



Vibrações Mecânicas

Prof. Luiz Eduardo Miranda J. Rodrigues



Aula - 16

Análise de Vibrações em Máquinas Industriais



Conteúdos Abordados Nessa Aula

Aula 16

-  Análise de Vibrações em Máquinas Industriais;
-  Método Pico, Pico a Pico, RMS;
-  Método Curtose e Skewness;
-  Método de Análise Espectral.



- ✈ A análise de vibração em máquinas industriais é uma técnica constantemente utilizada para monitorar e diagnosticar o comportamento dos ativos durante a operação e avaliar seu estado de funcionamento.
- ✈ Desse modo, essa análise se dá a partir da detecção e medição das variações de vibrações. Inclusive, indica-se para vários equipamentos como motores, bombas, roletes, turbinas, entre outros.
- ✈ Através da análise de vibração, é possível identificar falhas em estágios iniciais, ou seja, ainda em fase de falha potencial e a ação imediata evitará uma falha funcional do ativo.
- ✈ Dessa forma, isso torna a ação para medidas corretivas mais rápida e menos impactante no dia a dia do chão de fábrica, além de reduzir a chance de falhas graves e otimizar os intervalos de manutenção.



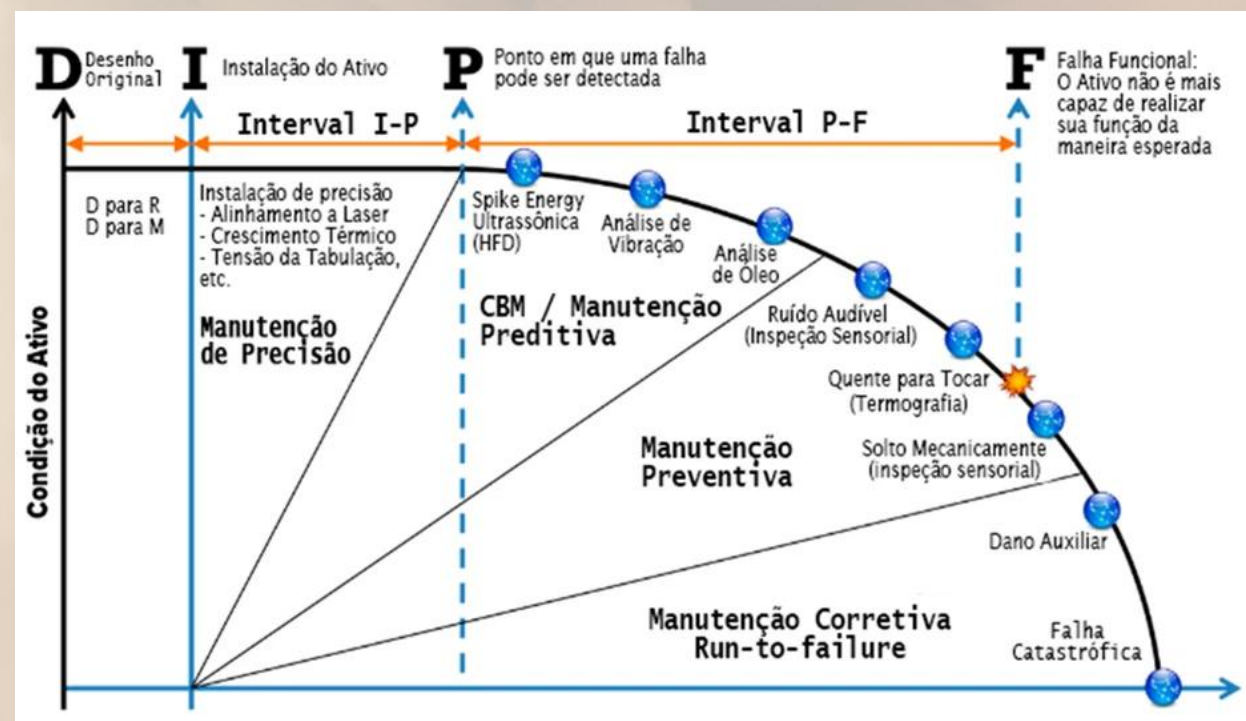
- ☉ Todas essas ações estão diretamente relacionadas a redução dos custos de manutenção, aumento da confiabilidade e vida útil dos ativos, ou seja, impactam diretamente no faturamento da empresa e na segurança dos colaboradores.
- ☉ Ao utilizarmos Análise de vibração como técnica de Manutenção Preditiva, podemos de maneira assertiva aplicar a estratégia conhecida como CBM que é a Manutenção baseada em condição, ou seja, a análise de vibração nos dará parâmetros para avaliar se precisamos fazer uma intervenção ou não do ativo baseado na condição apresentada.
- ☉ Esse fator está diretamente relacionado por exemplo, ao controle de custos operacionais para manutenção.



Curva DIPF

Aula 16

- ✈ A análise de vibração é uma das técnicas mais difundidas e eficazes na detecção de falhas potenciais em ativos rotativos.
- ✈ Ela faz parte da manutenção preditiva, como pode ser visto na conhecida curva DIPF. A curva apresenta as diferentes fases que um ativo percorre, desde seu design até o fim da vida útil.
- ✈ A DIPF é uma generalização da curva PF, a qual considera também a fase projeto e comissionamento do equipamento.



