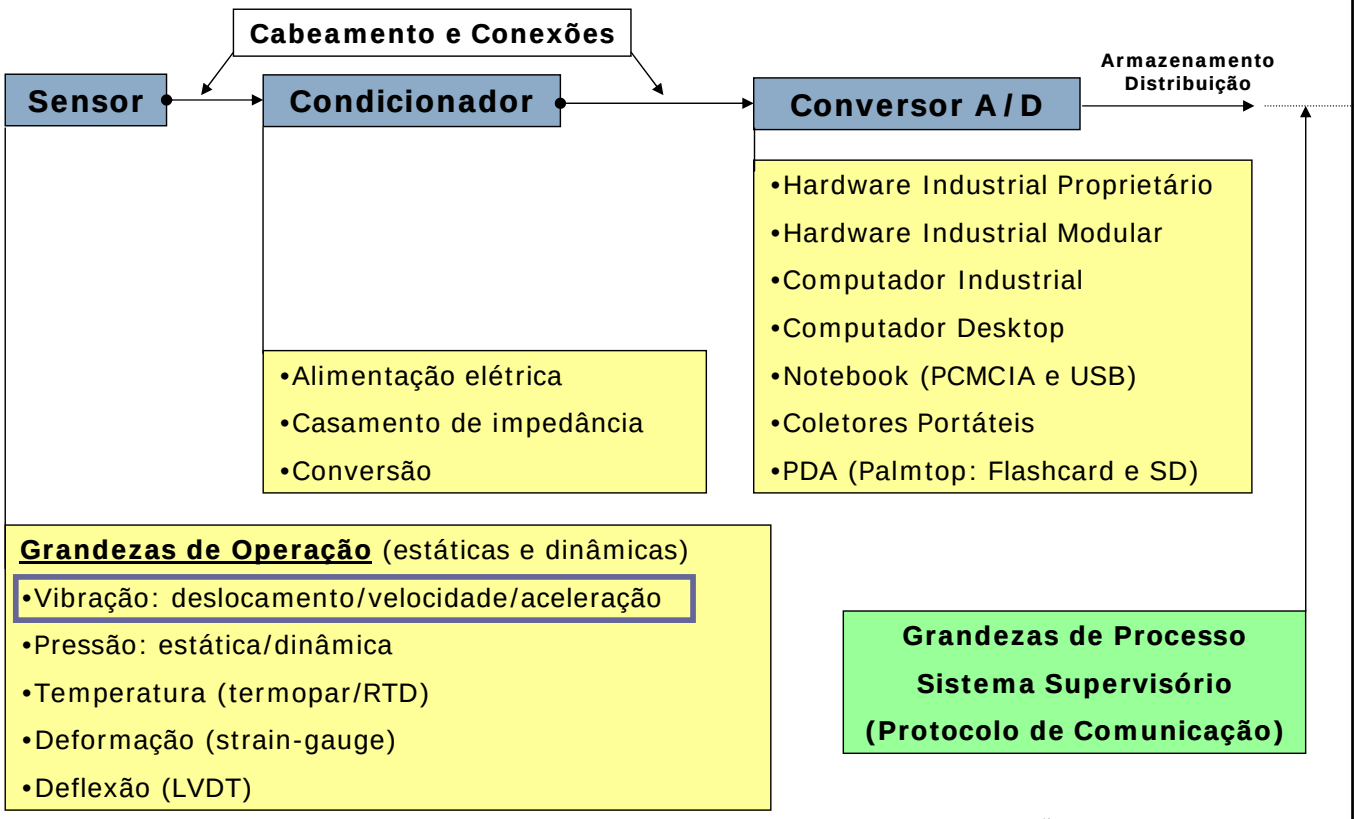


Cap. VII – A Medição e Análise de Vibrações

Aquisição de Sinais
Cadeia de Medição



Vibração

Parâmetro físico mais significativo na indicação do comportamento dinâmico do equipamento.

- Fornece excelente informação para fins de diagnóstico do estado operativo, tanto em termos de qualidade (clareza e simplicidade) quanto de quantidade (intensidade).

Fatores a serem considerados no diagnóstico via medição de vibração

- Impacto econômico (importância da máquina no processo produtivo)
- Tipo de máquina (histórico do comportamento e de falhas)
- Faixa de freqüências de operação
- Localização e direção da vibração
- Tipo da vibração (livre ou forçada)

Mecanismos de Vibração em Máquinas e Estruturas

Mecanismos de Auto-excitação

- Instabilidade de filme de óleo em mancais (oil whirl e oil whip)
- Atrito interno (histerese do material)
- Ressonância estrutural
- Ressonância acústica
- Excitação aerodinâmica
- Excitação hidrodinâmica

Solução: envolve a modificação de características físicas da máquina

Mecanismos de Vibração Forçada

- Desbalanceamento de massa
- Desalinhamento
- Empenamento de eixos
- Imperfeições de engrenamento
- Arrastamento
- Excitações elétricas
- Excitações externas
- Folga em rolamentos

Solução: envolve a remoção ou a redução das fontes de excitação

A Medição de Vibração

Etapas da análise do comportamento vibratório de uma máquina

1– **Medição** dos sinais provenientes da máquina através de transdutores (sensores) que meçam grandezas relacionadas ao seu comportamento vibratório

2– **Processamento** dos sinais coletados através de técnicas apropriadas e de equipamentos dedicados a este fim

3- **Avaliação** da condição de operação da máquina, baseada nos resultados do processamento dos sinais

