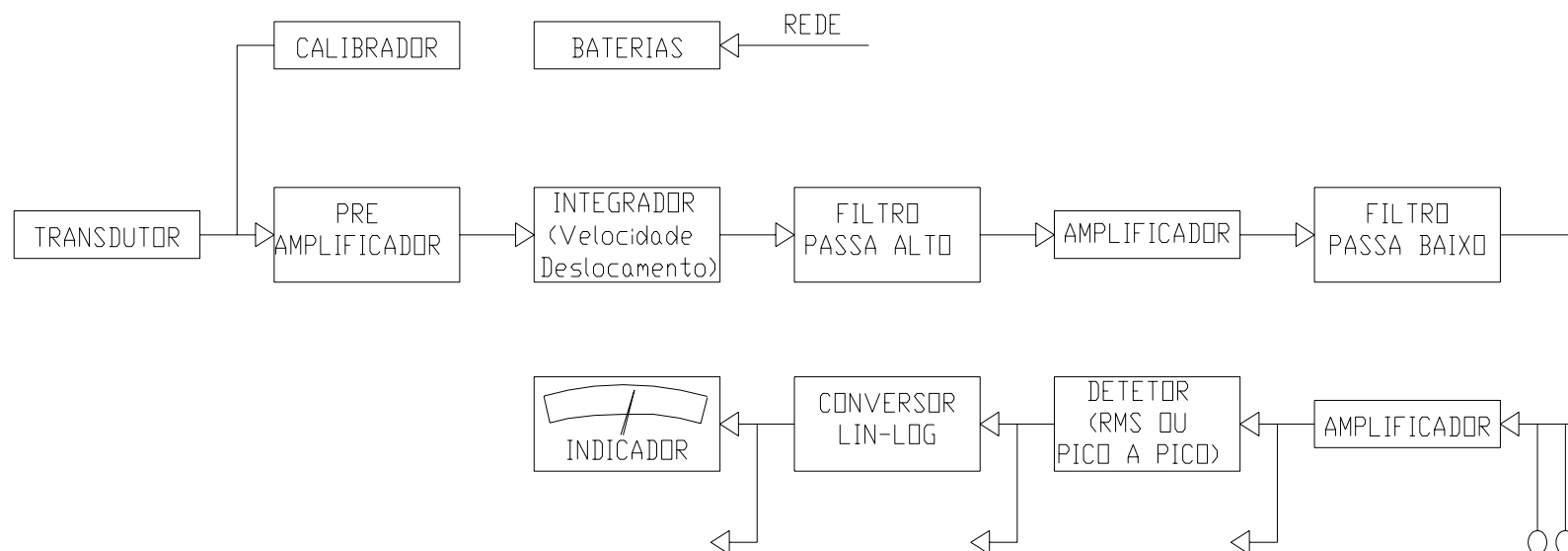
- Montados sobre a estrutura, captam a sua vibração absoluta. (O transdutor **vibra junto com a estrutura**)
 - Vibrômetro: sensível a velocidade de vibração
 - Acelerômetro: sensível a aceleração
 - Ultra sônico: capta as ondas de choque

Transdutores relativos

- Montados em um ponto fora da peça sob análise, medem a oscilação da peça em relação a ele.
 - Indutivo,
 - Capacitivo,
 - Lazer (Óticos).
- * Todos sensíveis ao deslocamento.

Amplificador

O equipamento apresentado simplesmente como amplificador, deve ser entendido como um condicionador de sinais.



Filtros

- Passa baixo.
- Passa alto. (Usado para cut of)
- Passa banda:
 - Largura de banda constante,
 - Porcentagem de banda constante,
 - Oitava (largura de 3dB), e
 - 1/3 de oitava (largura de 1dB)

O que é dB?

- **dB** é uma medida que permite fazer a **comparação** entre os valores de uma **mesma grandeza física com base em uma referência**.
- É definida pela equação: $y_{dB} = 20 \log \left(\frac{x}{x_{ref}} \right)$
- * O valor x_{ref} deverá ser adequadamente escolhido

O que é oitava?