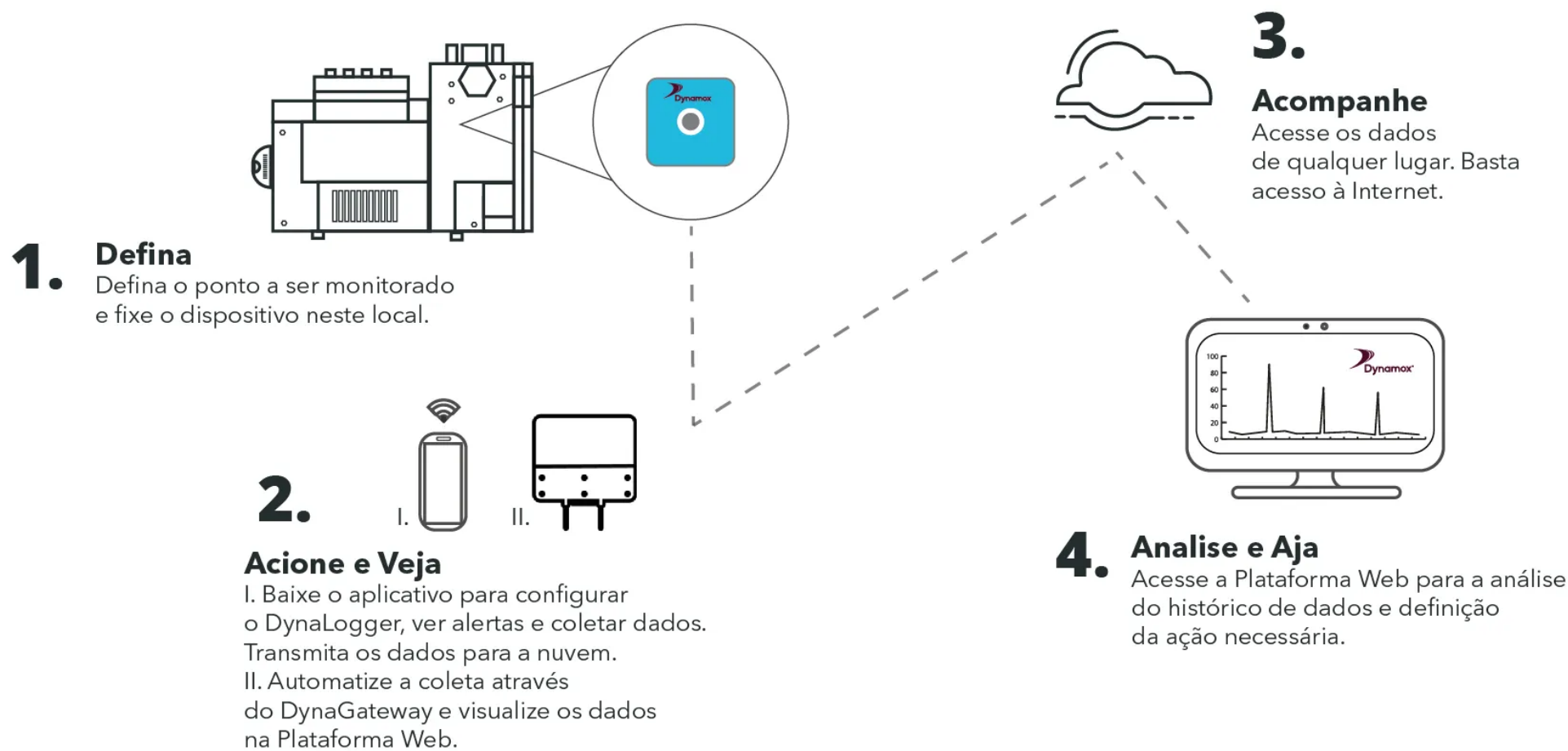


- ✈ O primeiro passo para realizar a análise de vibração está em coletar os dados vibracionais dos ativos.
- ✈ Por isso, hoje, podemos utilizar a tecnologia a nosso favor. A coleta realizada com sensores triaxiais, por exemplo, é a maneira mais segura e confiável para a coleta assertiva.
- ✈ Colocados em pontos estratégicos das máquinas, os sensores realizam a coleta de dados tanto de forma manual como automática, conseguindo, através da vibração, identificar tendências.
- ✈ Após a coleta, esses dados são transformados em frequência, sendo possível identificá-los através da análise espectral. Essa análise atua na identificação de diferentes frequências presentes na vibração. Determinando, assim, se há picos ou parâmetros anormais, que seriam Indícios de falhas potenciais.
- ✈ Com base nessas coletas e análises comparam-se estas com os critérios básicos de aceitação da máquina. Assim, possibilitando a realização de um diagnóstico completo sobre sua condição.



Modelo Idealizado de Análise de Vibrações

Aula 16





Detecção Precoce de Falhas

Aula 16

- ✈ A análise de vibração é uma técnica fundamental da manutenção preditiva.
- ✈ É através do monitoramento regular das vibrações de máquinas industriais, que é possível identificar padrões e tendências que indicam mudanças significativas como desgaste, desalinhamento e desbalanceamento, responsáveis pela ocorrência de falhas.
- ✈ É com base nessas informações do monitoramento que as equipes podem realizar manutenções de maneira planejada, evitando paradas e falhas inesperadas



- ✈ Manter a confiabilidade dos equipamentos é um benefício importante para o setor de manutenção.
- ✈ Isso porque, consiste na premissa de que, em um período determinado de tempo e dentro de condições pré-estabelecidas o equipamento realizará a programação esperada, sem falhas.
- ✈ A confiabilidade dos equipamentos possui impacto direto também na saúde da planta, já que ela varia de acordo com as intercorrências que acontecem ou não, na manutenção.



Maior Eficiência na Rotina Operacional

Aula 16

- ✈ Um dos principais ganhos da análise de vibração, está na capacidade de proporcionar uma ação rápida para resolução de problemas. Isso gera oportunidade para a equipe de manutenção trabalhar de maneira proativa, evitando problemas maiores que possam comprometer na segurança ou nos custos da operação.
- ✈ Hoje existem ferramentas, que conseguem agregar dados das rotas de inspeção e da análise preditiva para gerar dashboards que ajudam a ter uma visualização completa dos fluxos.
- ✈ Deixando claro quais são os pontos em que a equipe precisa agir e os impactos no processo como um todo.

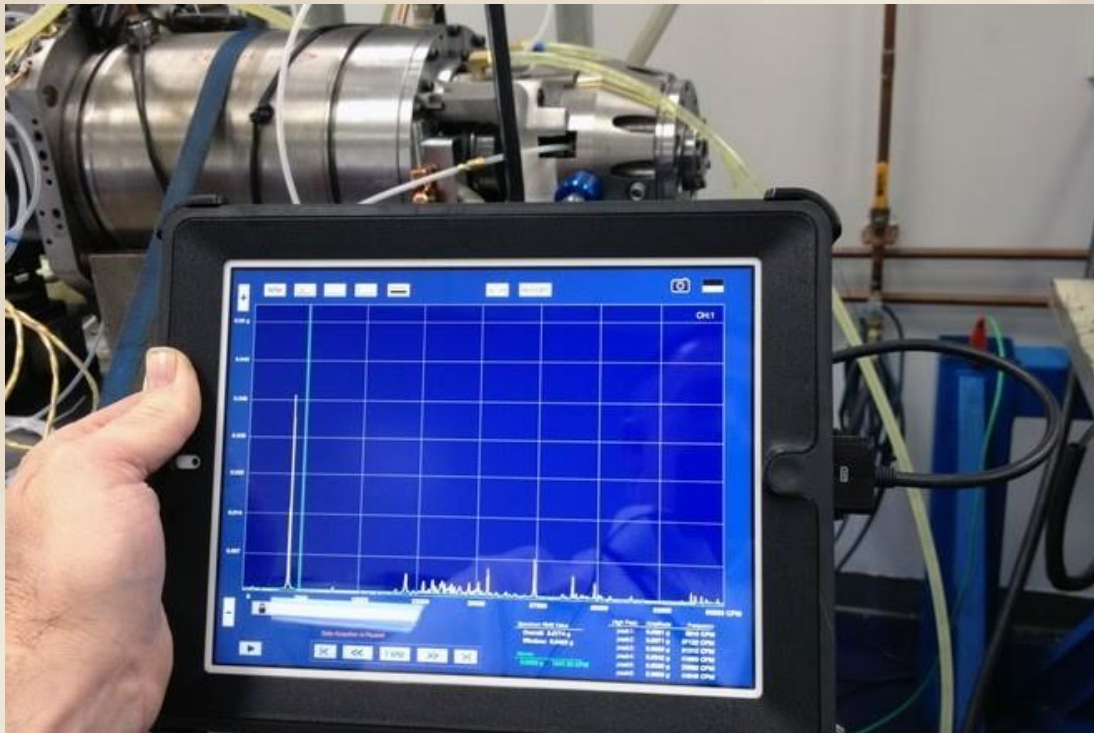


- ✈ A gestão dos custos de manutenção industrial são fatores determinantes para manter o equilíbrio financeiro das empresas. Isso porque, quando este processo se torna pouco eficiente, criam-se gastos desnecessários capazes de prejudicar o orçamento e dificultar a criação de novos projetos.
- ✈ Neste contexto, a análise de vibração se torna aliada. Isso porque é através da detecção precoce de falhas que se pode realizar a manutenção de forma programada.
- ✈ Evitando, assim, reparos de emergência e permitindo que a substituição de peças ou máquinas ocorram apenas quando necessário permitindo o uso da estratégia de manutenção baseada em condição (CBM).
- ✈ Estima-se que o custo em manutenção possui impacto importante de faturamento na Indústria. Isto representa a economia de um valor relevante mediante ações preventivas.