GRANDEZAS MEDIDAS: **DESLOCAMENTO, VELOCIDADE e ACELERAÇÃO**

Critérios para escolha do sensor apropriado

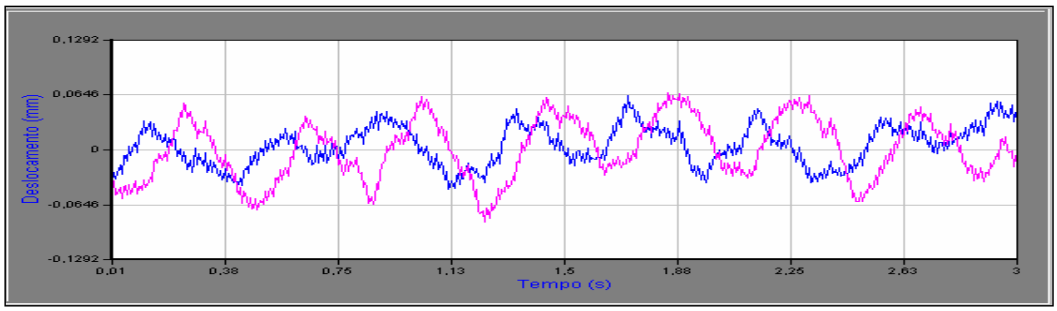
- Tipo de máquina
- Ponto de medição
- Faixa de freqüências de interêsse (função da freqüência básica de rotação/operação)
- Condições de montagem

A Medição de Vibração

Sinais de vibração

Apresentam a informação quantificada em termos de:

- Amplitude (severidade dos eventos)
- Freqüência (taxa de ocorrência dos eventos)
- Fase ou sincronismo (relação de tempo entre eventos)
- Forma (conteúdo freqüencial)
- Posição (apenas no caso de sensores de deslocamento ou proximidade)



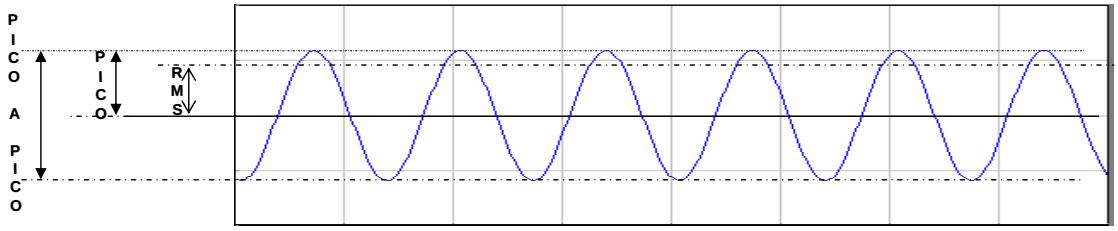
A Medição de Vibração

AMPLITUDE DA VIBRAÇÃO

- VALOR PICO A PICO (p-p) – ex.: medição de deslocamento do eixo versus folga de mancal
- VALOR de PICO (0-p) - ex.: medição de velocidade/aceleração de carcaça

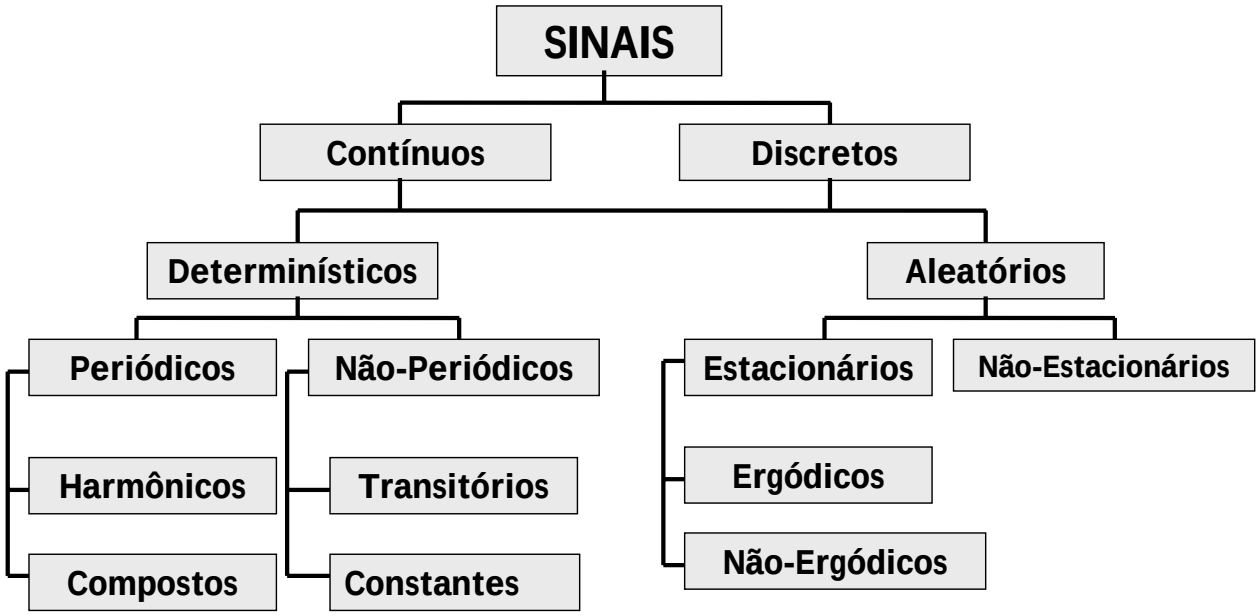
- VALOR MÉDIO QUADRÁTICO: RMS (ROOT MEAN SQUARE).

Valor RMS para um sinal senoidal puro: $\frac{\sqrt{2}}{2}(0-p) = 0,7(0-p)$



SINAIS

CLASSIFICAÇÃO



SINAIS

CLASSIFICAÇÃO

Contínuos: *modelados matematicamente por funções contínuas s(t)*

Discretos: *modelados matematicamente por séries temporais s[k]*

Determinísticos: *previsíveis, podem ser modelados matematicamente*

Aleatórios: *não previsíveis, deve ser dado tratamento estatístico*

Periódicos: *contínuos: $s(t+nT) = s(t)$; discretos: $s(k + nN) = s(k)$*

Harmônicos: $s(t) = a\cos\omega t + b\,\mathrm{sen}\omega t = A\cos(\omega t+\Phi)$

Compostos: $s(t) = a\,\mathrm{sen}\omega t+b\,\mathrm{sen}2\omega t+\ldots+p\,\mathrm{sen}N\omega t$

Transitórios: $s(t) = a\,\mathrm{sen}\omega t+b\,\mathrm{sen}\beta t+\ldots+p\,\mathrm{sen}\psi t$, *com* ψ,β *e* ω *não múltiplos*

