



UNIVERSIDADE FEDERAL
DO RIO DE JANEIRO

DETECÇÃO DE FALHAS EM ROLAMENTOS DE MÁQUINAS ROTATIVAS

Alunos:

Henrique Gomes Medeiros

DRE: 117047496

Paulo Marconi

DRE: 117042519

Professor:

Dr. -Ing Fernando Castro Pinto

I. Introdução

O objetivo deste estudo é explorar o uso de técnicas de processamento de sinais como uma abordagem avançada para identificar e diagnosticar falhas em rolamentos.

Os rolamentos são componentes cruciais para o funcionamento adequado de diversas máquinas rotativas, como motores, turbinas e bombas. Eles são responsáveis por suportar cargas, permitindo o movimento suave e eficiente dessas máquinas. No entanto, os rolamentos estão sujeitos a diferentes tipos de falhas ao longo do tempo, e os impactos podem ser significativos: Além de causar paradas não planejadas na produção, as falhas em rolamentos podem resultar em danos ao equipamento, perda de produtividade e até mesmo acidentes graves. Portanto, é fundamental identificar e solucionar precocemente essas falhas para evitar consequências indesejadas.

Nesse contexto, as técnicas tradicionais de detecção de falhas, como a inspeção visual e a análise de vibração, têm sido amplamente utilizadas. No entanto, esses métodos apresentam limitações em termos de capacidade de detecção precoce e precisão.

Surgem então as técnicas de processamento de sinais. Elas oferecem uma abordagem mais avançada para a detecção de falhas em rolamentos, permitindo uma análise mais detalhada e confiável dos sinais de vibração produzidos pelos rolamentos. Ao explorar essas técnicas, podemos extrair informações valiosas dos dados de vibração e identificar padrões que indicam falhas em estágios iniciais.

Portanto, iremos explorar em detalhes como o processamento de sinais pode ser aplicado para detectar falhas em rolamentos de máquinas rotativas. Discutiremos as vantagens dessa abordagem em relação às técnicas tradicionais, apresentaremos estudos de caso e resultados obtidos, com destaque a importância de se investir nessa área para melhorar a confiabilidade e a eficiência das máquinas rotativas.

II. O que são rolamentos e por que são importantes

Os rolamentos são componentes mecânicos projetados para reduzir o atrito e suportar cargas em movimentos rotativos. Eles são compostos por duas partes principais: um anel interno, que é montado no eixo rotativo, e um anel externo, que é fixado na estrutura da máquina. Entre esses anéis, encontramos elementos rolantes, como esferas ou rolos, que facilitam o movimento suave e eficiente.

A função dos rolamentos é permitir que as máquinas rotativas realizem seus movimentos com menor atrito possível. Eles suportam cargas radiais e axiais, garantindo a estabilidade e a precisão nos movimentos rotativos. Além disso, os rolamentos ajudam a distribuir as cargas de forma uniforme ao longo do eixo, prolongando a vida útil das máquinas e minimizando o desgaste excessivo.

III. Tipos mais comuns de falhas em rolamentos e suas consequências

Existem diferentes tipos de falhas em rolamentos, e cada uma delas pode ter implicações significativas no desempenho e na confiabilidade das máquinas rotativas. Entre elas podemos destacar as principais:

Desgaste

Um dos problemas comuns é o desgaste, que ocorre devido ao atrito contínuo entre os elementos rolantes e os anéis. O desgaste excessivo pode levar a folgas indesejadas, reduzindo a eficiência e aumentando a vibração das máquinas.

Escorregamento

Outra falha comum é o escorregamento, que ocorre quando os elementos rolantes não se mantêm adequadamente em contato com os anéis. Isso pode resultar em movimentos irregulares, causando vibrações excessivas e prejudicando a precisão do sistema.

Fadiga

Além disso, os rolamentos também estão sujeitos a problemas como a fadiga, que ocorre devido a cargas repetitivas ao longo do tempo. A fadiga pode resultar em trincas e rachaduras nos componentes, comprometendo a resistência estrutural e levando eventualmente à falha total do rolamento.

As consequências dessas falhas podem ser bastante sérias. Além das paradas não planejadas na produção, falhas em rolamentos podem causar danos irreparáveis ao equipamento, exigindo reparos ou substituições dispendiosas. Isso afeta a eficiência operacional, a produtividade e, em casos extremos, pode até mesmo representar riscos à segurança dos operadores e do ambiente de trabalho. Portanto, é de extrema importância identificar precocemente essas falhas em rolamentos, a fim de evitar danos maiores e garantir o funcionamento adequado das máquinas rotativas.