Exemplos de Análise de Vibrações

Aula 16

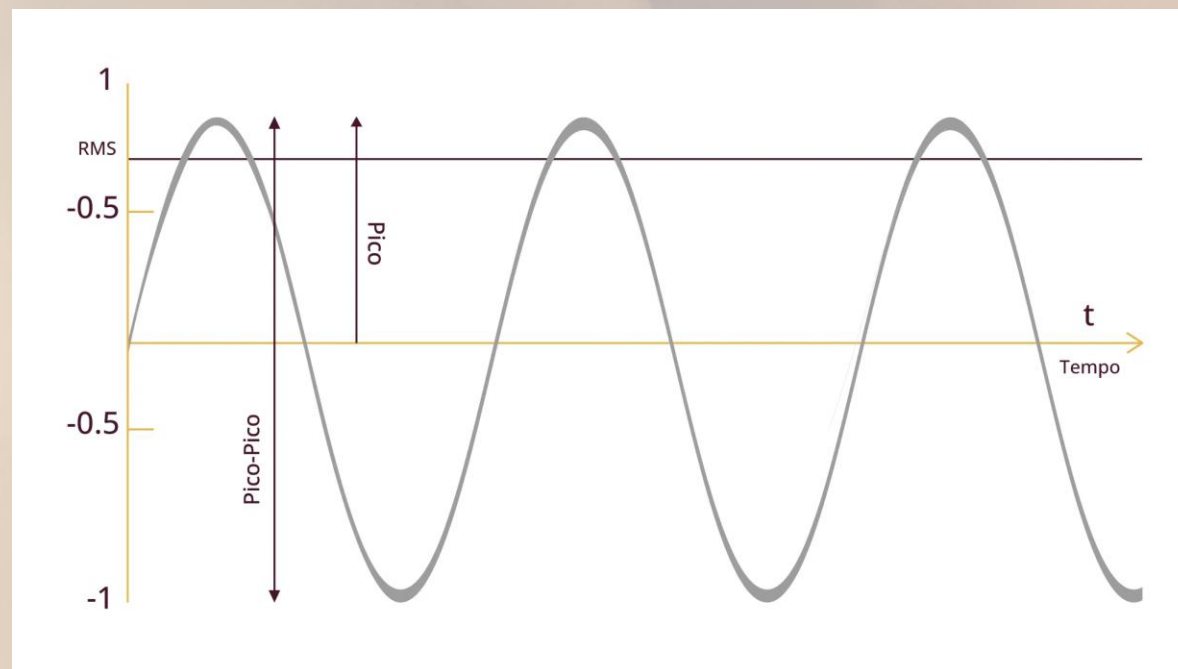




Métrica de Análise – Pico, Pico a Pico, RMS

Aula 16

- Na análise de vibração, interpretar corretamente os sinais de um ativo como Pico, Pico a Pico e RMS, sendo capaz de agir sobre eles é crucial para o sucesso da manutenção preditiva.
- Em geral, a interpretação envolve a análise de sinais de vibração no domínio do tempo, ou seja, plotadas em um eixo t .
- Dessa forma, é possível analisar mudanças ou padrões de vibração por meio de parâmetros distintos.





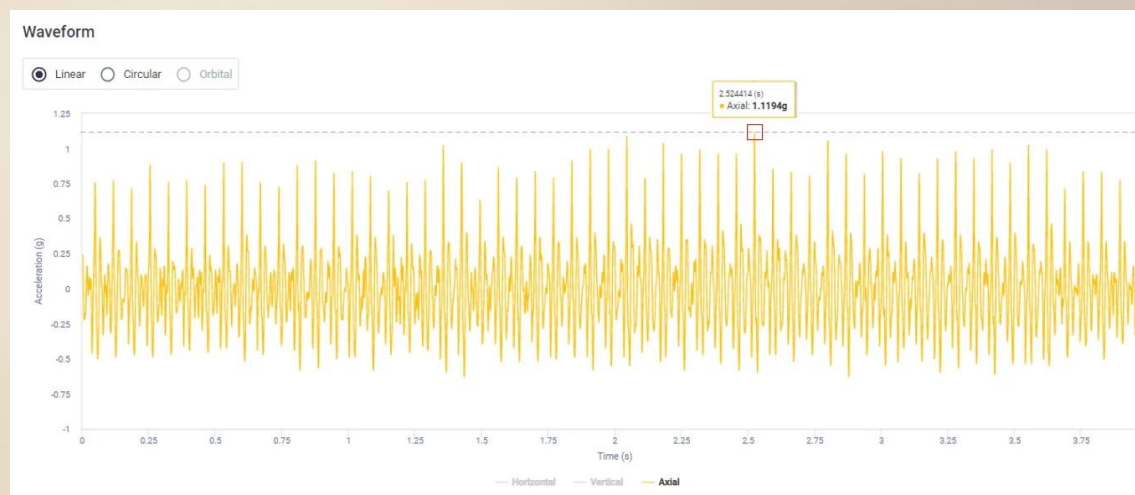
- ✈ Este é o valor da maior amplitude presente no sinal, também chamado de valor verdadeiro de pico (“True peak value”) em muitas plataformas.
- ✈ Seu aumento pode indicar o surgimento de impactos no sinal.
- ✈ O valor de pico representa algo pontual e não leva em conta a energia total do sinal, ou seja, qualquer flutuação ou vibração transiente de maior valor pode influenciar nessa métrica.



Valor de Pico

Aula 16

- Consideremos como exemplo, o mancal de um tambor de descarga de uma correia transportadora apresenta amplitudes de vibração próximas a um 1 g, com o eixo axial apresentando valores mais elevados.
- Ao analisarmos de maneira detalhada, podemos observar que o pico deste sinal de duração de 4s, corresponde a 1,1194 g ocorrido no tempo 2,52s. Observe que nesse caso nenhuma outra parte do sinal importa, já que o valor de pico é somente o valor de maior amplitude.