SENSORES DE VIBRAÇÃO
CLASSIFICAÇÃO

Grandeza Medida (tipo)	Faixa de Freqüências (sensibilidade)	Aplicações Típicas	Vantagens	Desvantagens
Deslocamento Relativo (proximidade)	0 - 2000Hz (5 V/mm)	Movimento relativo do eixo em mancais de delizamento	-pequeno e leve -calibração simples -deslocamento estático e dinâmico -sem contato -resposta: DC a 2kHz -aplicações múltiplas	-alimentação -medição relativa -sensibilidade ao material do eixo -montagem: cross-talk e dificuldade potencial
Velocidade Absoluta (eletrodinâmico)	20-2000Hz (30 mV/m/s)	Vibração de carcaça de máquinas e de mancais de rolamento	-autogerador -relação sinal/ruído -sensor absoluto -uso fácil	-grande e pesado -faixa limitada de freqüencias -sensível a campo magnético -sensibilidade transversal -pouca robustez
Aceleração Absoluta (piezoelétrico)	2-30000Hz (100 mV/g)	Vibração de carcaça de máquinas e de mancais de rolamento	-pequeno e leve -ampla faixa de freq. -ampla faixa dinâmica -uso fácil -robustez	-alimentação -enfatiza as altas freqüências

A Medição de Vibração
Sensores Relativos

Sensores de Deslocamento:

Tipos:

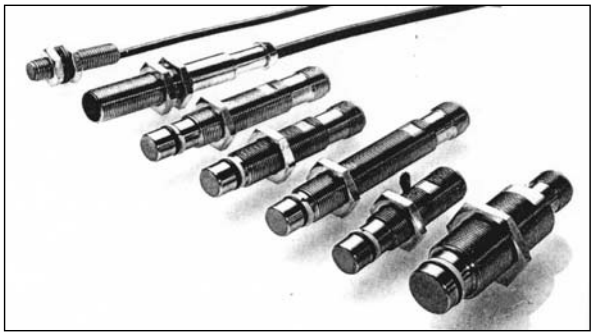
- Eddy current (correntes parasitas)

- Capacitivo

Mais empregado: eddy current

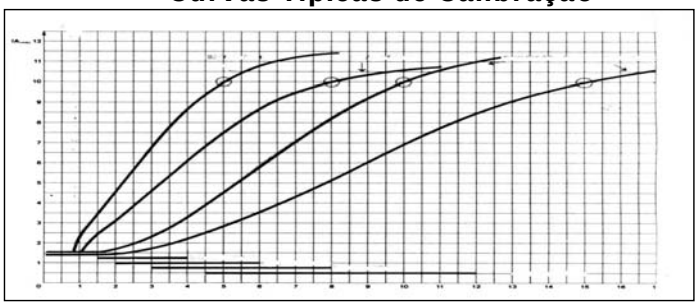
Características:

- **sem contato;**
- **medição relativa;**
- **necessita alimentação elétrica;**



A Medição de Vibração
Sensores de Deslocamento

Curvas Típicas de Calibração



Fatores de influência na medição

- condutividade magnética do material;
- homogeneidade do material;
- temperatura;
- acabamento superficial (subtração do RUNOUT)

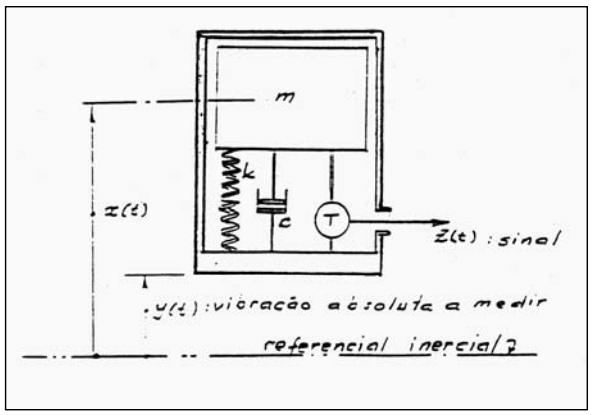
RUNOUT: desvio entre a medição feita por um sensor de deslocamento sem contato com o eixo em baixa rotação, e com este na sua velocidade nominal de rotação, sendo proveniente de:

- irregularidades superficiais;
- falta de homogeneidade do material;
- magnetização residual após inspeção por partículas magnéticas;

Correção: subtração do sinal obtido à baixa rotação

A Medição de Vibração
Sensores Absolutos – Princípio de Funcionamento

Sensores de Velocidade e Aceleração



$$m\ddot{x} + c(\dot{x} - \dot{y}) + k(x - y) = 0$$

$$m\ddot{z} + c\dot{z} + kz = -m\ddot{y}$$

$$y(t) = Ye^{i\omega t}$$
$$\dot{y}(t) = iY\omega e^{i\omega t}$$
$$\ddot{y}(t) = -Y\omega^2 e^{i\omega t}$$

$$m\ddot{z} + c\dot{z} + kz = Ym\omega^2 e^{i\omega t}$$

$$x(t) = y(t) + z(t)$$

$$z(t) = Ze^{i(\omega t - \phi)} = Ze^{i\omega t}e^{-i\phi}$$

A Medição de Vibração
Sensores Absolutos – Princípio de Funcionamento

Sensores de Velocidade e Aceleração

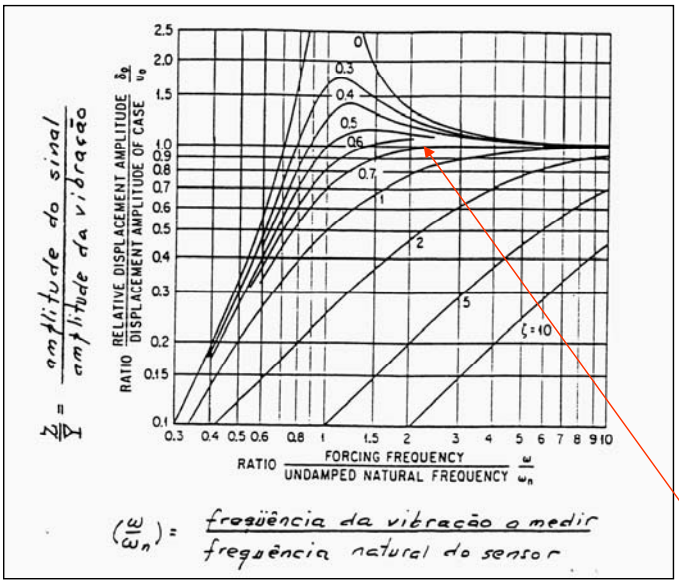
$$Z = Y\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2 \left|H(\omega)\right|$$

$$\left|H(\omega)\right| = \frac{1}{\left[\left(1-r^2\right)^2 + \left(2\zeta r\right)^2\right]^{1/2}} \qquad \phi = tg^{-1}\frac{2\zeta r}{1-r^2} \qquad r = \frac{\omega}{\omega_n}$$

$$z(t) = Y\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2 \left|H(\omega)\right| e^{i(\omega t-\phi)}$$