III. Técnicas tradicionais de detecção de falhas em rolamentos

A forma mais simples de detecção de falhas em rolamentos é a inspeção visual. É uma abordagem direta, na qual um técnico realiza uma observação visual dos rolamentos em busca de sinais de desgaste, danos ou outros problemas evidentes. Essa técnica pode ser realizada durante a manutenção regular ou quando há suspeita de uma falha iminente. A inspeção visual pode revelar algumas falhas óbvias, como desgaste visível ou folgas excessivas, mas pode não ser suficiente para identificar problemas mais sutis que estão em estágios iniciais.

A análise de vibração é outra técnica comumente utilizada para detectar falhas em rolamentos. Ela envolve a medição das vibrações produzidas pelos rolamentos durante a operação da máquina. Essas medições são realizadas utilizando sensores de vibração estrategicamente posicionados e equipamentos de análise específicos. Com base nas características das vibrações, como amplitude e frequência, é possível identificar padrões que indicam falhas em potencial nos rolamentos.

Apesar de serem técnicas amplamente aplicadas, tanto a inspeção visual quanto a análise de vibração apresentam algumas limitações que podem comprometer a eficácia da detecção de falhas em rolamentos.

A inspeção visual depende da habilidade e experiência do técnico, o que pode levar a resultados inconsistentes. Além disso, problemas internos nos rolamentos, como rachaduras microscópicas ou desgaste interno, podem não ser facilmente detectados apenas por meio de inspeção visual externa.

Já a análise de vibração oferece uma abordagem mais quantitativa e precisa, mas também possui suas limitações. Ela requer equipamentos especializados e conhecimento técnico para realizar as medições e interpretar os resultados. Além disso, a análise manual de grandes volumes de dados de vibração pode ser demorada e suscetível a erros humanos.

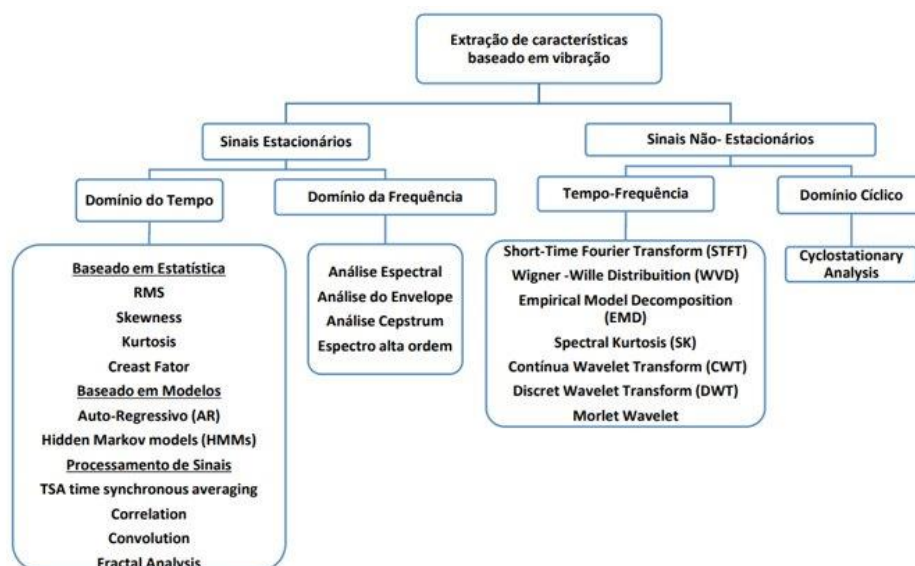
Diante dessas limitações, surge a necessidade de abordagens mais avançadas e eficientes para a detecção de falhas em rolamentos de máquinas rotativas. As técnicas de processamento de sinais oferecem uma maneira mais precisa, automatizada e confiável de extrair informações dos dados de vibração, permitindo a detecção precoce dessas falhas.

IV. Introdução ao processamento de sinais

O processamento de sinais é uma área da engenharia que lida com a análise e manipulação de sinais para extrair informações valiosas e tomar decisões com base nesses dados. No contexto da detecção de falhas em rolamentos, o processamento de sinais envolve a análise dos dados de vibração produzidos pelos rolamentos, a fim de identificar padrões característicos de falhas. Essa abordagem aproveita as propriedades dos sinais de vibração, como amplitude, frequência e padrões, para obter informações detalhadas sobre o estado dos rolamentos. Por meio de algoritmos e técnicas específicas, o processamento de sinais permite extrair essas informações e identificar potenciais falhas em estágios iniciais.