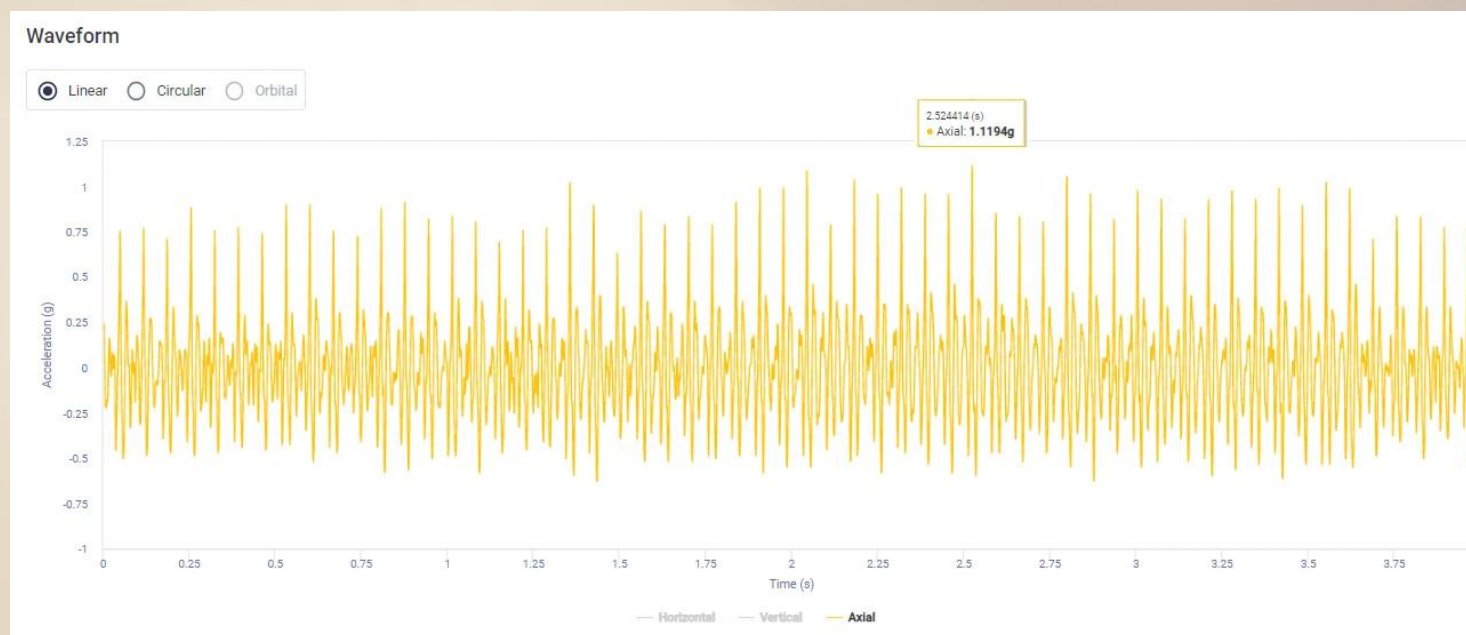
- 🌐 Outra métrica complementar é o valor de Pico a Pico. Esse valor é a medida do pico mínimo ao pico máximo do sinal.
- 🌐 Assim como o valor de pico, o seu aumento pode indicar o surgimento de impactos.
- 🌐 Da mesma forma, a amplitude Pico a Pico não fornece nenhuma informação sobre a quantidade de energia dentro do sinal de vibração, fornece apenas informação sobre os maiores e menores valores.



Valor de Pico a Pico

Aula 16

- Seguindo no exemplo anterior, é possível observar que o maior valor é de 1,1194 g, enquanto o menor valor corresponde a -0,6306 g, ocorrido no momento 2,87s do sinal.
- Ao calcularmos a distância de um ponto ao outro obtemos um valor de Pico a Pico de 1,75 g para o eixo axial.

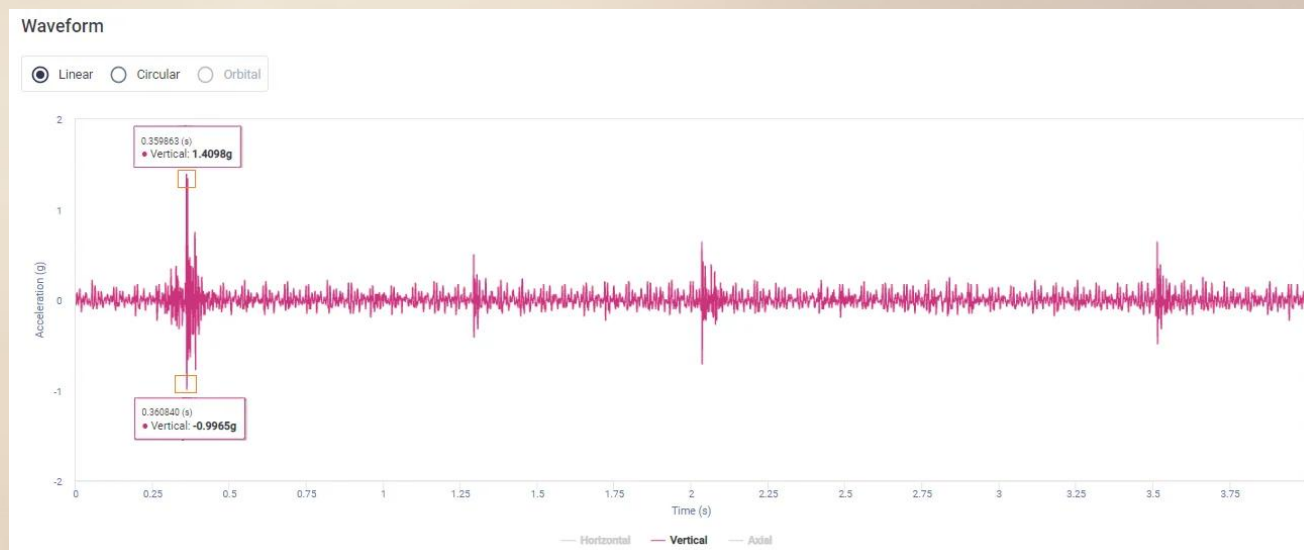




Valor de Pico a Pico

Aula 16

- Veja novamente que o restante do sinal não importa. Um exemplo mais claro disso é o sinal a seguir onde podemos ver impactos ainda mais significativos. Perceba como esses impactos destoam do restante do sinal e fornecem um valor de Pico a Pico final de: $1,4099 \text{ g} + 0,9965 = 2,4064 \text{ g}$.
- A métrica Pico a Pico é essencial para monitoramento de equipamentos de baixa rotação. Ativos desse tipo geralmente apresentam baixas amplitudes de vibração/baixos valores de energia, o que dificulta uso de métricas como RMS (falaremos mais a seguir) e favorece o uso de métricas como as picos ou pico a pico.





RMS (Root Mean Square)

Aula 16

- Foram apresentadas duas métricas que atuam pontualmente com valores máximos e são uma boa representatividade de impactos.
- Entretanto, faz-se necessário para enriquecer qualquer análise olhar também para uma métrica que represente melhor a energia total, ou seja, o conteúdo total do sinal. Uma ótima métrica para isso é o valor *RMS*.
- O *RMS* (Root Mean Square), representa o valor eficaz do sinal, sendo calculado com base em toda a amostra, através da seguinte equação:

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N a_i^2}$$



RMS (Root Mean Square)