A Medição de Vibração
Sensores Absolutos – Princípio de Funcionamento

Caso 1: Sensores com freqüência natural baixa em relação à freqüência da vibração medida (sensores de velocidade ou vibrômetros)



$$\frac{\omega}{\omega_n} >> 1$$

$$Z = Y\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2 |H(\omega)| \Rightarrow Z \simeq Y \therefore z(t) \simeq y(t) \Rightarrow \dot{z}(t) \simeq \dot{y}(t)$$

- Acima da freq. natural do sensor, sua massa tende a ficar parada em relação à carcaça
- A velocidade em que a massa (imã) se move em relação à bobina é proporcional à tensão elétrica gerada de saída

$$Z \Rightarrow Y$$

$$\zeta = 0,7 = \frac{\sqrt{2}}{2}$$

A Medição de Vibração
Sensores Absolutos - Vibrômetro

Construção: bobina enrolada no interior do corpo do sensor, envolvendo um imã permanente suspenso por mola, imerso em fluido amortecedor.

Limitações:

-Limite de baixa freqüência devido à ressonância interna do sensor;

-Limite de alta freqüência devido à fadiga das molas de suspensão da massa sísmica interna ao sensor (tipicamente 1kHz);

Características:

-Autogerador

-Fácil montagem

-Baixa impedância de saída

-Má sensibilidade direcional

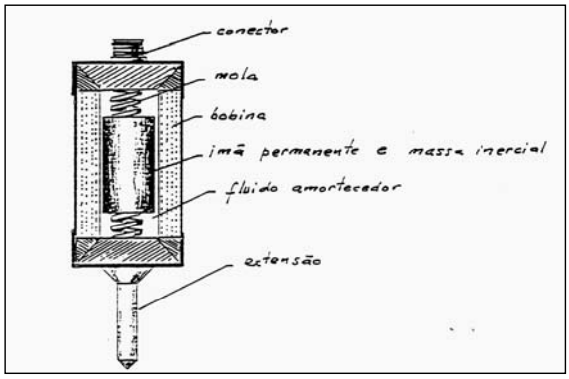
-Desgaste (fadiga)

-F_{max} limitada

-Dimensão grande

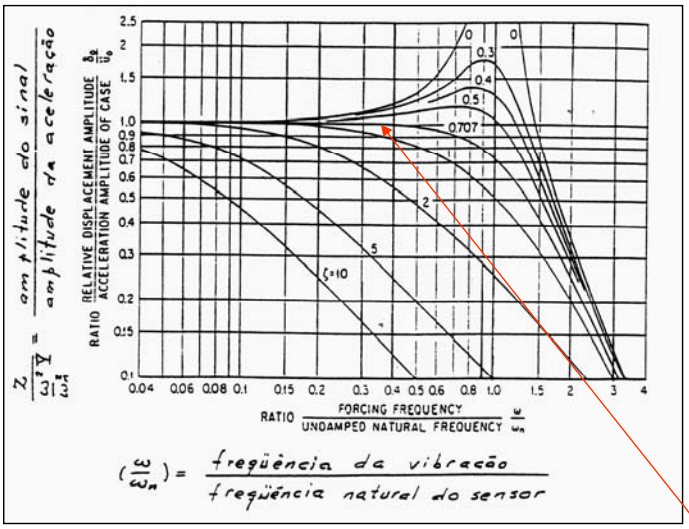
-F_{min} alta, pois opera acima da ressonância

-Temperatura de trabalho limitada (fluido amortecedor)



A Medição de Vibração
Sensores Absolutos – Princípio de Funcionamento

Caso 2: Sensores com freqüência natural alta em relação à freqüência da vibração medida (acelerômetros)



$$\frac{\omega}{\omega_n} << 1$$

$$Z = Y\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2 |H(\omega)| \Rightarrow Z \simeq Y\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2 \simeq Y\omega^2 \frac{1}{\omega_n^2}$$

Fator de Sensibilidade

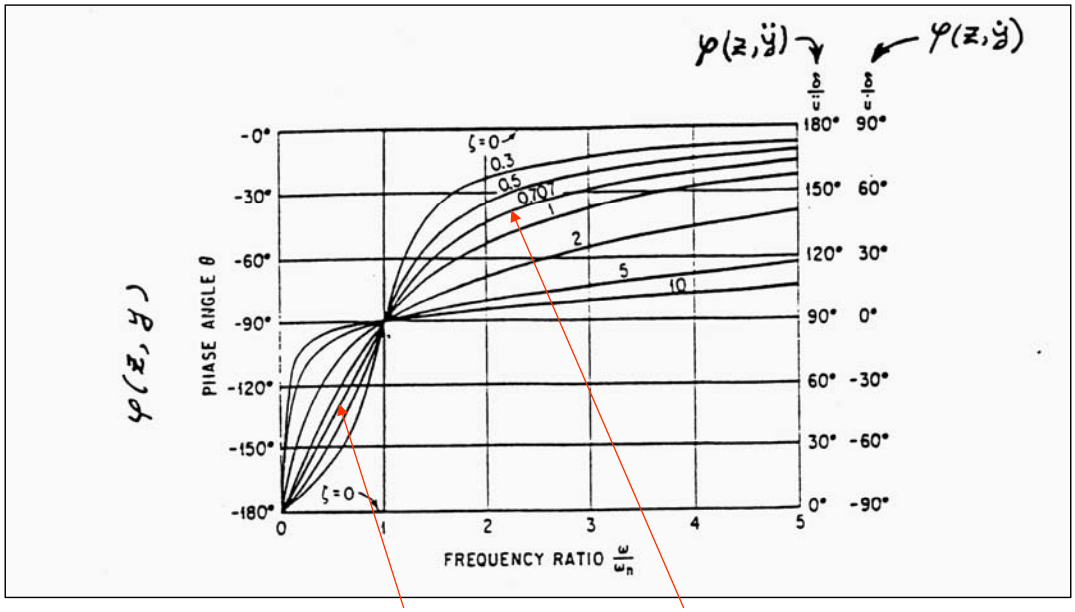
$$\frac{Z}{Y\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2} \Rightarrow 1$$

$$\zeta = 0,7 = \frac{\sqrt{2}}{2}$$

"A aceleração da massa sobre os cristais piezoelétricos é proporcional à força sobre estes, e portanto, à deformação dos mesmos e à carga elétrica gerada."