- Oitava = um valor 3dB acima do valor atual da grandeza sob análise. Ou seja:

$$3 = 20 \log \left(\frac{x}{x_0} \right) \Rightarrow \frac{x}{x_0} = 10^{\frac{3}{20}} \Rightarrow x = 1,41254 \cdot x_0$$

- * Pode-se dizer que o valor uma oitava acima ou abaixo de uma dada grandeza, é maior ou menor 41,254% do que o atual.

O que é 1/3 de oitava?

- 1/3 de oitava = um valor 1dB acima do valor atual da grandeza sob análise. Ou seja:

$$1 = 20 \log \left(\frac{x}{x_0} \right) \Rightarrow \frac{x}{x_0} = 10^{1/20} \Rightarrow x = 1,122 \cdot x_0$$

- * Pode-se dizer que o valor 1/3 de oitava acima ou abaixo de uma dada grandeza, é maior ou menor 11,22% do que o atual.

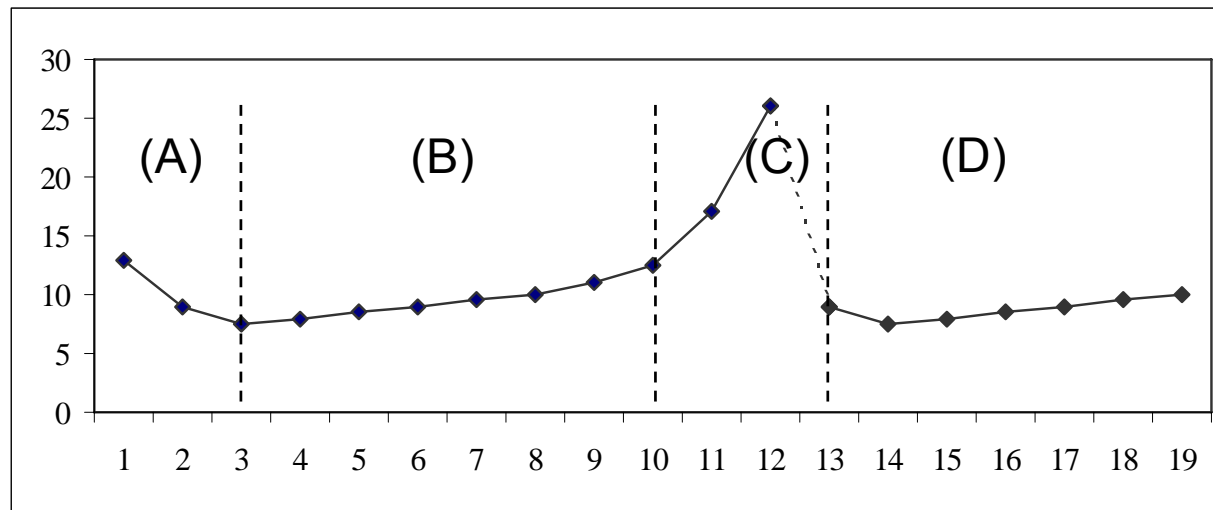
Monitoração usando severidade de vibração

- **Toda máquina quando funciona apresenta um certo nível de vibração,**
- Esta vibração é resultado do somatório das excitações de todas as suas fontes de ruído,
- As fontes de ruído normais, **suas peças móveis,** aumentarão o nível de excitação com a evolução do desgaste,
- O surgimento de algum **defeito** é igual ao acréscimo de **mais uma fonte de ruído,**
- Como decorrência, em qualquer dos casos, se notará um aumento no nível de vibração da máquina.

O método da monitoração periódica

- ✓ Mede-se o sinal de vibração em pontos críticos da máquina,
- ✓ Calcula-se, conforme o caso, um valor global desse sinal (Velocidade eficaz ou valor de pico),
- ✓ Faz-se um seguimento histórico da evolução do valor da medida com o tempo,
- ✓ Se a medida atingir um valor considerado não aceitável, ou sofrer uma variação abrupta, se para a máquina para inspeção e manutenção

O gráfico no tempo



A) Fase inicial (Máquina nova amaciando)

B) Monitoramento

C) Valor se eleva = realiza-se a manutenção

D) Reinício do monitoramento.

Critérios de severidade

A) Velocidade eficaz do sinal de vibração, também conhecida por velocidade RMS (Root Mean Square), definida como:

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

B) Valor de pico: $x_p = \max(x(t))_0^T$

*Em ambos os casos, T é o período de medição do sinal de vibração $x(t)$.