Aula 16

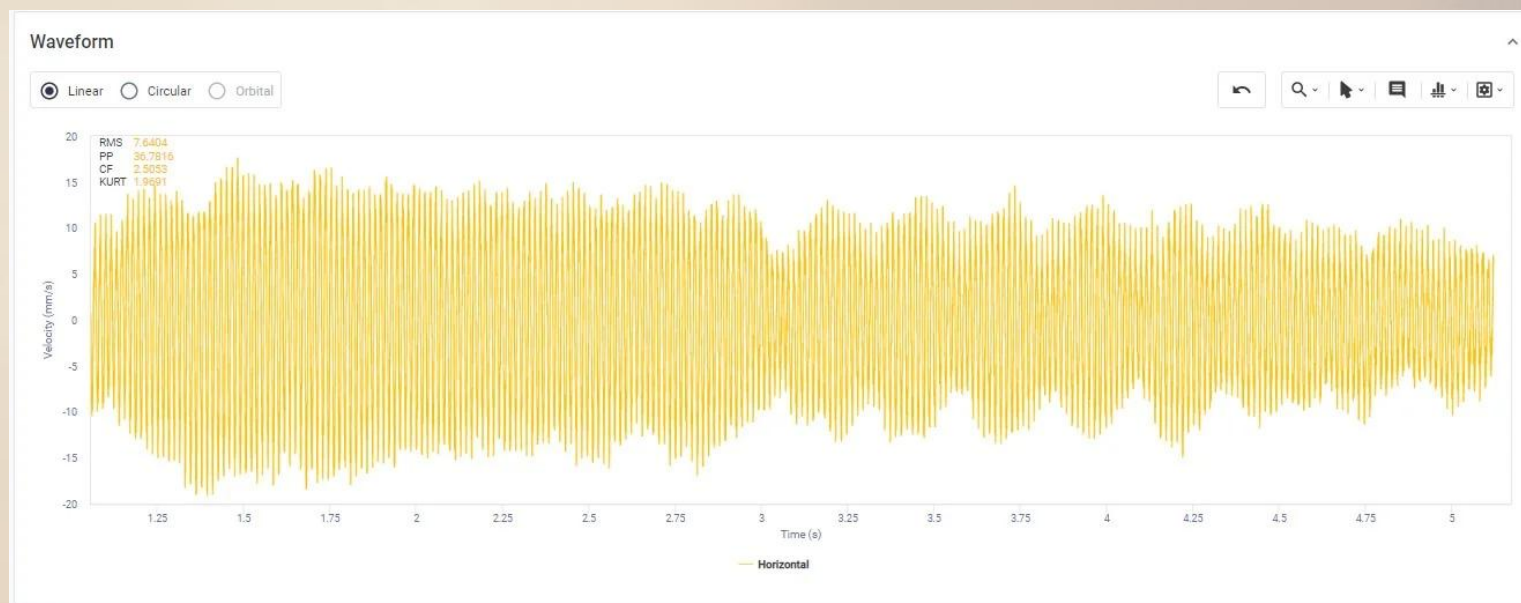
- De forma mais prática, o *RMS* é uma medida da energia vibratória do equipamento.
- Diferentemente dos valores de Pico e de Pico a Pico, o valor *RMS* não se trata de algo pontual, mas sim de uma representação da energia total do sinal.
- Conforme ocorre a progressão de uma falha em um ativo monitorado, o valor *RMS* tende a evoluir, isso acontece, pois o número de picos aumenta, impactando assim na energia total do sinal.
- De forma geral, o valor *RMS* apresenta baixas alterações em estágios iniciais de falhas mecânicas, pois há pouca alteração na energia total do sinal.
- Porém, conforme o agravamento das falhas, o valor *RMS* tende a aumentar de forma mais significativa.



RMS (Root Mean Square)

Aula 16

- Consideremos um exemplo de um redutor de um moinho. Este redutor apresenta um defeito de erro de transmissão de força e movimento do engrenamento externo, coroa e pinhão.
- Repare no canto superior esquerdo que tanto os valores de Pico a Pico (PP) como o valor RMS são mostrados pelo software. A diferença entre eles é significativa justamente pelo fato de o RMS levar em conta todo o sinal.





Métricas de Curtose e Skewness

Aula 16

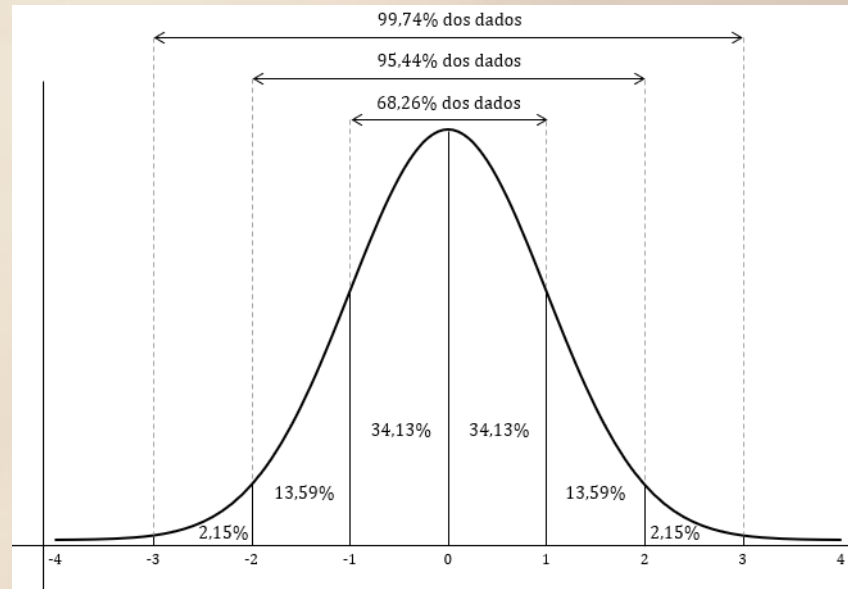
- As métricas de Curtose e Skewness são exemplos de parâmetros estatísticos importantes de serem analisados, pois são capazes de descrever qualitativamente a forma de um sinal de vibração.
- Como um sinal digital é formado por pontos discretos no tempo, podemos tratar qualquer sinal de vibração como uma distribuição estatística de pontos de aceleração, velocidade ou deslocamento.
- As métricas de curtose e skewness (também traduzido como distorção ou assimetria) são dois parâmetros estatísticos importantes.
- Esses parâmetros descrevem qualitativamente a forma de um sinal de vibração.
- No contexto da análise de vibrações, esses parâmetros quantificam os picos ou achatamentos de um sinal, assim como o grau de assimetria em torno de seu valor médio.



Curva de Gauss

Aula 16

- As métricas de Curtose e Skewness são obtidas através de distribuição normal, ou gaussiana. Essa é uma das distribuições de probabilidade mais utilizadas para modelar fenômenos naturais.
- Analizando a figura a seguir, na faixa mais ampla dessa distribuição, correspondente a 3 sigmas, representa-se cerca de 99,74% dos valores de um sinal. Essa região é conhecida como faixa natural de variação do processo.