A Medição de Vibração
Sensores Absolutos – Princípio de Funcionamento

Relações de fase:



Acelerômetro **Vibrômetro**

A Medição de Vibração
Sensores Absolutos - Acelerômetro

Construção: a massa sísmica do sensor se encontra fixada contra elementos sensores de material piezoelétrico (quartzo), que ao serem tensionados, por tração/compressão ou cisalhamento, pelo movimento da massa, geram carga e o conseqüente potencial elétrico.

Características:

-Tipos: de carga (alta impedância) e ICP (baixa impedância)

-Montagem: parafuso, imã, cola, haste e cera

-Sensibilidade transversal baixa

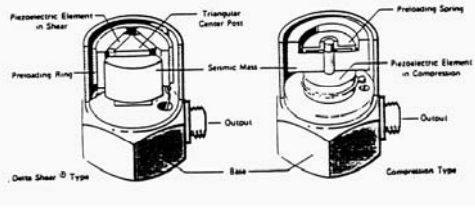
-Cuidados na montagem: cabo, rigidez da fixação, caminho de propagação e laços de terra

-F_{max} = 0,3 da f_n (dependendo do critério)

-F_{min} = 1Hz (podendo chegar a DC)

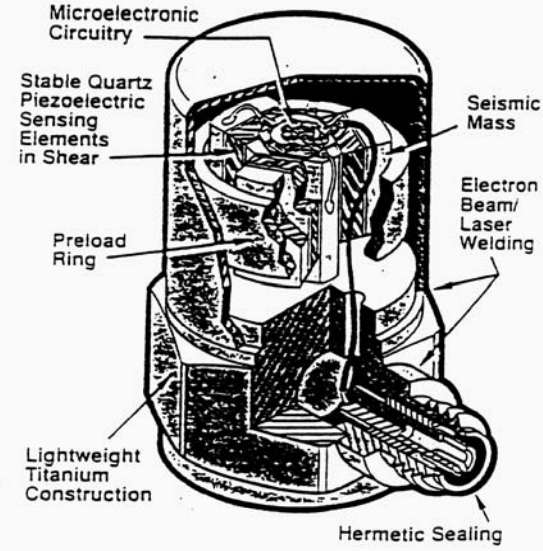
-Temperatura de trabalho alta

-Robustez e estabilidade elevadas



Tipo cisalhamento **Tipo compressão**

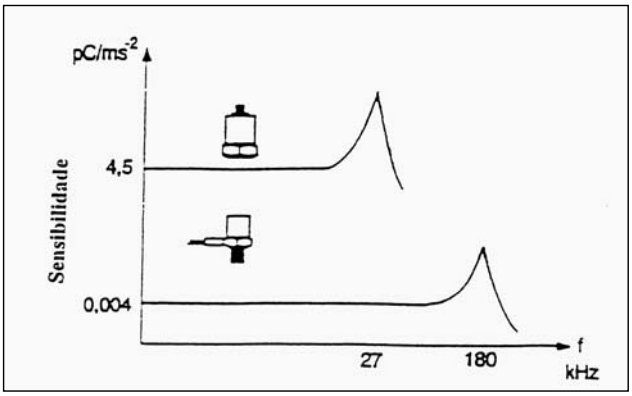
A Medição de Vibração
Sensores Absolutos - Acelerômetro

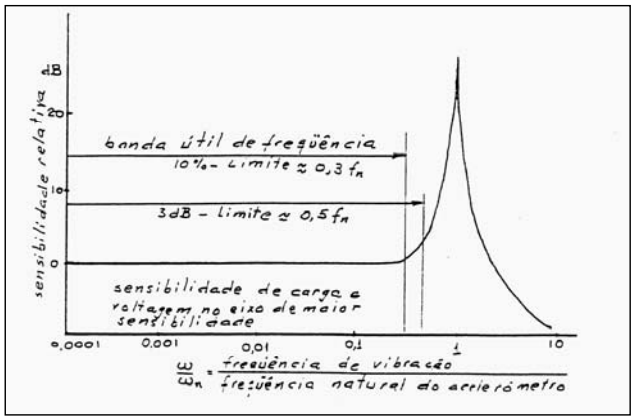


TYPICAL QUARTZ-SHEAR ICP® ACCELEROMETER

Tipo cisalhamento ICP

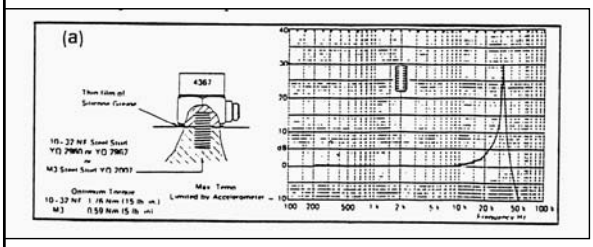
A Medição de Vibração
Sensores Absolutos - Acelerômetro