Seleção do critério

- Critério da velocidade eficaz (RMS):
 - Máquinas com mancais relativamente rígidos quando comparados com suas peças móveis (rolamentos ou hidrostáticos);
 - Máquinas com múltiplas fontes de ruído (engrenagens bombas de palhetas compressores);
 - Máquinas que contenham peças com movimento alternativo.

Seleção do critério

- Valor de pico
 - Máquinas rotativas simples com mancais de deslizamento ou hidrodinâmicos e eixos relativamente longos, tais como grupos geradores hidroelétricos, turbinas a vapor ou a gás.

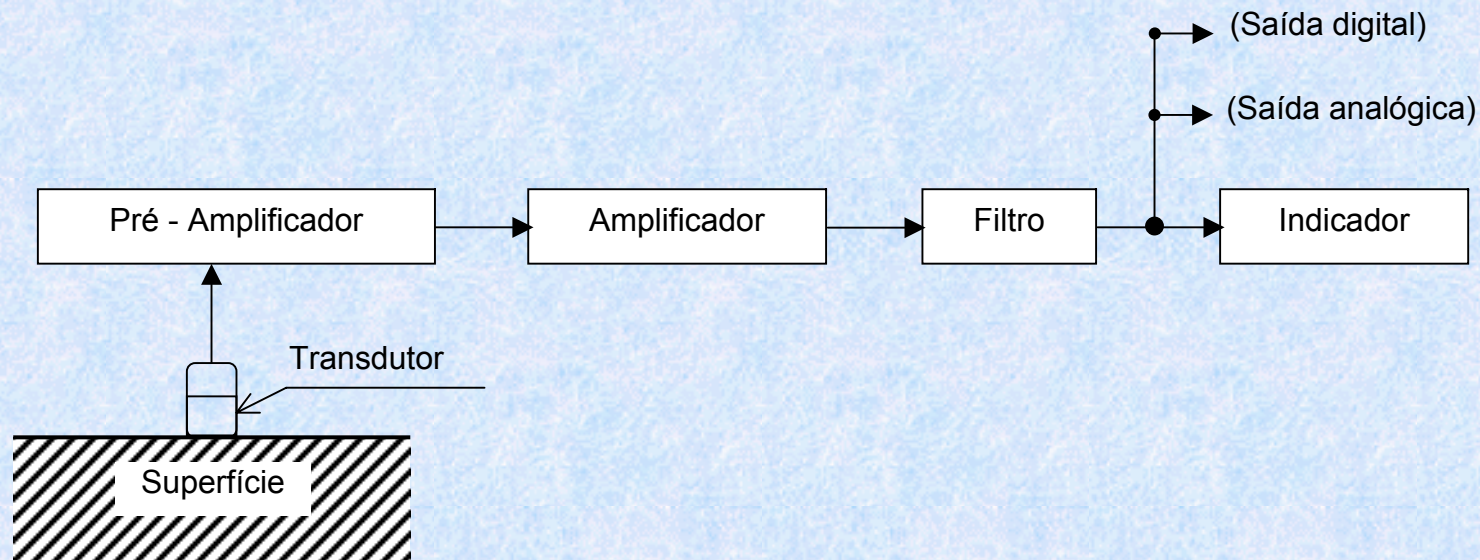
Pontos e medição para monitoramento

- Os mancais são pontos obrigatórios;
- Quando se fizer medição em carcaças, **evitar partes flexíveis**;
- Em cada um dos pontos deve-se estabelecer claramente, e documentar, as direções de medida: horizontal, vertical ou axial;
- A medição deve ser realizada **sempre nas mesmas condições operacionais** de velocidade e potência.

Avaliação da severidade de vibração ISO 2372 e NBR 10082 – **Critério de velocidade RMS.**

- O critério de severidade adotado é a Velocidade Eficaz de Vibração em mm/s, medida com filtro passa banda ajustado na faixa de 10 a 1000 Hz.
- Apesar de sua variedade, foi determinado por experiência e estatística, que as máquinas podem ser agrupadas em classes com base em sua potência, tamanho e montagem.
- As normas **SUGEREM** uma classificação em quatro classes.