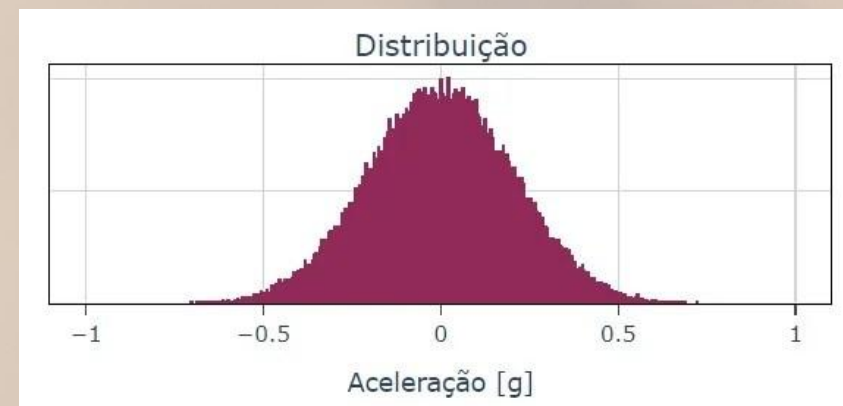




Curva de Gauss

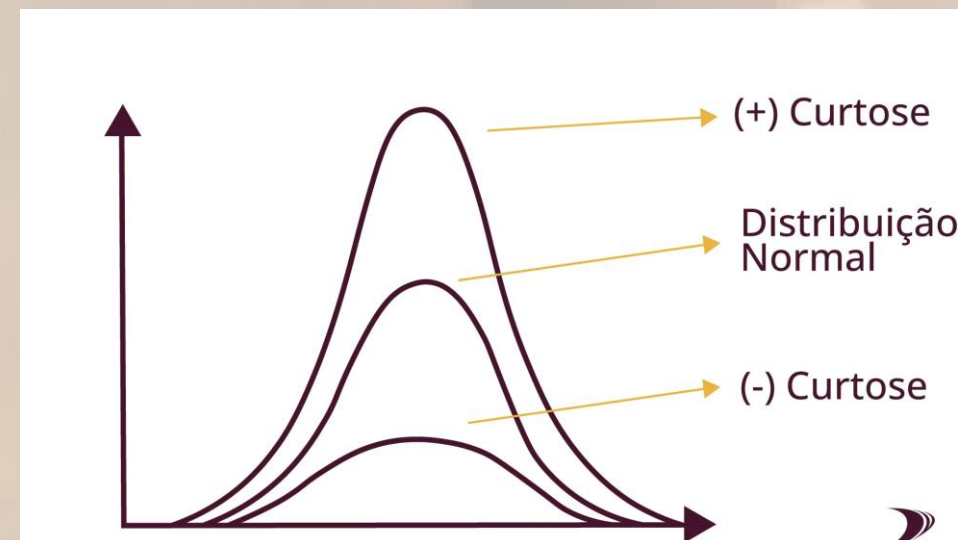
Aula 16

- Na estatística entende-se que um processo sempre possui um certo grau de variabilidade, ou seja, opera dentro de um range de valores, com determinada variação. Caso o processo seja estável, isso significa que a variação vai acontecer dentro dessa faixa de valores.
- Aplicando esse conceito na vibração de máquinas, se possuímos um sinal aleatório em aceleração, teremos uma distribuição normal similar a seguinte:





- Interpreta-se graficamente a curtose em um sinal de vibração olhando para a distribuição dos valores do sinal, como mostra a figura.
- Uma distribuição com uma curtose mais alta terá uma forma mais afunilada, com uma concentração de valores em torno de sua média.
- Por outro lado, uma distribuição com uma curtose mais baixa terá uma forma plana, com valores espalhados por um intervalo maior.
- De maneira resumida, a curtose expressa o quão similares os valores de um sinal são, portanto, a curtose será mais elevada em caso de um sinal com muitos picos ou impactos distintos.

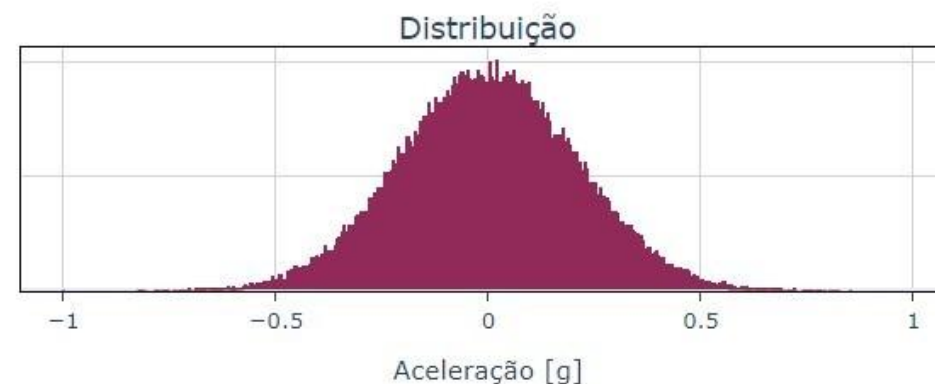
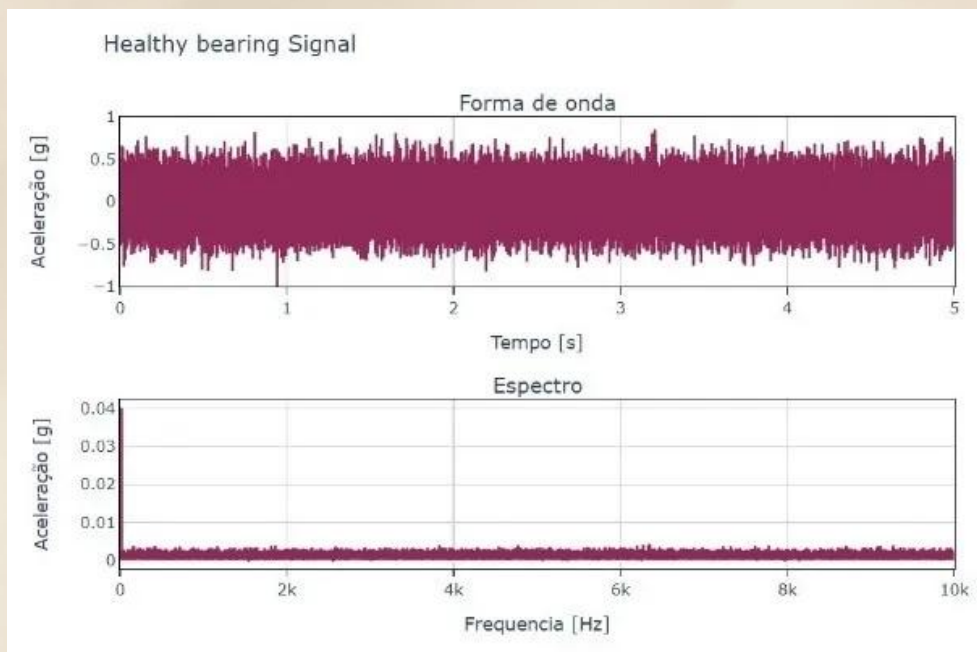




Exemplo da Métrica de Curtose

Aula 16

- Em um rolamento novo, devido à falta de defeitos, espera-se um sinal bastante aleatório, como o mostrado na forma de onda a seguir. Nesse caso, o valor de curtose será próximo a 3.



Estatísticas da forma de onda

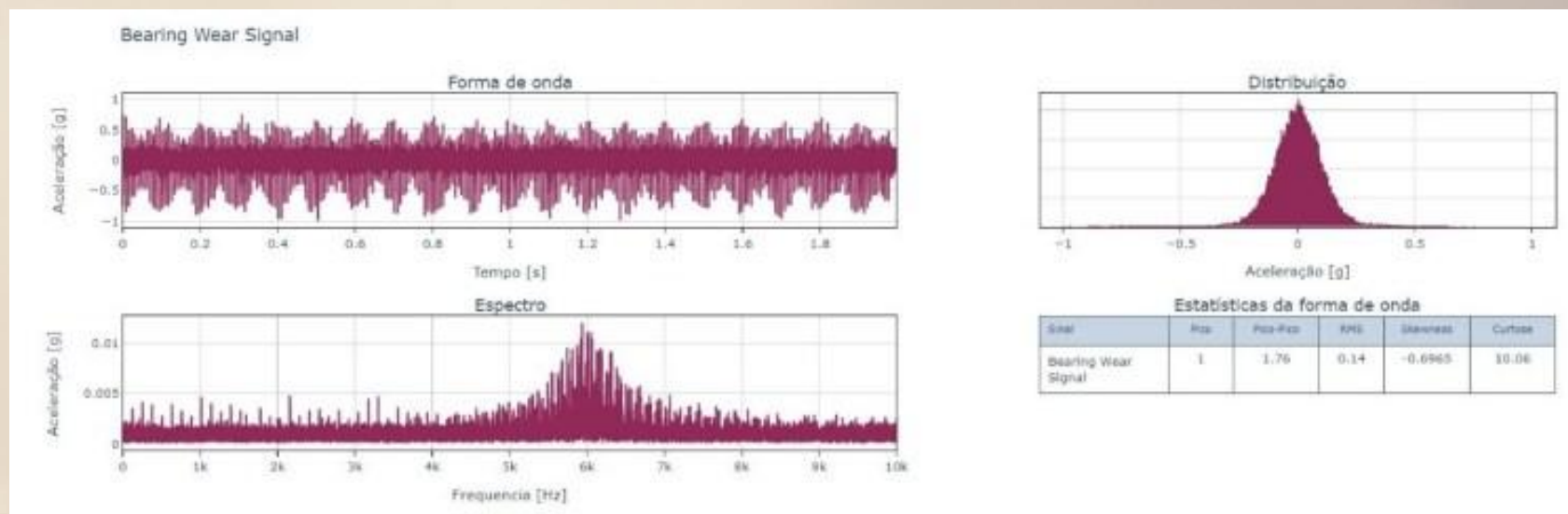
Sinal	Pico	Pico-Pico	RMS	Skewness	Curtose
Healthy bearing Signal	1	1.85	0.21	-0.0031	2.99