Conceitos fundamentais

Para compreendermos melhor o processamento de sinais, é importante conhecer alguns conceitos fundamentais. Dois desses conceitos são o domínio do tempo e o domínio da frequência.



Listagem de técnicas de extração de dados com sinais de vibração

O domínio do tempo refere-se à representação de um sinal no eixo temporal. Nesse domínio, podemos analisar a variação do sinal ao longo do tempo. Por exemplo, podemos observar a forma de onda da vibração dos rolamentos e analisar seu comportamento ao longo de um intervalo de tempo específico. Isso nos permite identificar padrões temporais, como impulsos ou variações periódicas. São utilizados parâmetros estatísticos para determinação da ocorrência da falha, tais como RMS e curtose.

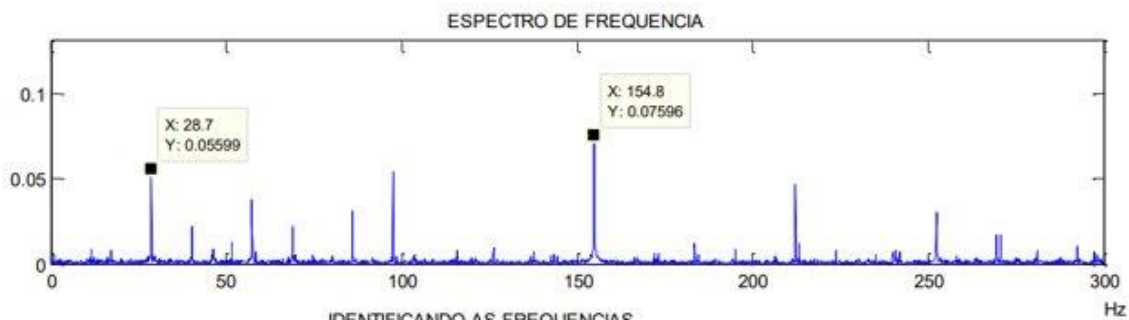
$$RMS = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (x(t) - \bar{x})^2 dt}$$

O valor RMS (Root Mean Square) do sinal normalizado é o segundo momento estatístico do sinal (desvio padrão) e mede a energia do sinal de vibração.

$$Curtose = \frac{\frac{1}{T} \int_0^T (x(t) - \bar{x})^4}{(RMS)^4}$$

Curtose é o momento estatístico de quarta ordem normalizado do sinal.

Já o domínio da frequência é uma representação do sinal no eixo das frequências. Nele, podemos analisar as componentes de frequência presentes no sinal. Cada falha em um rolamento pode gerar vibrações em frequências específicas. Por meio da transformada de Fourier, podemos decompor o sinal de vibração em suas componentes de frequência e identificar quais frequências estão associadas a possíveis falhas. Uma das técnicas mais utilizadas é a estimativa de Densidade Espectral de Potência (PSD) do envelope modulante do sinal temporal de falha, conforme pode ser visto na imagem abaixo:



Densidade espectral de Potência do envelope

Finalmente, no domínio do tempo-frequência, uma técnica bastante utilizada é a Transformada de Wavelet, especialmente para sinais com características não estacionárias.

Para um rolamento sem defeitos com uma distribuição gaussiana, o valor do coeficiente de curtose é próximo a **3**. Um valor superior ao citado é considerado como uma indicação de uma falha iminente. Entretanto, percebe-se que esse valor se reduz à medida que o defeito atinge estágios avançados, o que caracteriza uma desvantagem para confiabilidade de diagnósticos feitos a partir de sua utilização. Alguns estudos apontam ineficiências na detecção de falhas incipientes. Logo, esse método não se tornou popular na indústria para o monitoramento de mancais de rolamento.

$$pico = \frac{1}{2} [\max(x(t)) - \min(x(t))]$$

definido como metade da diferença entre o máximo e mínimo níveis de vibração.

$$F_c = \frac{\text{pico}}{\text{RMS}}$$

Fator de Crista (Fc) é definido como a razão entre o valor de pico e valor RMS do sinal.