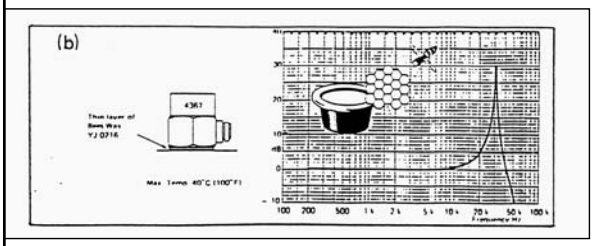


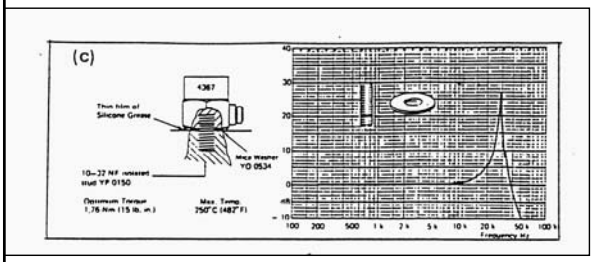


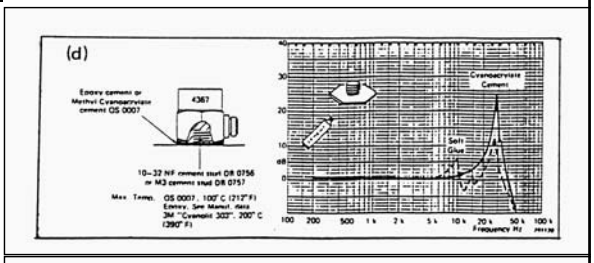
A Medição de Vibração
Sensores Absolutos - Acelerômetro

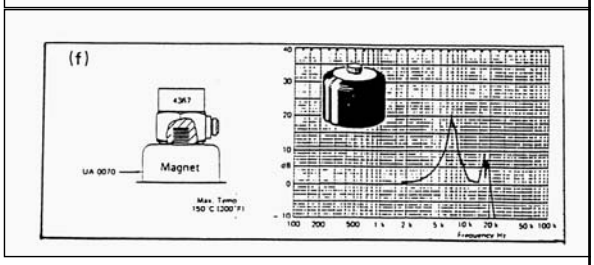
Montagem

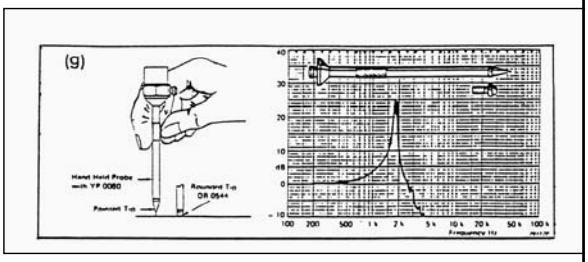




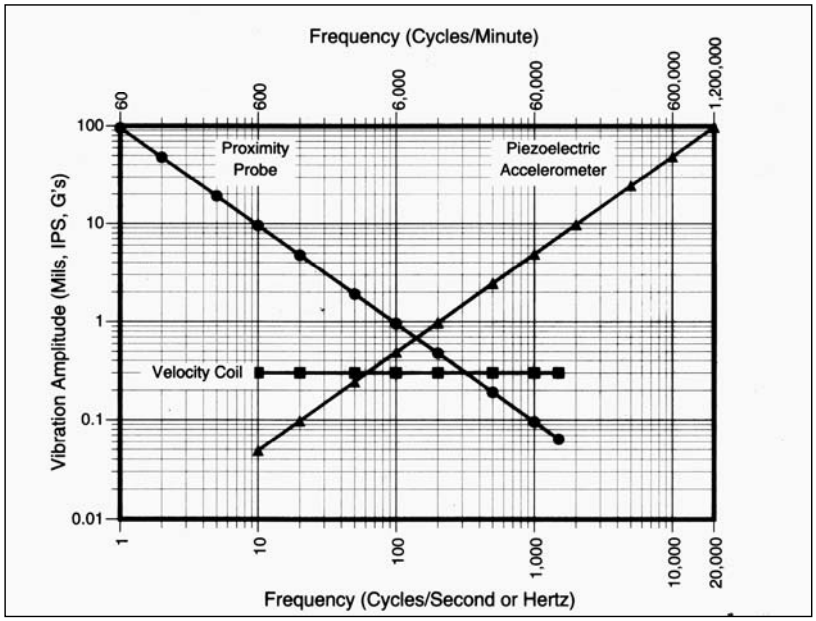








A Medição de Vibração
Sensores - Aplicação



A Medição de Vibração
Sensores - Resumo

	Proximidade	*Eletrodinâmico*	*Acelerômetro-piezoelétrico.*
Aplicação típica	• Deslocamento relativo de árvore em mancais de deslizamento de máquinas rotativas de baixa e alta velocidade. • Sensor de deslocamento detecta posição da árvore e rotação	• Velocidade absoluta de vibração de carcaça de mancal em máquinas rotativas de velocidade média e baixa • Deslocamento absoluto por integração do sinal	• Aceleração absoluta de vibração de carcaça de mancal de rolamento de máquina rotativa. • Velocidade e deslocamento absoluto de vibração por integração do sinal.
Maquinaria	• Máquinas de grande e pequeno porte em mancais de deslizamento	• Máquinas de médio porte	• Máquinas com mancais de rolamento
Características típicas	• Faixa linear: 2mm • Sensibilidade: 5V/mm • Banda de freqüência:0Hz a 5kHz	• Faixa dinâmica 2,5mm pc-pc • Sensibilidade 4mV/m/s • Banda de freqüência: 13z a 1kIIz ±10%	• Faixa dinâmica:50g pc • Sensibilidade: 100mV/g • Banda de freqüência: 1Hz a 10kHz, ±3dB
Vantagens	• Pequeno e leve • Calibração simples • Deslocamento estático e dinâmico • Sem contato • Vida longa	• Autogerador • Mede velocidade • Boa relação sinal/ruído • Sensor absoluto • Robusto • Uso fácil	• Pequeno • Leve • Banda de freqüência ampla • Faixa dinâmica ampla • Uso fácil • Robusto, Vida longa
Desvantagens	• Fonte de alimentação • Sensor relativo • Sensível a heterogeneidade do material da árvore • Montagem fixa	• Grande e pesado • Tempert. Ambiente < 100^{0}C • Banda de freqüência limitada • Sensível a campo magnético • Sensibilidade transversal	• ICP requer fonte de alimentação • Temperat. <120^{0}C • Sensível a campo eletrostático • Enfatiza altas freqüências em detrimento das baixas freqüências
Precauções	• Se o material da árvore não é homogêneo ou contém magnetismo residual na seção de medição, aparece ruído no sinal do sensor (runout instrumental) • Sensibilidade varia com o material da peça medida • ruído de batimento para sensores próximos	• Características precárias de fase nas baixas freqüências prejudicam análise vetorial • Locais de instalação restritos • Sensor inadequado para análise multicomponente devido à sua banda de freqüência limitada	• Deslocamento por dupla integração não confiável em baixa freqüência • As características em alta freqüência pioram quando o sensor é instalado com imã ou adesivo, o sensor deveria ser instalado firmemente com estojo roscado