Exemplo da Métrica de Curtose

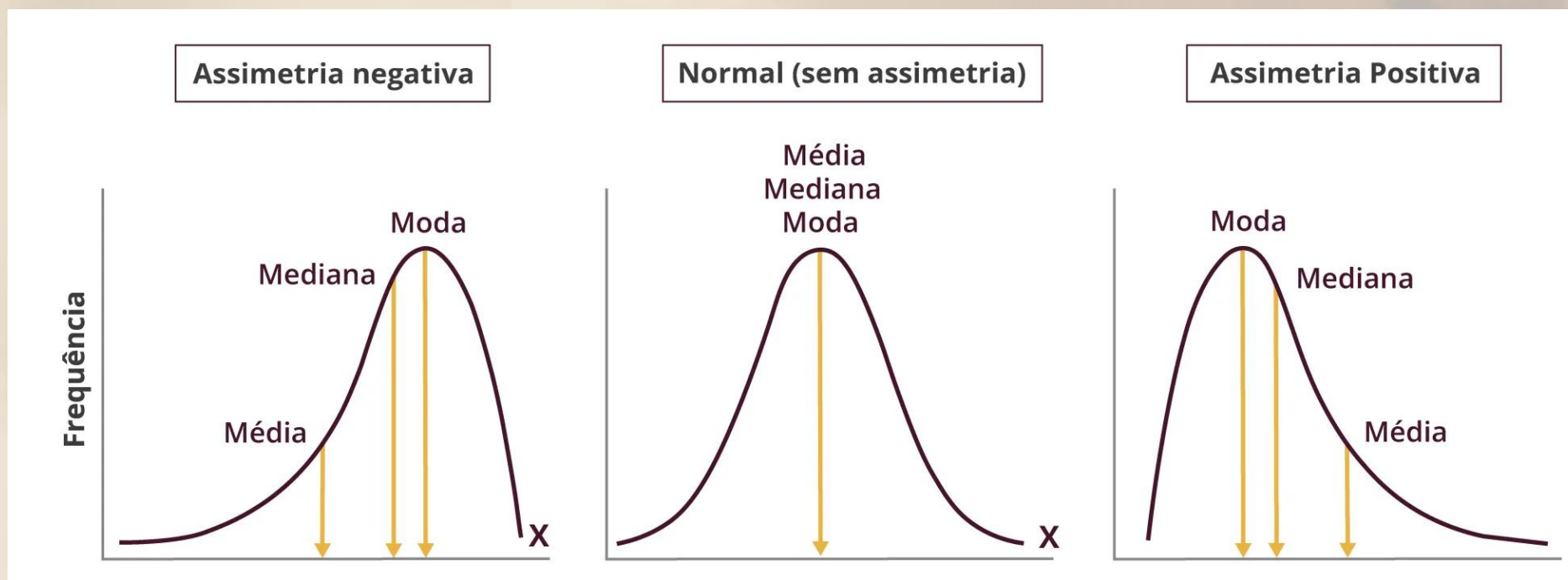
Aula 16

- À medida que os defeitos de um rolamento surgem e evoluem, os sinais de impacto modificam diretamente a distribuição do sinal, isso leva a uma mudança no valor da curtose. Como podemos ver a seguir, o sinal apresenta uma curtose elevada de valor 10.
- Em todos os casos, a partir da forma de onda é possível extrair a curtose em termos de aceleração, velocidade, deslocamento e envelope, tornando a análise ainda mais rica e pertinente.





- ✈ A skewness é outro parâmetro que pode ser utilizado para averiguar a saúde de um ativo.
- ✈ Conforme mencionado, trata-se da distorção ou assimetria de um sinal e cuja interpretação se dá graficamente olhando para a forma da distribuição do sinal.

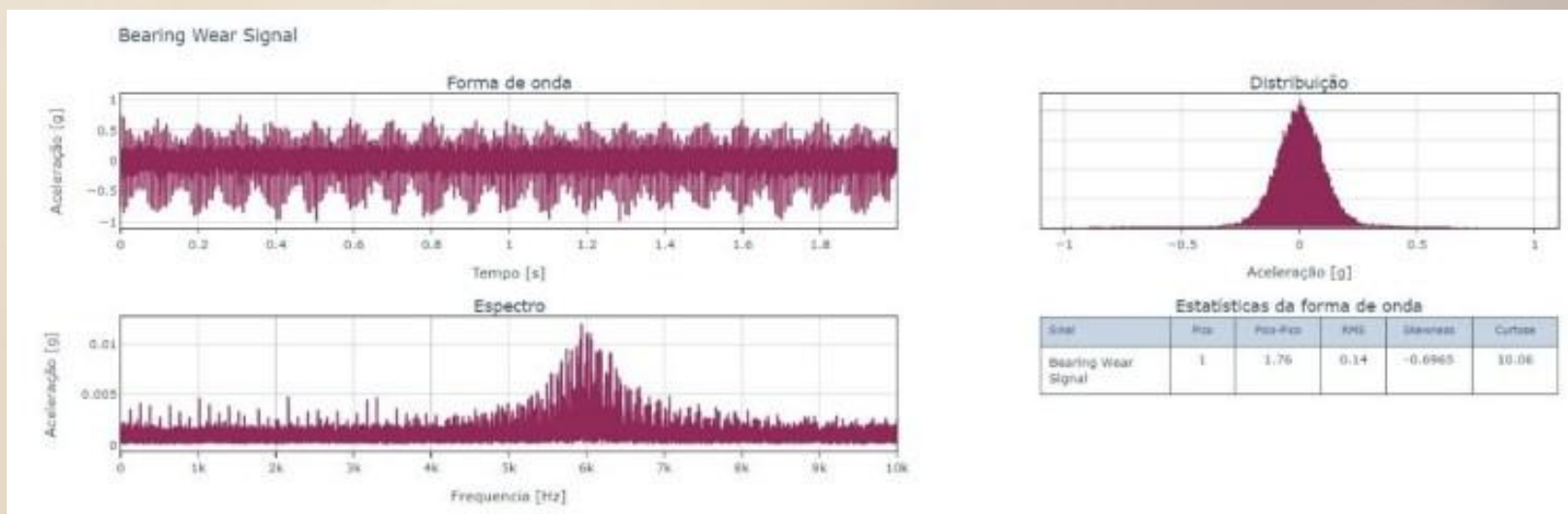




Exemplo da Métrica de Skewness

Aula 16

- Retomando o exemplo do sinal de rolamento defeituoso que analisamos anteriormente, caso o sinal estivesse totalmente simétrico, o valor do skewness seria igual a zero.
- Porém, como podemos observar na forma de onda, o sinal está tendendo para baixo, para a metade negativa do gráfico. Essa característica do sinal faz com que o valor de skewness seja negativo (-0,69) e, como pode-se observar na curva de distribuição, o sinal se apresenta deslocado para a esquerda. O que pode resultar da região de defeito do rolamento ou até mesmo da distribuição de carga no local.





