

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

VALDIR MARINELLO COELHO

**ESTUDO DE TÉCNICAS DE MONITORAMENTO E ANÁLISE DE VIBRAÇÕES
PARA MANUTENÇÃO PREDITIVA DE ROLAMENTOS**

LONDRINA

2024

VALDIR MARINELLO COELHO

**ESTUDO DE TÉCNICAS DE MONITORAMENTO E ANÁLISE DE VIBRAÇÕES
PARA MANUTENÇÃO PREDITIVA DE ROLAMENTOS**

**Study of vibration monitoring and analysis techniques for predictive
maintenance of bearings**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação apresentado como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador: Juliano Gonçalves Iossaqui

LONDRINA

2024



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Esta licença permite compartilhamento, remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

VALDIR MARINELLO COELHO

**ESTUDO DE TÉCNICAS DE MONITORAMENTO E ANÁLISE DE VIBRAÇÕES
PARA MANUTENÇÃO PREDITIVA DE ROLAMENTOS**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
apresentado como requisito para obtenção do
título de Bacharel em Engenharia Mecânica da
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
(UTFPR).

Data de aprovação: 22/agosto/2024

Juliano Gonçalves Iossaqui
Doutorado em Engenharia Mecânica
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Haroldo Lhou Hasegawa
Doutorado em Engenharia de Materiais
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Rafael Sene de Lima
Doutorado em Engenharia Mecânica
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

LONDRINA

2024

RESUMO

A análise de vibração pode ser considerada um dos métodos mais eficazes para entender as condições de máquinas rotativas na grande maioria das aplicações industriais. Com a análise de vibração é possível identificar problemas como desgaste de rolamento, defeito de engrenagem, falta de lubrificação, cavitação em bombas, desalinhamento e desbalanceamento de eixos, entre outros. Com isso, planos de manutenção preditiva podem ser implementados proporcionando a redução de falhas, o aumento da vida útil, a melhora dos fatores de disponibilidade e confiabilidade, bem como a redução de custos associados à manutenção corretiva não planejada. Neste contexto, o presente trabalho tem como objetivo estudar e investigar o uso de técnicas de medições e análise de vibrações que podem ser empregadas na manutenção preditiva de rolamentos. Realiza-se medições de vibrações em um bancada didática de transmissão de movimentos que contém rolamentos que devem sofrer defeitos induzidos para fins de testes. Para análise dos valores globais de vibração utiliza-se um medidor de vibração FLUKE 805 FC enquanto para análise espectral utiliza-se um acelerômetro axial piezoelétrico PCB. Técnicas de processamento de sinais são aplicadas para interpretar os dados espectrais. Os resultados obtidos permitem a identificação de padrões característicos de defeitos em rolamentos, contribuindo para o desenvolvimento de estratégias de manutenção mais eficientes. Além disso, o estudo evidencia a importância de ferramentas precisas para a detecção precoce de falhas, auxiliando na tomada de decisões e na implementação de um plano de manutenção preditiva eficaz em ambientes industriais.

Palavras-chave: medidor de vibração; acelerômetro triaxial; fator de crista; análise espectral.

ABSTRACT

Vibration analysis can be considered one of the most effective methods to understand conditions of rotating machinery in the vast majority of industrial applications. With the vibration analysis it is possible to identify problems such as bearing wear, gear, lack of lubrication, cavitation in pumps, misalignment and unbalance axes, among others. With this, predictive maintenance plans can be implemented providing the reduction of failures, the increase of the lifespan, the improvement of the factors of availability and reliability, as well as the reduction of costs associated with corrective maintenance. In this context, the present work aims to study and investigate the use of vibration measurement and analysis techniques that can be employed in predictive maintenance of bearings. Vibration measurements are carried out on a bench didactic of transmission of movements that contains bearings that must suffer defects induced for testing purposes. For the analysis of global vibration values, is used a vibration meter FLUKE 805 FC while for spectral analysis an axial accelerometer is used piezoelectric PCB. Signal processing techniques are applied to interpret the spectral data. The results obtained enable the identification of characteristic patterns of bearing defects, contributing to the development of more efficient maintenance strategies. Furthermore, the study emphasizes the importance of precise tools for early fault detection, aiding in decision-making and the implementation of an effective predictive maintenance plan in industrial environments.

Keywords: vibration meter; triaxial accelerometer; crest factor; spectral analysis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Bancada didática de transmissão de movimentos	12
Figura 2 – Curva PF X Custo de reparo	21
Figura 3 – Relação entre o nível de pico a pico, nível de pico, nível médio e o RMS de uma onda senoidal	26
Figura 4 – Relação entre fator de crista com valor RMS e valor de pico	27
Figura 5 – Gráfico do tempo e da frequência	28
Figura 6 – Sub classificação de rolamentos axiais e radiais.	30
Figura 7 – Rolamento autocompensador de rolos descascado devido à lubrifica- ção deficiente	31
Figura 8 – Exemplo de um anel externo de rolamento pós deslizamento entre su- perfícies	32
Figura 9 – Anel interno de rolamento de rolos cônicos fraturado pós choque no processo de instalação	32
Figura 10 – Anel interno do rolamento autocompensador de rolos superaquecido devido à lubrificação insuficiente	33
Figura 11 – Desenho esquemático de um mancal de rolamento com pista interna e externa giratórias.	34
Figura 12 – Quatro estágios de falhas em rolamentos	39
Figura 13 – Bancada didática de transmissão de movimento com três eixos	41
Figura 14 – Bancada didática de transmissão de movimentos	42
Figura 15 – FLUKE 805 FC	43
Figura 16 – Escalas de valores do Crest Factor+ X Gravidade	45
Figura 17 – Módulo de aquisição de dados NI9234	47
Figura 18 – Interface do LabVIEW	48
Figura 19 – Condição 1 - Rolamento com defeito induzido na pista externa	53
Figura 20 – Condição 2 - Rolamento com aumento do defeito induzido na pista ex- terna	54
Figura 21 – Resposta no tempo com motor a aproximadamente 600 rpm.	55
Figura 22 – Resposta em frequência com motor a aproximadamente 600 rpm.	57
Figura 23 – Resposta no tempo com motor a aproximadamente 1200 rpm.	58