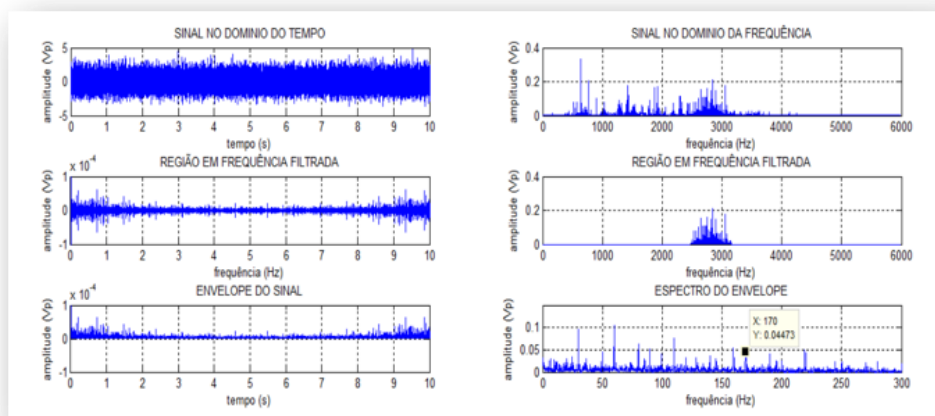
O processamento de sinais nos fornece as ferramentas necessárias para explorar esses conceitos e extrair informações relevantes dos dados de vibração dos rolamentos. Ele nos capacita a realizar análises mais sofisticadas e detalhadas, melhorando assim a detecção de falhas e permitindo que tomemos ações antes que problemas mais graves ocorram.

V. Aplicações do processamento de sinais na detecção de falhas em rolamentos

Análise de envelope

A análise de envelope é uma técnica que se concentra nas variações de amplitude dos sinais de vibração. Ela envolve a extração do sinal de envelopamento, que representa as mudanças de amplitude ao longo do tempo. A análise de envelope é útil para detectar falhas como desgaste, trincas e danos nas superfícies dos rolamentos. Essa técnica permite identificar picos de amplitude que indicam problemas específicos, facilitando a detecção precoce de falhas.

- 1- Inicialmente, aplica-se a transformada de Fourier ao sinal coletado. A partir da resposta no domínio da frequência pode-se definir a faixa de frequências com intuito de se determinar a faixa de filtragem, isto é, qual a região foi mais excitada pela falha;
- 2- Aplica-se o filtro passa banda. O objetivo desse filtro é eliminar as frequências indesejáveis, como por exemplo, as baixas frequências de alta amplitude que em geral estão associadas ao desalinhamento e desbalanceamento;
- 3- Aplica-se o Filtro Passa Alta para eliminação da componente DC;
- 4- Aplica-se a transformada de Hilbert para obtenção do envelope do sinal do defeito. Essa transformada é responsável por evidenciar quantas vezes o pulso se repetiu num segundo, ou seja, ela diz qual é a frequência característica de defeito do rolamento;
- 5- Com o sinal no tempo, aplica-se novamente a Transformada de Fourier ao envelope do sinal para obtenção das frequências características do defeito.



Etapas de uma análise de envelope

Análise espectral

A análise espectral é outra técnica valiosa que permite identificar as componentes de frequência presentes nos sinais de vibração. Por meio da transformada de Fourier, é possível decompor o sinal no domínio da frequência e identificar picos espectrais que estão associados a falhas específicas nos rolamentos. Essa análise espectral auxilia na identificação de padrões característicos de falhas, como frequências de passagem de esferas ou rolos, e ajuda a distinguir entre diferentes tipos de falhas.

Análise de padrões

Análise de padrões é uma técnica que visa identificar alterações nos padrões temporais dos sinais de vibração. Por meio de algoritmos e técnicas de machine learning, é possível analisar a sequência de vibrações ao longo do tempo e identificar variações anômalas nos padrões. Isso permite detectar mudanças sutis no comportamento dos rolamentos, indicando possíveis falhas em estágios iniciais.

Essas são apenas algumas das técnicas de processamento de sinais aplicadas na detecção de falhas em rolamentos. Cada uma delas tem suas vantagens e pode ser utilizada de forma complementar para obter uma análise abrangente e precisa. A aplicação dessas técnicas permite identificar precocemente falhas em rolamentos, permitindo ações de manutenção corretivas e preventivas, evitando paradas não planejadas e garantindo um funcionamento confiável das máquinas rotativas.

VI. Vantagens do processamento de sinais na detecção de falhas em rolamentos

Uma das principais vantagens do processamento de sinais é a sua capacidade de fornecer uma análise mais precisa e detalhada dos dados de vibração dos rolamentos. Enquanto as técnicas tradicionais, como a inspeção visual e a análise de vibração, podem ser limitadas em sua capacidade de detectar falhas em estágios iniciais, o processamento de sinais permite identificar padrões sutis e anômalos nos sinais de vibração, possibilitando uma detecção precoce de falhas.