Método de Análise Espectral

Aula 16

- 🌐 A análise espectral consiste em investigar os sinais no domínio da frequência através da Transformada de Fourier aplicada no sinal coletado originalmente no domínio do tempo (forma de onda).
- 🌐 A própria forma de onda (sinal no tempo) contém informações relevantes para análise da condição de um componente. Por isso, é bastante relevante aos analistas.
- 🌐 A forma de onda é representada por uma soma de senos e cossenos de diferentes frequências e amplitudes e, após processamento, dá origem ao espectro deste sinal.
- 🌐 A presença de frequências dominantes no espectro, ou então a concentração de energia em bandas de frequências, podem ser indicativos da presença de falhas.
- 🌐 Cada tipo de falha se manifesta de uma maneira distinta nos gráficos de análise e modifica a assinatura espectral da máquina.



Exemplo de Falhas com Análise Espectral

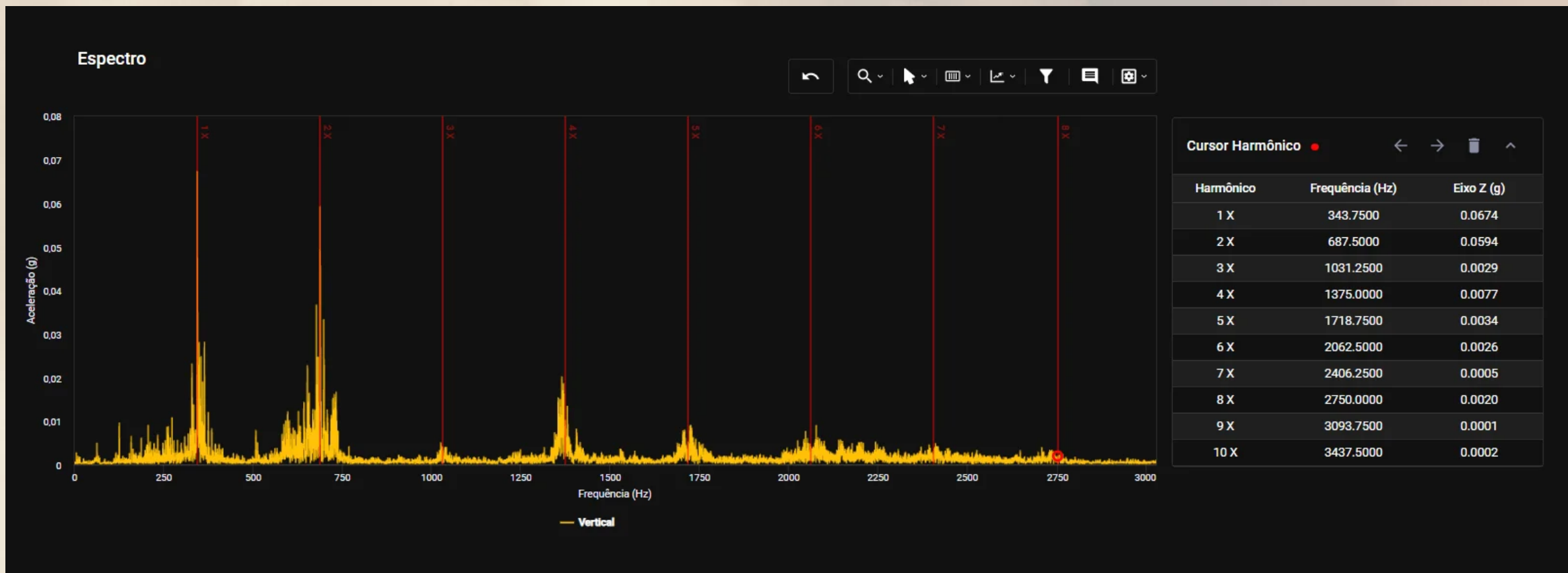
Aula 16

- 🌐 Uma falha bastante comum é a ocorrência de dentes trincados em redutores.
- 🌐 Neste caso, a determinação da severidade da falha se dá com base na presença de harmônicos da frequência de engrenamento.
- 🌐 Além disso, os dentes com trincas geram modulações na frequência de engrenamento referente a rotação da engrenagem com defeito.
- 🌐 Desta forma, outro sintoma será a presença de banda laterais da rotação da engrenagem danificada com muitos harmônicos.
- 🌐 O marcador de Harmônicos permite identificar com precisão a localização destes harmônicos, com frequência fundamental em 343,75 Hz.



Exemplo de Falhas com Análise Espectral

Aula 16





Exemplo de Falhas com Análise Espectral

Aula 16

- Assim, a identificação do engrenamento com defeito pode ser feita com base no espaçamento das bandas laterais em torno da frequência de engrenamento.
- O marcador de Sideband permite identificar que as bandas laterais estão espaçadas em 5,08 Hz, a qual corresponde à velocidade de rotação do eixo de saída, e portanto, corresponde a uma falha no engrenamento de saída.





Coleta de Dados da Análise Espectral

Aula 16

- 🌐 A realização de uma análise espectral bem-sucedida só é possível se a configuração espectral estiver adequada.
- 🌐 Isto impacta não apenas na qualidade do sinal coletado, mas também na capacidade do espectro proporcionar indicadores relevantes para o diagnóstico do ativo.
- 🌐 A seleção da faixa dinâmica deve ser com base nos níveis de amplitude típicos no ativo.
- 🌐 Valores baixos de faixa dinâmica podem resultar em sinais saturados, não capturando a evolução da falha.
- 🌐 Por outro lado, valores altos de faixa dinâmica em ativos que, mesmo na presença de falhas, não atingem tais níveis de vibração, podem resultar em sinais com baixa resolução, ou seja, pouca capacidade de distinguir diferentes níveis de amplitude, prejudicando assim a qualidade do espectro.



- 🌐 A frequência de amostragem determina a máxima frequência identificável no espectro: a frequência de Nyquist.
- 🌐 Assim, para ativos que possuem modos de falha que se manifestam em alta frequência, é desejável a maior frequência de amostragem possível.
- 🌐 Em outros casos, os modos de falha mais críticos podem ocorrer em frequências mais baixas. Dessa forma, o uso de uma frequência de amostragem inferior é a mais adequada.
- 🌐 Isto permite aumentar o tempo de duração da coleta e, conseqüentemente, aumentar a resolução espectral, ou seja, a capacidade de distinguir frequências distintas no espectro.
- 🌐 A combinação entre frequência de amostragem e tempo de duração da coleta determina o número de linhas no espectro.

Obrigado Pela Atenção

Nos Encontramos no Próximo Curso