Análise de Sinais de Vibração

Tratamento de Sinais Dinâmicos - Domínios de Análise

1- Tempo
•Níveis globais - valores médio, RMS, min. e max.
•Forma de onda – análise qualitativa
•Auto-correlação e Correlação Cruzada – interdependência do sinal temporal
•Órbita (deslocamento simultâneo em duas direções no plano)

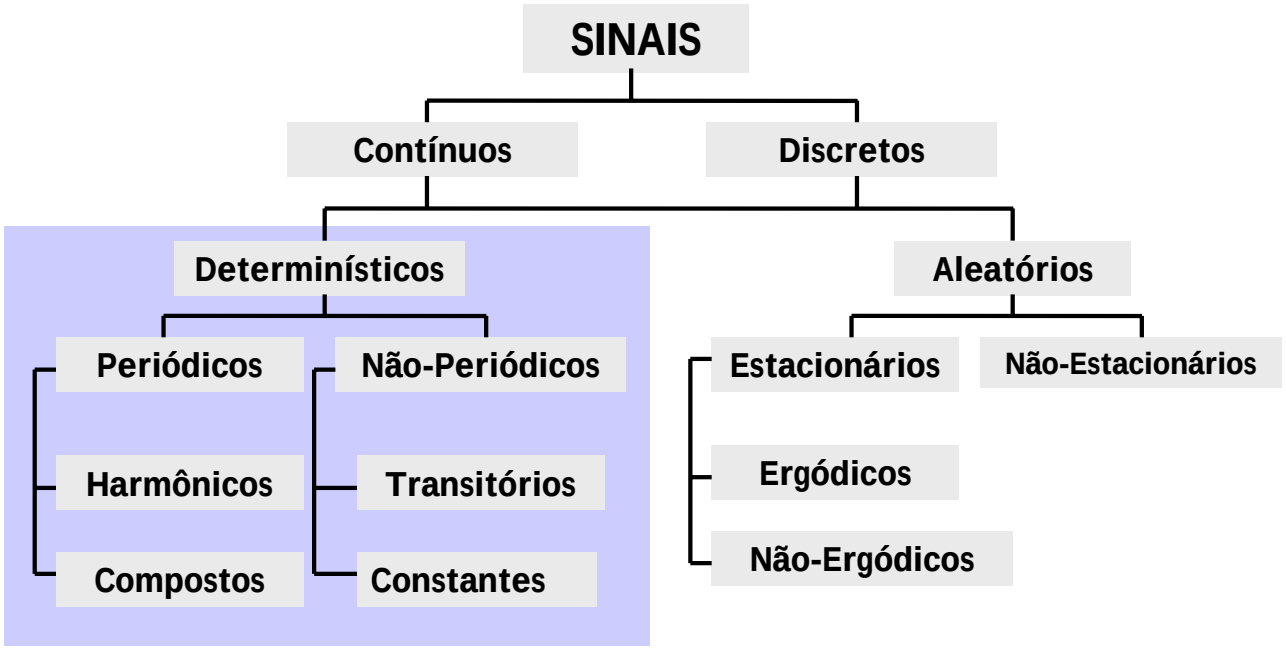
2- Freqüência
•Espectro de freqüência (FFT): amplitude, fase e potência
•Média espectral
•Técnicas não convencionais: Espectro completo (“Full Spectrum”) e Holospectro
•Função de Resposta em Freqüência – Transformada de Laplace

3- Amplitude (Estatística) – Aleatórios
•Médias de conjunto e temporais: valor médio, médio quadrático, RMS, variância e correlação
•Densidade de probabilidade
•Medidas de tendência central – valor médio, médio quadrático e RMS
•Medidas de dispersão – variância, desvio-padrão, skewness e kurtosis
•Auto-correlação e correlação cruzada (domínio do tempo)
•Densidade Espectral de Potência (domínio da freqüência)

4- Tempo-Freqüência
•Wavelet

SINAIS

CLASSIFICAÇÃO



SÉRIE DE FOURIER

Aplicação: *Expansão ou representação de funções periódicas como combinação de funções harmônicas (seno e coseno).*

Função Periódica: *função cujo valor se repete segundo um intervalo dado do domínio, chamado de período (T).*

Obedecem a relação:

$x(t) = x(t + nT),\ n = 0, \pm 1, \pm 2, \ldots$

SÉRIE DE FOURIER

Funções ou Sinais Pares: x(-t) = x(t)

Funções ou Sinais Impares: x(-t) = -x(t)

Funções Ortogonais:

Dado o conjunto de funções $\psi_i(x), i = 1, 2, ...n$ *definido em* $0 \le x \le 2\pi$, *com*:

$$\int_0^{2\pi} \psi_r(x)\psi_s(x)dx = 0, \text{ para } r \neq s$$

$$\int_0^{2\pi} \psi_r(x)\psi_s(x)dx \neq 0, \text{ para } r = s$$

$$\int_0^{2\pi} \psi_r(x)\psi_s(x)dx = 1, \text{ para } r = s, \text{ o conjunto é chamado de ortonormal}$$

As funções senrx e cosrx formam um conjunto de funções ortogonais.