Além disso, o processamento de sinais oferece uma abordagem mais objetiva e quantitativa para a análise de falhas em rolamentos, com um resultado mensurável no lugar de todo um grupo de dados. Ao utilizar algoritmos e técnicas específicas, é possível automatizar a análise dos dados de vibração e obter resultados consistentes e confiáveis. Isso reduz a dependência de habilidades subjetivas e experiência individual, tornando o processo de detecção de falhas mais eficiente e menos suscetível a erros humanos.

Além disso, o processamento de sinais permite a implementação de estratégias de manutenção preditiva, em vez de depender exclusivamente de manutenção corretiva. Com base nas informações obtidas por meio do processamento de sinais, é possível estabelecer indicadores de desempenho e definir limites de alerta para a condição dos rolamentos. Dessa forma, a manutenção pode ser programada de forma mais eficiente, evitando paradas não planejadas e maximizando o tempo de operação das máquinas.

Em resumo, as vantagens do processamento de sinais na detecção de falhas em rolamentos incluem a detecção precoce de problemas, a redução de paradas não planejadas, a melhoria da eficiência na manutenção e a prolongação da vida útil dos rolamentos. Essa abordagem

avançada está revolucionando a forma como lidamos com a manutenção de máquinas rotativas, proporcionando uma maior confiabilidade operacional e um melhor desempenho global dos equipamentos.

VII. Estudo de caso e resultados

Para exemplificar a efetividade de um processamento de sinais no caso de um rolamento foi feita uma análise de dados em rolamentos do mesmo modelo, porém alguns em boa condição de uso e outros com os defeitos mencionados ao longo do texto, como os de pista interna e externa.

Essas informações serão comparadas, a fim de verificar se é possível identificar corretamente e claramente as falhas existentes por meio do processamento de sinais.

Especificação do rolamento:

Rolamento		SKF 6205-2RS JEM		
Geometria (mm)	Diâmetro externo	51,99		
	Diâmetro interno	25,012		
	Diâmetro <i>Pitch</i>	38,5		
	Diâmetro da esfera	7,94		
	Número de esferas	9		
	Ângulo de contato	0°		
Frequências de defeito [Hz]	f_{dpc}	f_{dpi}	f_{de}	f_g
	107,37	162,57	69,52	11,89

Características de um rolamento sem defeito

CARACTERÍSTICAS EXTRAIDAS DO DOMÍNIO DO TEMPO			
1 - Valor RMS =	0.072687	2 - Valor de Pico =	0.2987
3 - Fator de Crista =	4.1093	4 - Fator de Impulso =	5.0913
5 - Curtose =	2.7642		
CARACTERÍSTICAS DO SINAL DO MANCAL DE ROLAMENTO			
Item	Nome	Valor	
1-	Ressonância (Hz)	2850	
2-	Rotação do Eixo (Hz)	29.95	
3-	Frequência de Passagem - Defeito na Pista Interna (Hz)	162.5702	
4-	Frequência de Passagem - Defeito na Pista Externa (Hz)	0	
5-	Frequência de Passagem - Defeito na Esfera(Hz)	0	
6-	Frequência de Amostragem (Hz)	12000	
7-	Comprimento do Sinal (pontos)	243938	

Características no domínio do tempo de um rolamento sem defeitos

Podemos verificar pelas características extraídas no domínio do tempo que a energia (RMS) está bem próxima de 0, com valor de pico baixo e curtose abaixo do limite de 3.

Também foram verificadas as frequências características dos defeitos na pista interna, externa, na esfera e na gaiola através das equações abaixo:

$$f_{dpe} = \frac{nf_r}{2} \left(1 - \frac{d}{D} \cos\emptyset \right)$$

Frequência de defeito na pista externa

$$f_g = \frac{f_r}{2} \left(1 - \frac{d}{D} \cos\emptyset \right)$$

Frequência da gaiola

$$f_{de} = \frac{Df_r}{2d} \left(1 + \left[\frac{d}{D} \cos\emptyset \right]^2 \right)$$