Figura 24 – Resposta em frequência com motor a aproximadamente 1200 rpm.	59
Figura 25 – Resposta no tempo com motor a aproximadamente 1800 rpm.	60
Figura 26 – Resposta em frequência com motor a aproximadamente 1800 rpm.	61
Figura 27 – Resposta em frequência com motor a aproximadamente 1800 rpm.	63
Figura 28 – Resposta em frequência com motor a aproximadamente 1800 rpm.	65
Figura 29 – Resposta no tempo com motor a aproximadamente 600 rpm.	66
Figura 30 – Resposta em frequência com motor a aproximadamente 600 rpm.	67
Figura 31 – Resposta no tempo com motor a aproximadamente 1200 rpm.	68
Figura 32 – Resposta em frequência com motor a aproximadamente 1200 rpm.	69
Figura 33 – Resposta no tempo com motor a aproximadamente 1800 rpm.	70
Figura 34 – Resposta em frequência com motor a aproximadamente 1800 rpm.	71
Figura 35 – Resposta no tempo com motor a aproximadamente 1800 rpm.	73
Figura 36 – Resposta em frequência com motor a aproximadamente 1800 rpm.	74

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Frequências críticas do rolamento 1207KC03.	53
Tabela 2 – Fator de crista obtido com acelerômetros PCB e FLUKE.	55
Tabela 3 – Rolamento sem defeito induzido (condição 0)	75
Tabela 4 – Rolamento com defeito induzido na pista externa (condição 1)	75
Tabela 5 – Rolamento com aumento do defeito induzido na pista externa (condição 2)	76
Tabela 6 – Rolamento sem defeito induzido (condição 3)	76
Tabela 7 – Rolamento com defeito induzido na pista interna (condição 4)	76

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Evolução da manutenção	20
Quadro 2 – Resumo das equações gerais de frequência de defeito do rolamento .	37
Quadro 3 – Lista de parâmetros das equações de frequência de defeitos em rolamentos.	38

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	Objetivo	13
1.2	Justificativa	13
1.3	Organização do trabalho	17
2	REFERENCIAL TEÓRICO	19
2.1	Definições e tipos de manutenções	22
2.1.1	Manutenção corretiva	22
2.1.2	Manutenção preventiva	22
2.1.3	Manutenção preditiva	23
2.2	Técnicas de medições e análise de vibrações	24
2.2.1	Nível global de vibrações	25
2.2.2	Fator de crista	26
2.2.3	Análise espectral	27
2.2.4	Densidade espectral de potência	29
2.3	Análises de vibrações em rolamentos	29
2.3.1	Tipos e características de rolamentos	29
2.3.2	Causas de vibrações em rolamentos	31
2.3.3	Frequências de defeitos em rolamentos	34
2.3.4	Quatro estágios de falhas em rolamentos	38
3	MATERIAIS E MÉTODOS	41
3.1	Materiais	41
3.1.1	Bancada didática de transmissão de movimento de três eixos	41
3.1.2	Medidor de Vibração Fluke 805 FC	43
3.1.3	Acelerômetro axial PCB 352C03	45
3.1.4	Módulo de aquisição de dados NI9234	46
3.1.5	LabVIEW	47
3.2	Métodos	48
4	RESULTADOS	52
4.1	Determinação das frequências críticas do rolamento	52
4.2	Medições, análises e discussões	53

4.2.1	Rolamento sem defeito induzido (condição 0)	54
4.2.2	Rolamento com defeito induzido na pista externa (condição 1)	62
4.2.3	Rolamento com aumento do defeito induzido na pista externa (condição 2)	64
4.2.4	Rolamento sem defeito induzido (condição 3)	66
4.2.5	Rolamento com defeito induzido na pista interna (condição 4)	72
4.2.6	Dados Fluke	75
5	CONCLUSÕES	77
	REFERÊNCIAS	80

1 INTRODUÇÃO

A sobrevivência das organizações está relacionada diretamente com a capacidade de inovação e com o modo de resolução dos problemas. As organizações vêm buscando novas formas de gestão para melhorar a produtividade, a qualidade dos produtos, a confiabilidade e a disponibilidade dos equipamentos. Deste modo, a manutenção como função estratégica, desempenha papel fundamental (OTANI; MACHADO, 2008). A manutenção consiste em uma série de atividades planejadas com o objetivo de prevenir falhas, corrigir problemas existentes e otimizar o desempenho geral dos ativos (KARDEC; NASCIF, 2009). Os principais tipos de manutenção são a corretiva, a preventiva e a preditiva.

A manutenção preditiva é uma prática de gestão que visa prevenir danos e prever falhas em máquinas e seus componentes. Baseia-se no monitoramento e análise periódica de parâmetros de desempenho. Os parâmetros mais utilizados são temperatura, pressão, umidade e vibração (GREGÓRIO; SILVEIRA, 2018). Em geral, os valores dos parâmetros monitorados são comparados com valores padrões definidos em normas que mostram a tendência de falha. Diferentemente da manutenção corretiva que ocorre após a falha, a manutenção preditiva permite antecipar eventuais problemas, reduzindo o custo de reparo e o tempo de máquina parada (NEPOMUCENO, 1989). Uma das vantagens da aplicação da manutenção preditiva é a possibilidade de intervir na máquina de forma programada. Evitando interrupções indesejadas e aumentando a disponibilidade da máquina. Outra vantagem é a contribuição para o aumento da vida útil dos equipamentos, devido a identificação e correção dos defeitos em estágios iniciais.