Sistema de medição para uso da NBR 10082 ou ISO 2372



Classes de máquinas ISO 2372 e NBR 1082

- Classe I:
 - Máquinas pequenas, com acionamento por motor elétrico diretamente acoplado, potência máxima de 15 kW.
- Classe II:
 - Máquinas médias, tipo da Classe I, com potência maior que 15 kW, até 75 kW.
 - Motores ou máquinas montadas rigidamente até 300 kW.

Classes de máquinas ISO 2372 e NBR 1082

- Classe III:
 - Máquinas motrizes grandes e outras máquinas grandes (>75 kW), com massas rotativas montadas sobre fundações rígidas e pesadas.
- Classe IV:
 - Máquinas do tipo da Classe III, montadas sobre fundações relativamente flexíveis, por exemplo, conjunto turbogeradores.

Norma NBR 10082:

A = Boas condições,

B = Aceitável,

C = Limite tolerável,

D = Não permissível

Faixas de Severidade de Vibração		Avaliação da qualidade para Classes diferentes de Máquinas			
Faixa	Velocidade nos limites (mm/s)	Classe I	Classe II	Classe III	Classe IV
0,28	0,28	A	A	A	A
0,45	0,45	A	A	A	A
0,71	0,71	A	A	A	A
1,12	1,12	B	A	A	A
1,8	1,8	B	B	A	A
2,8	2,8	C	B	B	A
4,5	4,5	C	C	B	B
7,1	7,1	D	C	C	B
11,2	11,2	D	D	C	C
18	18	D	D	D	C
28	28	D	D	D	D
45	45	D	D	D	D
71	acima de 45	D	D	D	D

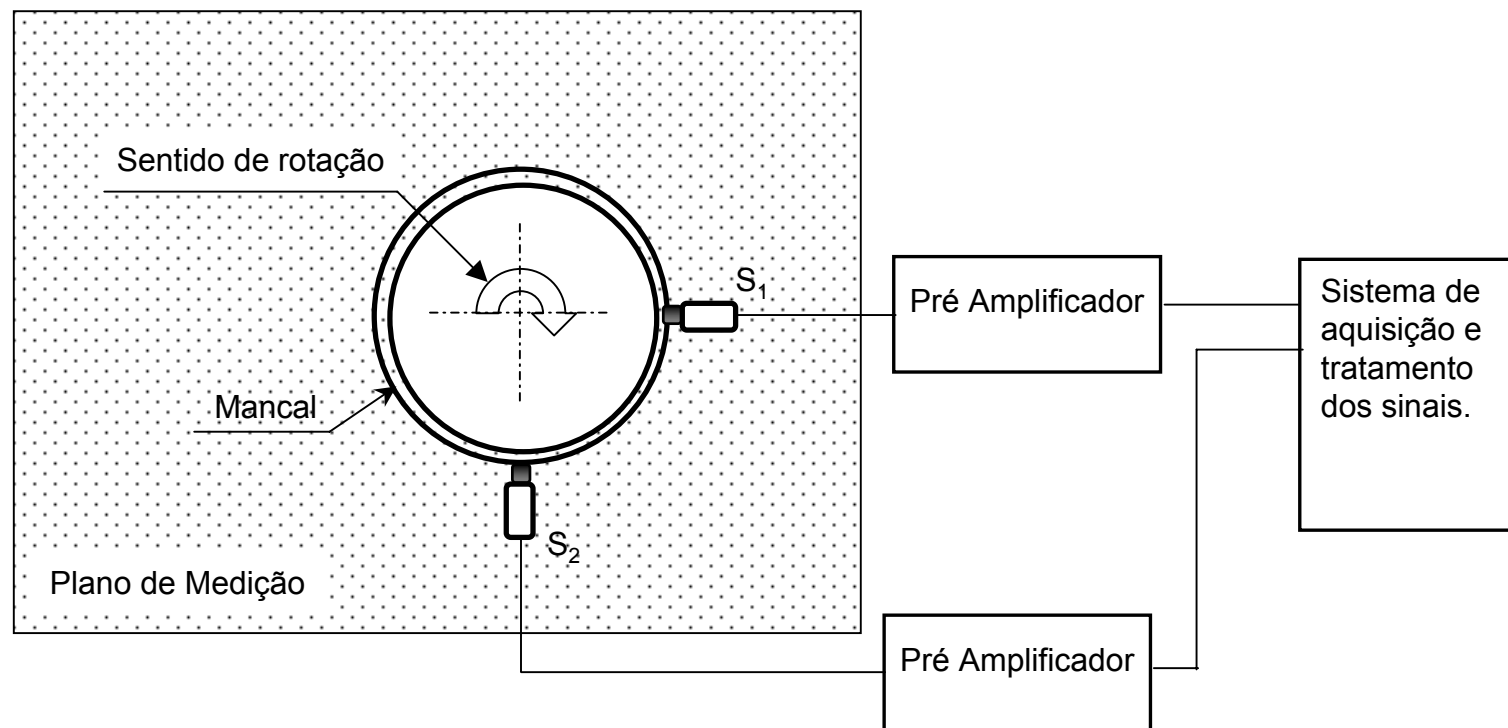
Avaliação da severidade de vibração ISO 7919