SÉRIE DE FOURIER

Funções Periódicas:

Assim, uma função periódica contínua em $0 \leq x \leq 2\pi$ pode ser representada pela série:

$$f(x) = \sum_{r=1}^{n} (a_r \cos rx + b_r \sin rx)$$

$$a_r = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(x) \cos rx dx$$

$$b_r = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(x) \sin rx dx$$

SÉRIE DE FOURIER

Forma Complexa:

$$Ortogonalidade:$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} e^{irx} \cdot e^{-irx} dx = 0, \; para \; r \neq s$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} e^{irx} \cdot e^{-irx} dx = 2\pi, \; para \; r = s$$

$$Série:$$

$$f(x) = \sum_{r=1}^{n} C_r e^{irx}$$

$$C_r = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(x) e^{-irx} dx$$

SÉRIE DE FOURIER

Funções Periódicas Temporais:

Uma função periódica temporal contínua em $0 \le t \le T$ *pode ser representada pela série:*

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{r=1}^{\infty} (a_r \cos r\omega t + b_r \sin r\omega t)$$

$$a_r = \frac{2}{T}\int_0^T f(t)\cos r\omega t dt$$

$$b_r = \frac{2}{T}\int_0^T f(t) sen r\omega t dt$$

SÉRIE DE FOURIER

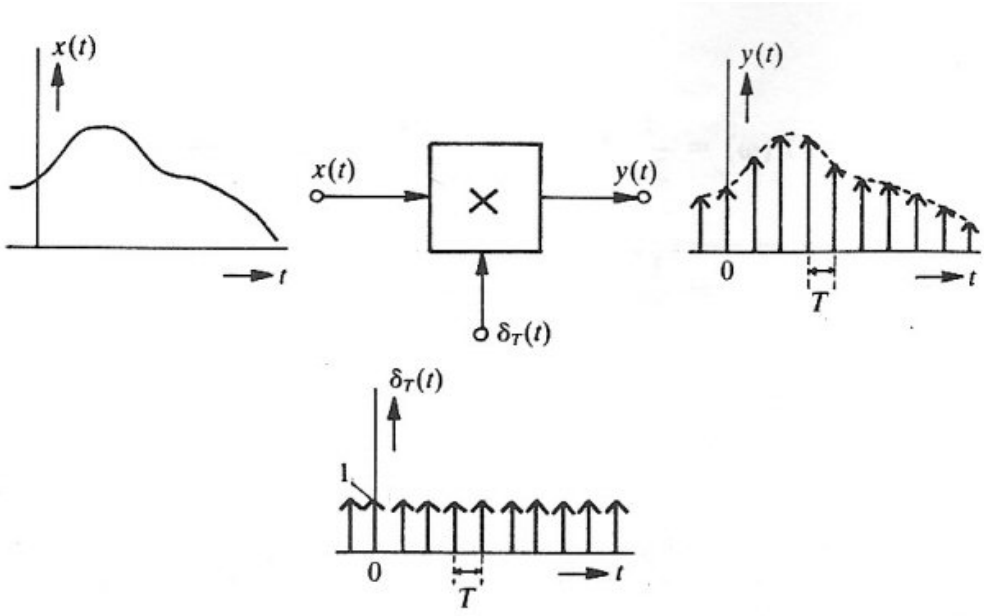
Forma Complexa:

$$f(t) = \sum_{r=-\infty}^{\infty} C_r e^{ir\omega t}$$

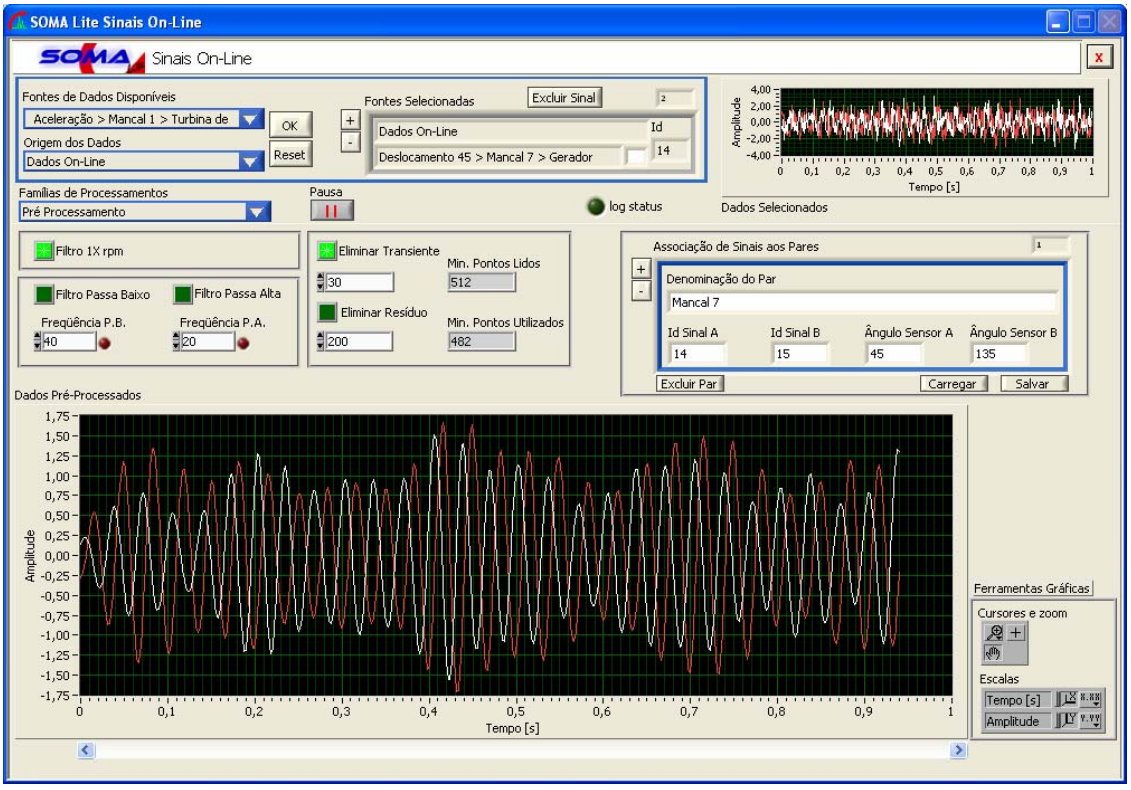
$$C_r = \frac{1}{T}\int_0^T f(t) e^{-ir\omega t} dt$$

SINAIS

AMOSTRAGEM



Análise de Sinais de Vibração
Domínio do Tempo



Análise de Sinais de Vibração
Domínio da Freqüência