A adoção da manutenção preditiva permite a identificação precoce do problema, monitora a condição das máquinas e seus componentes a fim de se planejar e executar a manutenção no melhor momento, pensando na demanda produtiva, na evolução do defeito e na disponibilidade da equipe da manutenção (GREGÓRIO; SILVEIRA, 2018). O monitoramento contínuo das máquinas também permite reduzir o risco de acidentes, garantindo a segurança e o bem-estar dos colaboradores. As técnicas de medições costumam ser realizada por ensaios não invasivos, ou seja, é possível monitorar e diagnosticar a máquina sem interferir em seu funcionamento.

A análise de vibração pode ser considerada como um dos métodos mais completos para o monitoramento da condição da máquina (RAO, 2009; INMAN, 2018). O monitoramento regular da vibração da máquina permite a detecção de rolamentos deteriorados ou defeituosos, engrenagens gastas ou quebradas. Também permite a detecção de desalinhamento e desbalanceamento antes da falha se propagar para o rolamento ou para a engrenagem.

Todas as máquinas rotativas produzem vibrações devido ao desalinhamento e desbalanceamento das partes rotativas. Medir a amplitude da vibração em certas frequências pode fornecer informações valiosas sobre a precisão do alinhamento e balanceamento do eixo, a condição dos rolamentos ou engrenagens e efeitos sobre a máquina da ressonância decorrente de outros componentes. A medição de vibração é um método eficaz e não invasivo para

monitorar a condição da máquina durante partidas, desligamentos e operação normal. A análise de vibração é usada principalmente em equipamentos rotativos, como turbinas a vapor e a gás, bombas, motores, compressores, máquinas de papel, laminadores, máquinas-ferramentas e caixas de engrenagens (GIRDHAR, 2004).

Tendo em vista o grande número de métodos e técnicas disponíveis para monitoramento e análise de falhas bem como as diversas fontes causadoras de vibrações em máquinas, delimita-se o presente trabalho ao estudo das técnicas de monitoramento do nível de vibração e diagnóstico de falhas em rolamentos.

Rolamentos são componentes amplamente utilizados em máquinas como motores, bombas, compressores e outros equipamentos rotativos. Porém, estes componentes estão sujeitos a desgaste, fadiga, falhas ao longo do tempo por diversos fatores, como o desalinhamento, falta de lubrificação, carga excessiva, danos no processo de montagem, entre outros. Devido a alta aplicação e a importância no funcionamento geral, o rolamento foi o elemento escolhido para estudo. A partir de um estudo das vibrações em rolamentos, é possível diagnosticar precocemente falhas e desgastes, evitando assim a parada indesejada da máquina.

Para compreender o uso das técnicas de monitoramento e análise de vibrações na manutenção preditiva de rolamentos, foi utilizada a bancada didática de transmissão de movimentos mostrada na figura 1.

Figura 1 – Bancada didática de transmissão de movimentos



Fonte: Autoria própria (2024).

A bancada é formada por um eixo principal acionado por meio de uma correia conectada a um motor monofásico. O eixo principal tem em uma das suas extremidades uma polia e na outra extremidade uma engrenagem livre. Além disso o eixo principal é suportado por dois mancais. O mancal que contém o rolamento monitorado está destacado em vermelho na figura 1.

Para monitorar o rolamento são utilizados acelerômetro e vibrômetro. Falhas são induzidas em quatro rolamentos diferentes para se entender os tipos de defeitos e estágios de vida de um rolamento. As frequências críticas do rolamento são analisadas por meio de respostas

em frequências obtidas com o acelerômetro. Medidas globais de vibrações obtidas com o acelerômetro são comparadas com medidas obtidas com o vibrômetro.

1.1 Objetivo

O objetivo geral deste trabalho é estudar e aplicar técnicas de medições e análise de vibrações para o monitoramento, diagnóstico e previsão de falhas em rolamentos.

Tendo em vista o objetivo geral, tem-se os seguintes objetivos específicos:

- entender os principais métodos de medição e análise de vibrações usadas no monitoramento de falhas em rolamentos;
- compreender os tipos e características de rolamentos bem como as principais causas de vibrações nesses componentes;
- aprender a realizar medidas com vibrômetro;
- saber aplicar técnicas de análise de vibração no domínio do tempo e no domínio da frequência;
- aprender a realizar medidas com acelerômetro piezoelétrico, bem como entender aspectos relacionados a especificação, calibragem e aquisição de sinais de tal sensor;
- conhecer e programar o *software LabVIEW* para realizar o pós processamento dos sinais obtidos com os sensores;
- ser capaz de identificar defeitos em rolamentos com as técnicas estudadas, bem como entender as limitações de tais técnicas e métodos.

1.2 Justificativa

A implementação de um sistema de manutenção preditiva baseado em análise de vibrações oferece vantagens significativas que vão além da simples detecção de falhas em rolamentos. Um dos principais benefícios é a extensão da vida útil dos equipamentos. Ao identificar e corrigir problemas antes que eles se tornem críticos, é possível reduzir o desgaste excessivo e evitar falhas catastróficas, o que aumenta a durabilidade dos ativos.

Outro aspecto importante é a redução do nível de ruído no chão de fábrica. Equipamentos em mau estado geralmente geram mais vibração e, conseqüentemente, mais ruído, o que pode afetar a segurança e o conforto dos trabalhadores. A manutenção preditiva ajuda a manter os níveis de vibração e ruído dentro de limites aceitáveis, criando um ambiente de trabalho mais seguro e confortável.