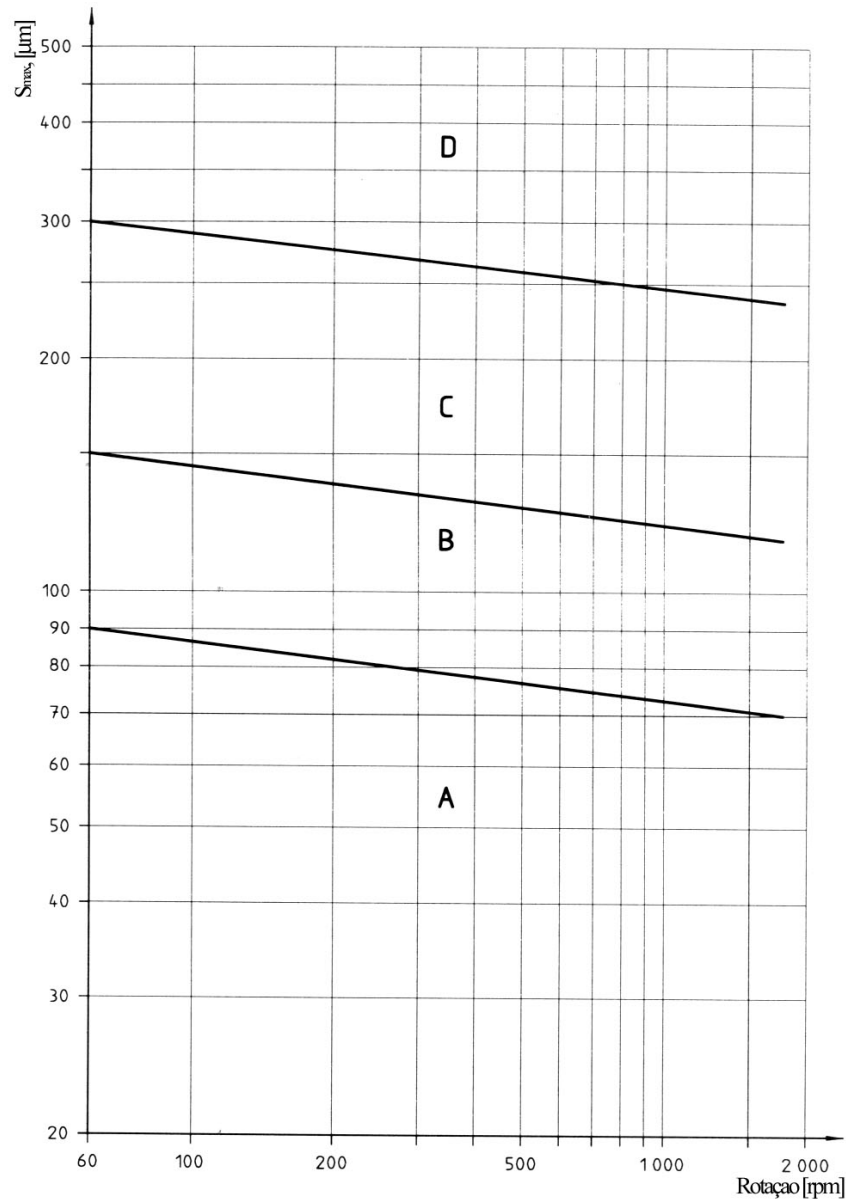
Critério da oscilação relativa do eixo.