Frequência de defeito na esfera

$$f_{dpi} = \frac{nf_r}{2} \left(1 + \frac{d}{D} \cos\emptyset \right)$$

Frequência de defeitos na pista interna

fr= frequência de rotação do eixo (rpm)

n= número de esferas

D= Diâmetro Pitch do rolamento

d= diâmetro da esfera

∅ = ângulo de contato

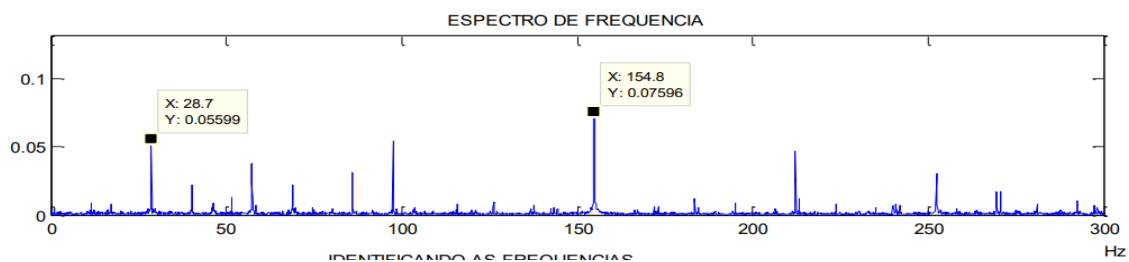
FREQUÊNCIAS	VALOR EM (Hz)
Defeito na Pista Interna	162,57
Defeito na Pista Externa	106,97
Defeito na Esfera	69,51
Defeito na Gaiola	11,88

Listagem das frequências características dos defeitos

Vale lembrar que, devido aos possíveis deslizamentos, essas frequências costumam variar de 1% a 2%.

Agora, vamos aos resultados obtidos em rolamentos com defeitos.

Defeito na pista interna



Espectro de frequência de um rolamento com defeito na pista interna

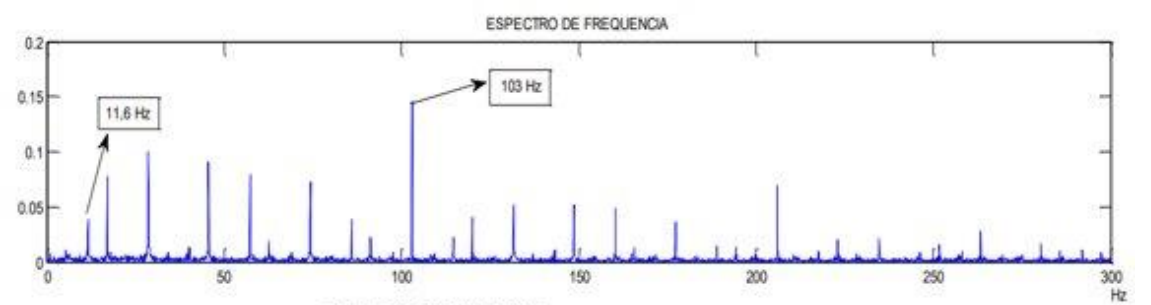
Nos dados abaixo podemos identificar um aumento da energia (RMS) de 0,07 para 0,31 e da

curtose para um valor acima de 3, o que caracteriza um defeito pelas especificações definidas. Ao observar o espectro da frequência, também é possível perceber um pico bastante considerável na frequência de 154,8 Hz, uma frequência relativamente próxima do valor calculado para defeitos na pista interna de 162,57 Hz.

CARACTERÍSTICAS EXTRAIDAS DO DOMINIO DO TEMPO			
1 - Valor RMS =	0.31357	2 - Valor de Pico =	1.6667
3 - Fator de Crista =	5.3153	4 - Fator de Impulso =	7.4364
5 - Curtose =	5.2911		
CARACTERÍSTICAS DO SINAL DO MANCAL DE ROLAMENTO			
Item	Nome	Valor	
1-	Ressonância (Hz)	2850	
2-	Rotação do Eixo (Hz)	28.8333	
3-	Frequência de Passagem - Defeito na Pista Interna (Hz)	156.5088	
4-	Frequência de Passagem - Defeito na Pista Externa (Hz)	0	
5-	Frequência de Passagem - Defeito na Esfera(Hz)	0	
6-	Frequência de Amostragem (Hz)	12000	
7-	Comprimento do Sinal (pontos)	122917	

Características no domínio do tempo de um rolamento com defeito na pista interna

Defeito na pista externa



Espectro de frequência de um rolamento com defeito na pista externa

Ao observar o caso com defeito na pista externa podemos ver no espectro da frequência um pico na região de 103 Hz, valor próximo da frequência de defeito teórica na pista externa. Além disso, o fator de crista e curtose também apresentam crescimento significativo.