Além disso, a manutenção preditiva pode levar a uma redução significativa nos custos de manutenção. Em vez de realizar manutenções baseadas em intervalos fixos ou reativas, que podem levar a paradas inesperadas e altos custos de reparo, a abordagem preditiva permite que as intervenções sejam feitas de forma planejada e oportuno, minimizando o tempo de inatividade e os custos associados.

Este trabalho responde à demanda da empresa FAST ARIAM EQUIPAMENTOS, que busca implementar um plano de manutenção preditiva para seus equipamentos mais críticos. A análise de vibrações será aplicada não apenas para detectar falhas em rolamentos, mas para fornecer uma visão abrangente da condição dos equipamentos, possibilitando a otimização das práticas de manutenção e contribuindo para a eficiência operacional geral.

Portanto, a justificativa para a implementação da manutenção preditiva através da análise de vibrações está ancorada em benefícios substanciais como a melhoria da vida útil dos equipamentos, a redução do nível de ruído, a diminuição dos custos de manutenção e a satisfação das necessidades específicas da empresa.

Muitos trabalhos tratam do uso da análise de vibrações para a manutenção preditiva. Antonioli (1999) defende que a vibração é o melhor indicador de desempenho das máquinas. Entre as condições possíveis de analisar, destaca-se o balanceamento, alinhamento, estabilidade, tensões dinâmicas e o estado do rolamento. Antonioli (1999) propôs um acompanhamento de medidas de vibração em mancais de rolamentos do tipo 6305, os valores foram coletados em determinados estados de utilização do mesmo. Comparou os resultados obtidos com o equipamento B & K 2513 e o Tektronix 2630 utilizando as técnicas de fatores de crista, análise espectral e do envelope para entender, de fato, a sensibilidade dos equipamentos.

Em tese de doutorado, Almeida (2007) desenvolve uma pesquisa com a aplicação da técnica de reconhecimento de padrões em diagnóstico de falhas em rolamentos através da análise de vibrações. O trabalho busca entender a influência da variação de parâmetros como lubrificação e rotação nas respostas de vibrações utilizando o método fatorial. Foram analisados também os principais parâmetros estatísticos de medida de vibração como RMS, pico a pico, fator de crista, entre outros. Então compara-se os resultados e é apresentado quais são mais sensíveis as variações de rotação e lubrificação. Após esses passos, o autor utiliza a técnica de reconhecimento de padrão para permitir o reconhecimento automático do defeito em rolamentos pela análise de vibração.

A pesquisa investiga se a variação dos parâmetros como rotação, carga e lubrificante (lubrificação) e a combinação entre eles são significativas nas respostas de vibrações (amplitudes em pico), através do Método Fatorial. Esta técnica também mostrou qual o parâmetro (carga, lubrificante/lubrificação e rotação) ou a combinação entre eles influenciou mais significativamente a amplitude do sinal de vibração. Também foram analisados, quais os parâmetros estatísticos como RMS, Pico, Fator de Defeito, Fator de Crista, Fator de Forma, Fator de Folga, Curtose são mais sensíveis à variação da rotação e carga, com o intuito de reduzir o espaço padrão na aplicação da técnica de Reconhecimento de Padrão. Depois aplicou-se a técnica de Reco-

nhecimento de Padrão para o reconhecimento automático do defeito do rolamento através da Análise de Vibração. A análise experimental foi realizada no laboratório de Vibrações e Acústica da Universidade Federal de Itajubá, utilizando os métodos mencionados acima. Esta pesquisa poderá ser futuramente implementada em um sistema on-line para medidas e diagnósticos de defeitos em rolamentos.

Segundo Mercuri, Martins e Trautmann (2011), é possível desenvolver um sistema para realizar a monitoração de vibração mecânica em motores elétricas para aplicação da manutenção preditiva. Foi utilizado a plataforma LabView, que é um software que auxilia o trabalho da engenharia, facilitando a obtenção e a interpretação dos resultados. De modo que, possibilite a verificação da condição do motor e a identificação de eventuais defeitos através da análise dos sinais. Para efeito de validação do método, um protótipo que permitia a inserção de falhas foi desenvolvido.

Cavalcante e Jesus (2011) apresenta um estudo de caso realizado na Refinaria Landulpho Alves (RLAM) - PETROBRAS, mostrando ser possível a análise de comportamentos dinâmicos em máquinas rotativas por meio de técnicas experimentais. A bancada de ensaio consiste em 2 mancais de deslizamento postos a prova a fim de fornecer a resposta do sistema quando inserido alguma falha. O trabalho de Cavalcante e Jesus (2011) discute a importância de conhecer o comportamento dinâmico das máquinas rotativas e apresentará um estudo de caso que envolve a análise experimental de um conjunto de máquinas, visando compreender e identificar os principais fenômenos que podem afetar o desempenho desses equipamentos.

Em seu trabalho de conclusão de curso, Marçal e Santos (2013) descreve sobre os diferentes tipos de manutenção utilizados nas indústrias do setor madeireiro. Marçal e Santos (2013) propôs um método para generalizar o plano de manutenções para empresas de todos os portes, porém, viu que não era viável generalizar de tal forma, por conta do alto investimento necessário para incorporar essa forma de manutenção, seja na aquisição de equipamentos ou na terceirização de serviços.

Em sua tese de doutorado, Santander (2014) diferencia as técnicas possíveis para a análise de vibrações, especificamente em rolamentos e em mancais de rolamentos. A técnica chave é a do envelope, o autor explica todo o processo para a obtenção de valores que resultem na localização da falha e no grau da falha, focando principalmente na técnica de demodulação por curtose espectral. Após a apresentação e caracterização dos métodos, uma metodologia é proposta, de modo que seja retirado os valores discretos de frequências, só então um método de predição linear é implementado para realçar os sinais.