- O critério de severidade adotado é o valor de pico da oscilação do eixo medida em relação ao mancal em μm ;
- Deve-se medir a oscilação na direção vertical $x_v(t)$ e horizontal $x_h(t)$ simultaneamente;
- O valor de severidade será calculado por:

$$S = \max \left[\sqrt{[x_v(t)]^2 + [x_h(t)]^2} \right]$$

Esquema de medição para aplicação da ISO 7919





Níveis de severidade ISO 7919

A = Boas condições

B = Aceitável,

C = Limite tolerável,

D = Não permissível.

Caso exemplo 1: Acoplamento por engrenagens



Rotação Turbina: 327,3 rpm

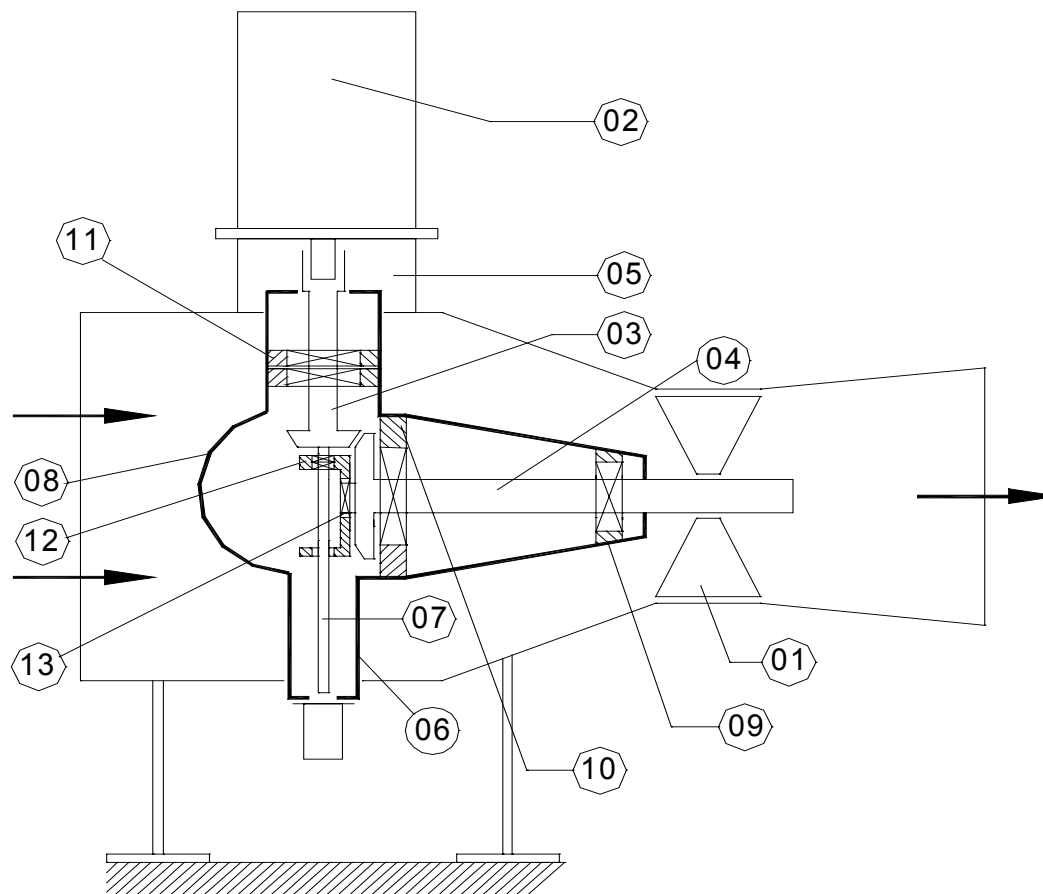
Rotação Gerador: 900 rpm

Potência Nominal 1.230 kW

Mancais de rolamento

PCH de Primavera do Leste. Vista geral da Casa de Máquinas dos grupos geradores com turbinas tubulares e acoplamento turbina – gerador através de par engrenado com engrenagens cônicas helicoidais.