CARACTERÍSTICAS EXTRAÍDAS DO DOMÍNIO DO TEMPO

1 - Valor RMS =	0.559	2 - Valor de Pico =	6.6494
3 - Fator de Crista =	11.8951	4 - Fator de Impulso =	24.4285
5 - Curtose =	23.542		

CARACTERÍSTICAS DO SINAL DO MANCAL DE ROLAMENTO

Item	Nome	Valor
1-	Ressonancia (Hz)	2850
2-	Rotacao do Eixo (Hz)	29
3-	Frequencia de Passagem - Defeito na Pista Interna (Hz)	0
4-	Frequencia de Passagem - Defeito na Pista Externa (Hz)	103.5865
5-	Frequencia de Passagem - Defeito na Esfera(Hz)	0
6-	Frequencia de Amostragem (Hz)	12000
7-	Comprimento do Sinal (pontos)	121991

Características no domínio do tempo de um rolamento com defeito na pista externa

Defeito na esfera

Nesse caso é mais complicada a identificação dos defeitos, especialmente utilizando a curtose, já que ela se mantém acima de 3, porém bastante próxima dos valores medidos em um rolamento sem defeitos, gerando incerteza.

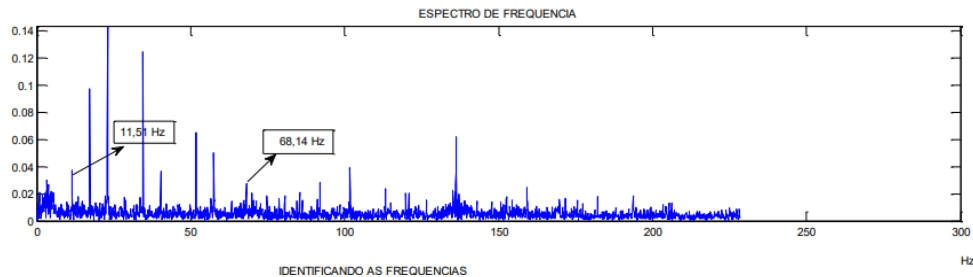
CARACTERÍSTICAS EXTRAÍDAS DO DOMÍNIO DO TEMPO

1 - Valor RMS =	2.1449	2 - Valor de Pico =	11.3449
3 - Fator de Crista =	5.2893	4 - Fator de Impulso =	7.0003
5 - Curtose =	3.8991		

CARACTERÍSTICAS DO SINAL DO MANCAL DE ROLAMENTO

Item	Nome	Valor
1-	Ressonancia (Hz)	2850
2-	Rotacao do Eixo (Hz)	29
3-	Frequencia de Passagem - Defeito na Pista Interna (Hz)	0
4-	Frequencia de Passagem - Defeito na Pista Externa (Hz)	0
5-	Frequencia de Passagem - Defeito na Esfera(Hz)	67.3182
6-	Frequencia de Amostragem (Hz)	12000
7-	Comprimento do Sinal (pontos)	120984

Características no domínio do tempo de um rolamento com defeito na esfera



Espectro de frequência de um rolamento com defeito na esfera

Isso acontece pois esses impulsos gerados são influenciados pela gaiola, que tem uma frequência de defeito de 11,88Hz, além de ter bastante ruído pela movimentação tanto da pista externa quanto da pista interna.

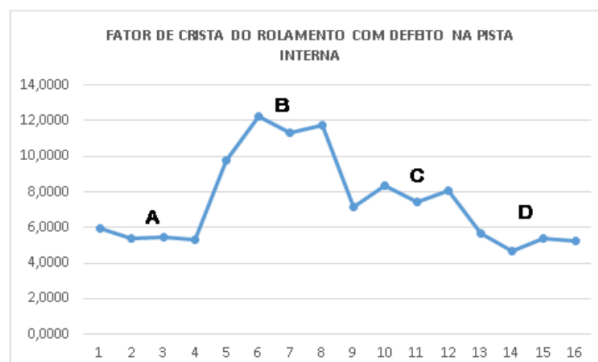
Problemas na abordagem de nível de energia (RMS)

- 1-Aumentos das vibrações somente nos estágios finais.
- 2-Não fornece informação do local onde a falha ocorre.
- 3-Não detecção de todas as falhas e atraso na detecção pode ser ruim para manutenção preditiva.