Carvalho, Sales e Zandon (2015) abordam o uso do cálculo diferencial e integral com foco nas aplicações em vibrações mecânicas. Inicialmente definem o que é vibração mecânica como sendo um deslocamento referente a posição de equilíbrio do sistema. As componentes amplitude e frequência de vibração, são apresentadas como sendo respectivamente, o ponto máximo alcançado e a quantidade de vezes que esse ponto máximo ocorre no ciclo. O ponto chave do trabalho está em torno do artifício da derivada para a obtenção da velocidade e da ace-

lação a partir de um deslocamento. Com isso, os autores mostram a possibilidade de análise do comportamento dinâmico das vibrações. A importância da análise de vibrações nas indústrias é defendida. Coletas de dados devem ser realizadas por meio de um sensor estrategicamente posicionado que transformará a energia mecânica em sinal elétrico e então esse sinal é enviado para um analisador de vibrações, onde pode ser identificado o problema.

Em dissertação de mestrado, Holanda (2016) descreve a importância da análise de vibrações em equipamentos. Embora a vibração seja essencial em determinadas atividades, na maior parte dos casos estão relacionadas a anormalidades que representam algum tipo de risco, seja financeiro, operacional ou de segurança. Defende a análise de vibração como um indicador da condição da máquina, ajudando os profissionais da manutenção na tomada de decisões. O estudo em si, propõe a manutenção preditiva por análise de vibrações em um trem da Companhia Brasileira de Trens Urbanos, na cidade de Recife-PE. Apresenta também as melhorias na adoção dessa nova forma de manutenção.

Galli (2017) aborda o monitoramento de vibração como uma estratégia de manutenção preditiva para equipamentos rotativos. Discute os diferentes tipos de manutenção e foca na manutenção preditiva por análise de vibração, apresentando as principais falhas e os modos de detecção delas. O estudo de caso é realizado com a utilização de uma bomba centrífuga acionada por um motor de indução. Os dados foram coletados em uma empresa que possui um programa de monitoramento dos valores de vibração e após análise, os resultados deixam claro a eficiência do método de avaliação de vibrações, como uma técnica da manutenção preditiva em equipamentos rotativos.

Rolamentos de esferas são considerados críticos em muitas máquinas rotativas e em diversos setores, como por exemplo, nas indústrias químicas, na aviação, em usinas nucleares, entre outros. O monitoramento e a análise da vibração são aliados do plano de manutenção preditiva. A condição do rolamento é facilmente identificada pela assinatura de vibração ocasionada. Essa assinatura permite o diagnóstico de falhas em rolamentos (KRISHNA; VISHWAKARMA, 2018).

Os autores Jain e Bhosle (2021) apontam as falhas em rolamentos como uma das principais causas de falhas nas máquinas. Logo, deve-se identificar os defeitos em estágios iniciais para não comprometer o funcionamento da máquina. Mostram a possibilidade de obtenção da condição dos rolamentos pelas vibrações emitidas por eles. Este artigo apresenta as técnicas utilizadas para a determinação da vibração do sistema, além de auxiliar no entendimento dos avanços recentes, das técnicas de detecção de defeitos, em rolamentos por excesso de vibração.

Segundo Lima (2019) a manutenção preditiva é uma ferramenta poderosa para o monitoramento da condição das máquinas, visando melhor desempenho e vida útil. A análise de vibração dos mancais de um conjunto motor-bomba que não apresenta um bom desempenho permite o entendimento do problema e a possibilidade de planejar a manutenção antes da falha tornar-se catastrófica. O trabalho propõe uma metodologia de análise de vibração em diversos

mancais. Identifica os mancais em situações críticas e analisa de forma detalhada o estágio do desgaste do rolamento. Caso apresente um desgaste elevado, o rolamento será imediatamente substituído de modo a evitar a falha.

Junior e Braga (2021) propõe a implementação de um plano de manutenção preditiva utilizando técnicas de análise como vibração, ultrassom e termografia em uma empresa do setor automobilístico. Tem por objetivo a otimização da operação da planta industrial, redução de custos e aumento dos fatores confiabilidade e segurança. Os autores fizeram um levantamento dos equipamentos que serão monitorados, são eles, exaustores, compressores, bombas centrífugas, motores elétricos, linha de distribuição de eletricidade e ar comprimido. O processamento de dados incluiu o mapeamento desses ativos, a definição dos parâmetros para a medição, coleta de dados, tratamento de dados em um software de engenharia e emissão de laudos.

Tiboni *et al.* (2022) apresenta um levantamento bibliográfico completo do estudo de diagnósticos de vibrações em máquinas rotativas. Os autores deixam claro que é possível analisar a vibração das máquinas para apresentar um diagnóstico do problema. Isso torna-se possível, pois os defeitos seguem um padrão específico e esse padrão pode ser obtido através dos sinais de vibração. Em seguida, os autores fazem uma análise das diferentes técnicas, de modo que seja possível verificar a eficácia dos métodos quando comparados com os resultados obtidos. Por fim, concluem o artigo fazendo uma abordagem sobre as tendências de pesquisas e inovações na área.

Rolamentos de rolos são utilizados em diversos campos devido à sua baixa perda por atrito, alta capacidade de carga, ótima precisão e alta eficiência. Os autores Wu *et al.* (2022) trazem uma revisão bibliográfica completa acerca dos estudos sobre detecção de falhas em rolamentos de rolos. No decorrer do artigo é abordado os tipos de falhas em rolamentos, a localização das falhas, e a análise das falhas. Um estudo é feito com base nas formas de se obter as respostas de falhas. Chega-se a um resultado que mostra que esses métodos têm taxa de detecção variando de 70% a 100%. Também comenta acerca de novas tecnologias para detecção e diagnóstico de falhas utilizando uma inteligência artificial.