Esquema do grupo gerador tipo tubular



- 1 - Turbina
- 2 - Gerador
- 3 - Eixo do gerador
- 4 - Eixo da turbina
- 5 – Braço vertical
- 6 – Braço inferior
- 7 – Eixo da bomba de óleo
- 8 – Bulbo (Caixa de engrenagens)
- 9 – Mancal guia da turbina
- 10 – Mancal de escora da turbina
- 11 – Mancal combinado do gerador
- 12 – Mancal guia do eixo da bomba
- 13 – Mancal contra escora da turbina

Resultados obtidos

Níveis de Velocidade RMS (mm/s)

Máquina	AT	RT	AG1	RG1	AG2	RG2
1	1,90	0,74	1,10	0,88	1,13	1,70
2	1,69	0,50	0,87	0,77	0,62	1,23
3	3,48	2,01	1,16	2,18	1,84	2,66
4	1,23	0,58	1,30	0,56	1,24	1,54
5	1,43	0,50	1,26	0,70	0,64	1,19
6	1,40	1,92	1,58	1,90	1,15	5,08
7	1,34	0,55	0,84	0,79	0,58	1,35

AT, RT – acelerômetros posicionados no braço vertical, direção Axial e Radial.
AG1, RG1 – acelerômetros posicionados no acoplamento inferior do gerador,
AG2, RG2 – acelerômetros posicionados na tampa do gerador.

Resultados obtidos

Níveis de Velocidade RMS (mm/s)

Máquina	AT	RT	AG1	RG1	AG2	RG2
1	1,90	0,74	1,10	0,88	1,13	1,70
2	1,69	0,50	0,87	0,77	0,62	1,23
3	3,48	2,01	1,16	2,18	1,84	2,66
4	1,23	0,58	1,30	0,56	1,24	1,54
5	1,43	0,50	1,26	0,70	0,64	1,19
6	1,40	1,92	1,58	1,90	1,15	5,08
7	1,34	0,55	0,84	0,79	0,58	1,35

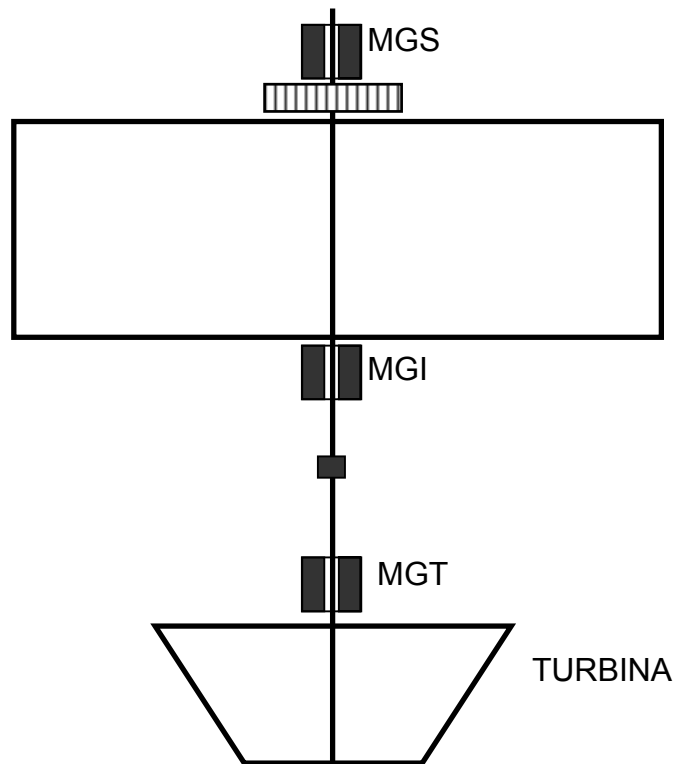
AT, RT – acelerômetros posicionados no braço vertical, direção Axial e Radial.
AG1, RG1 – acelerômetros posicionados no acoplamento inferior do gerador,
AG2, RG2 – acelerômetros posicionados na tampa do gerador.

Diagnóstico

- A máquina 3 apresenta uma discrepância,
- Foi solicitada a verificação

Foi constatado problemas na engrenagem:
um dente partido e desgastes severos no
entorno deste dente.