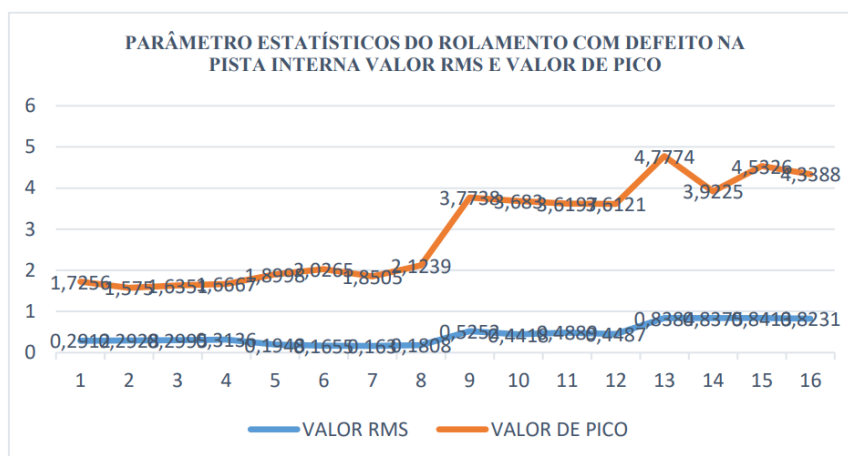
Os indicadores específicos como o valor de pico e curtose são mais adequados para representar um sinal induzido por forças de impulso de rolamentos com falhas. O valor de pico tem a vantagem da detecção de falhas antes do valor eficaz. Isto acontece porque para um rolamento sem falha, a proporção permanece substancialmente constante e aumenta quando a degradação ocorre, enquanto o valor de pico aumenta à medida que o valor eficaz permanece, praticamente, constante.

Relação entre RMS e valor de pico

A relação entre os parâmetros de valor de pico de valor RMS gera o fator de crista. Este fator pode ser bom para identificar um defeito, pois ao sofrer o mesmo é gerada uma elevação mais acentuada da aceleração em relação ao nível RMS. Em condições normais, o fator de crista assume valores entre 5 e 6. Quando começam a surgir as falhas: fator de crista aumenta para até 12. Quando as falhas se propagam, o RMS acompanha o aumento de aceleração, logo o fator de crista volta a descer. Em resumo, um fator de crista maior do que 5 começa a sugerir falha no rolamento. Um fator importante de se lembrar é que, caso a falha comece a se propagar muito, isso acarretará em um aumento da energia (RMS), que torna a reduzir os valores do fator de crista, podendo gerar interpretações errôneas caso não esteja sendo acompanhado.



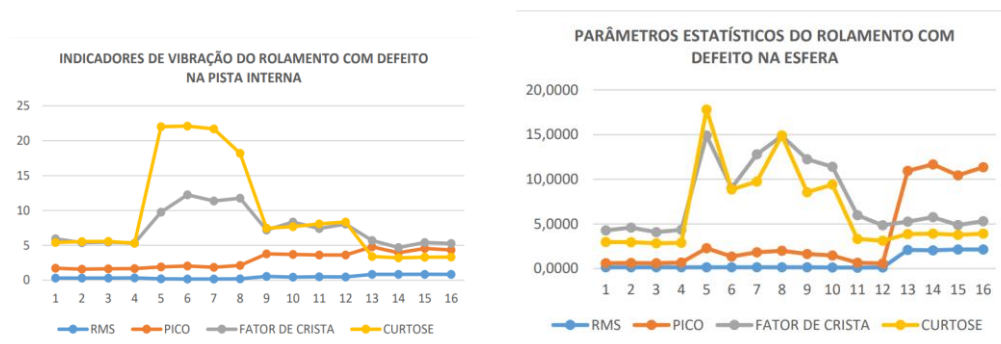
Evolução do fator de crista no rolamento conforme progressão da falha



Evolução do valor de pico e RMS no rolamento conforme progressão da falha

Aglomeramento dos Parâmetros estatísticos

Aqui podemos acompanhar os 4 principais indicadores de vibração e sua evolução ao longo do desenvolvimento de defeitos no Rolamento, separado em 16 estágios:



Em conclusão, a detecção de falhas em rolamentos de máquinas rotativas é um desafio importante para a indústria. As técnicas tradicionais têm suas limitações, mas o processamento de sinais se apresenta como uma solução promissora que pode sim identificar falhas prematuramente, evitando altos custos de manutenção e necessidade de grande estoque para reposição de materiais.

Ao explorar as aplicações e vantagens do processamento de sinais, fica evidente que essa abordagem pode transformar a forma como lidamos com a manutenção e a confiabilidade das máquinas rotativas. A detecção precoce de falhas, a redução de paradas não planejadas e a melhoria geral do desempenho operacional são benefícios que podem ser alcançados com o uso adequado do processamento de sinais.

Fontes:

Slides de aula monitoração e diagnóstico de máquinas

pantheon.ufrj.br/bitstream/11422/9516/1/monopoli10006234.pdf

repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/151409/santos_rs_dr_guara.pdf?sequence=3&isAllowed=y