1.3 Organização do trabalho

O capítulo 1 apresenta uma breve introdução sobre manutenção preditiva, as motivações e justificativa para o estudo de técnicas de medidas e análise de vibração, bem como os objetivos gerais e específicos deste trabalho. Além de um levantamento bibliográfico sobre os principais trabalhos relacionados a manutenção preditiva por análise de vibrações, tendo dado foco ao trabalhos sobre manutenção de rolamentos.

O capítulo 2 apresenta o referencial teórico deste trabalho. Na seção 2.1 é descrito os tipos de manutenção, bem como as vantagens e desvantagens de cada tipo. Na seção 2.2 é descrito as técnicas de análise de vibração bem como um estudo dos algoritmos de processa-

mento de sinais. Na seção 2.3 é descrito os tipos e características de rolamento, bem como as fontes causadoras de vibrações em rolamentos.

O capítulo 3 apresenta a metodologia do trabalho. Na seção 3.1 é descrito os materiais utilizados neste trabalho: bancada didática de transmissão de movimento, sensor medidor de vibração, sensor acelerômetro triaxial, *software* LabVIEW e *software* MATLAB. Na seção 3.2 é descrito o método proposto para o monitoramento e análise de vibrações dos rolamentos da bancada de teste bem como o cronograma de trabalho.

O capítulo 4 apresenta os resultados obtidos a partir dos experimentos realizados com os rolamentos em diferentes condições. Inicialmente, são mostrados os espectros de vibração para os rolamentos sem defeito e com defeito induzido, utilizando a metodologia descrita no capítulo anterior. Os dados foram coletados utilizando o acelerômetro PCB352C03 e o módulo de aquisição NI9234, com análise detalhada das frequências críticas e dos picos observados nos gráficos de Densidade Espectral de Potência (PSD). São apresentados e discutidos os resultados das medições realizadas com o equipamento FLUKE 805FC, destacando as limitações encontradas na obtenção de conclusões precisas. Além disso, são analisados os resultados das diferentes condições de rotação (600 rpm, 1200 rpm e 1800 rpm) e como essas variações afetam a resposta em frequência dos rolamentos. O capítulo também inclui comparações entre as condições normais e defeituosas, enfatizando a importância da identificação precoce de defeitos para a manutenção preditiva.

O capítulo 5 deve ser dedicado às discussões dos resultados e conclusões do trabalho. Nesta seção, será discutido como os dados coletados e analisados contribuem para a compreensão da detecção de defeitos em rolamentos utilizando técnicas de análise de vibração. Será destacada a eficácia das metodologias utilizadas, bem como as limitações encontradas durante o processo com a incerteza nos dados de vibração devido à falta de uma calibração recente dos sensores. Além disso, serão discutidas as implicações dos resultados para a prática industrial, sugerindo como as técnicas de monitoramento e análise de vibrações podem ser implementadas para melhorar a manutenção preditiva de rolamentos. Por fim, serão apresentadas as conclusões gerais do estudo, ressaltando a importância da análise de vibrações para a detecção precoce de defeitos e propondo recomendações para trabalhos futuros.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Conforme Kardec e Nascif (2009), a manutenção foi o processo de gestão mais modificado com a evolução dos meios produtivos devido ao rápido crescimento da quantidade e complexidade dos produtos produzidos. Diversos fatores devem ser considerados em uma boa gestão da manutenção, entre os quais podem ser citados a disponibilidade ¹, a confiabilidade ², a qualidade e o custo. O quadro 1 adaptado de Kardec e Nascif (2009) resume a evolução da manutenção. Características das quatro gerações são apresentadas a seguir.

A primeira geração da manutenção ocorreu aproximadamente entre o final da Primeira Guerra Mundial e final da Segunda Guerra Mundial. Nessa época os países sofriam gravemente com as crises econômicas, afetando diretamente as indústrias e a forma de produção. Não se armazenava mais produtos, a produção ocorria conforme a demanda, fato que promoveu a busca por melhorias na qualidade dos produtos. Em paralelo com as máquinas simples, caminhava a manutenção corretiva não planejada, de modo que o pensamento da época era que tudo eventualmente falhará, logo o que se buscava era a habilidade para a manutenção imediata Kardec e Nascif (2009).

A segunda geração da manutenção iniciou-se no período pós Segunda Guerra Mundial. Nesse período ocorreu um aumento da mecanização, processo necessário para aumentar a produtividade e suprir toda a demanda de produtos Kardec e Nascif (2009). Justamente por conta da necessidade de produção, as máquinas eram levadas ao limite, interrompendo a produção. Observando que a mesma parada para manutenção era um problema grande, alguns indicadores passaram a ser estudados buscando melhor produtividade, como por exemplo a confiabilidade e a disponibilidade, resultando no que hoje é conhecido como manutenção preventiva. Foi constatado um aumento no custo de manutenção, principalmente quando comparado com outros custos operacionais. Logo, foi necessário aumentar o planejamento e controle de manutenção para que fosse possível aumentar a vida útil dos equipamentos.

A terceira geração da manutenção que iniciou-se a partir da década de 70, período caracterizado pelo emprego do sistema *just-in-time*. De acordo com Moura, Ruzene e Silva (2017), o sistema *just-in-time* baseia-se na ideia de produção conforme demanda, no qual os produtos manufaturados não são armazenados. Desse modo, era possível controlar melhor os custos, aumentar a eficiência produtiva e reduzir desperdícios, fazendo com que cada processo seja realizado com a quantidade exata de matéria-prima, no tempo e no lugar adequado.