Caso exemplo 2: Série histórica



Turbina: Francis vertical

Rotação: 400 rpm,

Potência: 10 MVA

Mancais: hidrodinâmicos

Níveis de severidade ISO 7919

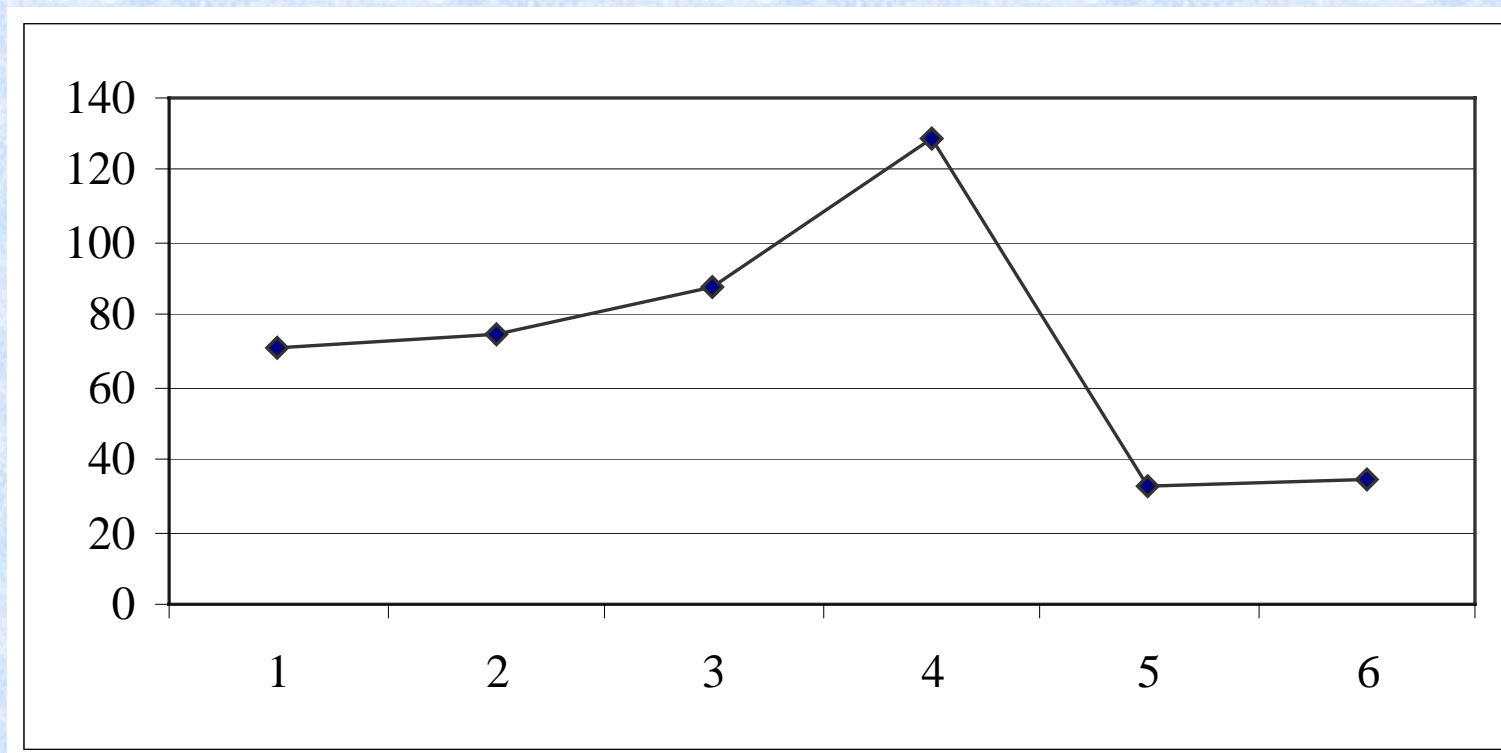
A: até 62 μm

B: de 62 a 110 μm

C: de 110 a 260 μm

D acima de 260 μm

Medição a cada seis meses



Diagnóstico:

A curva de tendência sofreu um incremento abrupto entre a medição 3 e 4. Foi solicitada uma inspeção e se verificou que as presilhas do mancal guia superior haviam se afrouxado, causando a evolução da severidade de vibração de forma mais rápida que o esperado.

Obrigado pela
atenção