A quarta geração da manutenção iniciou-se na década de 2000. Foi uma fase com grande avanço na área de automação. Logo, tendo máquinas mais sofisticadas e mais comple-

¹ Conforme Silveira (2012), disponibilidade refere-se à capacidade de um sistema ou recurso estar operacional e disponível quando necessário. Ou seja, pode ser expressada como uma porcentagem do tempo que a máquina está funcionando corretamente em relação ao tempo total.

² Conforme Silveira (2012), confiabilidade refere-se à capacidade de um componente realizar sua função de forma consistente e livre de falhas ao longo do tempo. Ou seja, é a probabilidade de um item desempenhar sua função específica durante um intervalo de tempo.

Quadro 1 – Evolução da manutenção

EVOLUÇÃO DA MANUTENÇÃO				
GERAÇÕES	1ª GERAÇÃO	2ª GERAÇÃO	3ª GERAÇÃO	4ª GERAÇÃO
Aumento das expectativas em relação à manutenção	Conserto após a falha	Disponibilidade crescente Maior vida útil do equipamento	Maior confiabilidade Maior disponibilidade Melhor relação custo-benefício Preservação do meio ambiente	Maior confiabilidade Maior disponibilidade Preservação do meio ambiente Segurança Influir nos resultados do negócio Gerenciar os ativos
Visão quanto à falha do equipamento	Todos os equipamentos se desgastam com a idade e, por isso, falham	Todos os equipamentos se comportam de acordo com a curva da banheira	Existência de 6 padrões de falhas	Reduzir drasticamente falhas prematuras
Mudança nas técnicas de manutenção	Habilidades voltadas para o reparo	Planejamento manual da manutenção Computadores grandes e lentos Manutenção preventiva (por tempo)	Monitoramento da condição Manutenção preditiva Análise de risco Computadores pequenos e rápidos Softwares potentes Grupos de trabalho multidisciplinares Projetos voltados para a confiabilidade Contratação de mão de obra e serviços	Aumento da manutenção preditiva e monitoramento da condição Minimização nas manutenções preventiva e corretiva não planejada Análise de falhas Técnicas de confiabilidade Manutenibilidade Engenharia de manutenção Projetos voltados para confiabilidade, manutenibilidade e custo do ciclo de vida Contratação por resultados

Fonte: Adaptado de Kardec e Nascif (2009).

As máquinas, era necessário um cuidado maior para que essas máquinas apresentassem bons índices de disponibilidade e confiabilidade. Nesse contexto, a utilização da manutenção preditiva foi essencial para o monitoramento e realização da manutenção. É nessa geração que se consolida o setor da Engenharia da Manutenção. São esses os responsáveis por garantir a disponibilidade e a confiabilidade do maquinário (KARDEC; NASCIF, 2009).

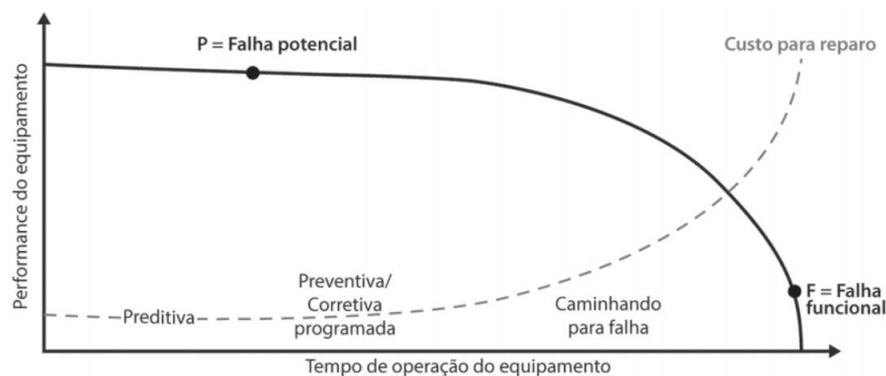
A partir da quarta geração da manutenção e com o avanço da Engenharia de Manutenção novos processos passam a ser utilizados. Um importante processo é a Análise de Falhas, também conhecido como análise da causa raiz. É um processo utilizado para identificação de causas de falhas em um produto. Basicamente, busca encontrar a causa raiz do problema, evitando assim uma nova parada de mesma característica (PASSAMAI; CASTILHO, 2007). O processo de análise de falhas pode estar inserido no projeto desde sua idealização.

A curva potencial de falha (curva PF) é um gráfico que possibilita a compreensão do fator redução de desempenho da máquina por alguma falha possível de identificar com o passar do tempo. Essa falha emite alguns sinais que se torna possível de observar com alguns equipamentos específicos e pessoal qualificado. Quanto antes o defeito for descoberto, menor a chance de falha funcional do equipamento analisado.

Na figura 2 é possível compreender a relação da evolução da falha com o aumento do custo para realização da manutenção. A curva contínua mostra a queda no desempenho do equipamento com o passar do tempo de operação, visto que, no ponto P, torna-se possível a identificação de falhas potenciais, até chegar ao ponto F, que é a falha funcional. Ponto no qual o ativo deixa de executar suas funções com eficiência. A curva tracejada mostra a evolução do custo de reparo em comparação com a queda do desempenho do equipamento, ou seja, conforme a falha se desenvolve e tem performance de funcionamento reduzida, os custos de manutenção aumentam.

O custo da manutenção preditiva tem o menor valor associado, isso ocorre devido à manutenção preditiva ser baseada na condição, ou seja, é possível monitorar o funcionamento da máquina com certa regularidade, assim que algo não estiver funcionando corretamente, o defeito será identificado em seu estágio inicial. A manutenção preventiva por outro lado, baseia-se em limites pré-estabelecidos de funcionamento, seja de tempo ou horas de operação, porém, nem todos os equipamentos tem a mesma vida útil, logo, tem um custo mais alto associado às perdas de vida útil. A manutenção corretiva é o pior cenário, o custo para reparo do equipamento torna-se muito maior (TELES, 2019).

Figura 2 – Curva PF X Custo de reparo



Fonte: Adaptado de Teles (2019).

2.1 Definições e tipos de manutenções

A seguir são apresentados as definições e tipos de manutenções.

2.1.1 Manutenção corretiva

De acordo com Kardec e Nascif (2009), a manutenção corretiva é o processo de restauração de função que ocorre após surgimento de falhas ou até mesmo ao apresentar queda no desempenho. Pode-se dividir a manutenção corretiva em dois tipos: não programada e programada.

A manutenção corretiva não programada ou emergencial ocorre no momento de identificação de falhas e apresentam várias desvantagens, entre elas, destacam-se:

- Altos custos;
- Perda de produção;
- Diminuição na qualidade dos produtos;
- Elevados custos indiretos da manutenção.

A manutenção corretiva programada consiste na correção de falhas previamente identificadas. Processo no qual será organizado previamente para impactar minimamente o funcionamento (KARDEC; NASCIF, 2009).

Conforme Antonioli (1999), a manutenção corretiva pode ser adequada em alguns casos específicos, mesmo na atualidade, quando ocorre a utilização de equipamentos duplicados; quando existe viabilidade de armazenar peças de reposição; e em instalações de baixo custo.

2.1.2 Manutenção preventiva

Segundo Kardec e Nascif (2009), a manutenção preventiva é a ação realizada de forma a reduzir ou evitar a falha ou queda no desempenho, obedecendo a um plano previamente elaborado, baseado em intervalos definidos de tempo. À medida que a manutenção corretiva opera de maneira geral após o surgimento da falha, a manutenção preventiva evita a ocorrência de problemas para agir. É uma forma de se prevenir e também de aumentar o fator confiabilidade e o fator segurança da máquina.

Em geral, em um plano de manutenção preventiva é necessário estar discriminado a expectativa de degradação dos componentes e a periodicidade de substituição de cada um deles. Além disso, deve-se levar em consideração as condições operacionais e climáticas. Condições estas que influenciam na vida útil dos componentes. Conforme Gregório e Silveira (2018), cri-

térios específicos para a realização da manutenção preventiva envolvem o tempo, horas de funcionamento, produtividade e misto.

No critério tempo, um determinado prazo de tempo para a manutenção é estipulado. No critério horas de funcionamento é contado o tempo de operação, o tempo de máquina parada não é considerado. O critério produtividade considera a quantidade de peças produzidas. A máquina somente será interrompida quando produzir o valor previamente estabelecido. O critério misto considera um ou outro dos critérios apresentados.

Conforme Kardec e Nascif (2009) algumas das desvantagens da manutenção preventiva é que muitas vezes a peça substituída não operou dentro dos limites corretos de tempo. Algumas das vezes sendo substituída antes do fim de sua vida útil, manutenção prematura, outras, substituídas após ultrapassar às condições mínimas para utilização. Outra desvantagem é a introdução de defeitos causados por falhas humanas.

2.1.3 Manutenção preditiva

A manutenção preditiva, também conhecida como manutenção baseada na condição é definida por Kardec e Nascif (2009) como a ação realizada devido a mudança nos parâmetros de condição ou desempenho dos ativos. Entre os principais parâmetros monitorados estão a temperatura, lubrificação, som e vibração. Esses parâmetros são fundamentais para garantir a eficácia da manutenção preditiva, pois permitem a identificação precoce de anomalias que poderiam evoluir para falhas críticas.

Assim como as outras formas de manutenção, a preditiva apresenta vantagens e desvantagens. Entre as principais vantagens, destaca-se a redução da quantidade de falhas nos equipamentos, maior disponibilidade dos equipamentos, aumento da produtividade, aumento da vida útil dos equipamentos e a redução de custos. A principal desvantagem é o custo inicial que pode ser elevado.

O princípio da manutenção preditiva é a realização da manutenção somente quando necessário, aproveitando o item durante toda a vida útil Gregório e Silveira (2018). Através de técnicas de análise e monitoramento, é possível identificar alterações no funcionamento do equipamento, permitindo intervenções antes que os problemas se tornem críticos.

Dentre as técnicas de monitoramento utilizadas na manutenção preditiva, o monitoramento de temperatura é uma das mais comuns. Esse monitoramento pode ser realizado por meio de uma câmera infravermelha que detecta a radiação emitida pelos componentes. Essa técnica possibilita a identificação de anomalias térmicas que podem indicar falhas em diversos tipos de equipamentos, como motores elétricos, transformadores, disjuntores e rolamentos. A realização rotineira de inspeções termográficas, conforme indicado por Antonioli (1999), é essencial para o acompanhamento de eventuais alterações térmicas. Entre as vantagens desse monitoramento, destacam-se a detecção precoce de falhas, a redução do tempo de parada, o aumento da segurança e a diminuição dos custos de manutenção.

Outro parâmetro crucial é o monitoramento da lubrificação, que envolve técnicas aplicadas à análise do óleo lubrificante da máquina. Este monitoramento permite detectar problemas como o desgaste excessivo de peças e a contaminação do lubrificante. Segundo Antonioli (1999), métodos simples, como o uso de um microscópio ótico para contar partículas ferrosas, podem ser complementados por técnicas mais avançadas, como a ferrografia. A importância de um plano de manutenção bem estruturado, que considere pontos de coleta de óleo e periodicidade das coletas, é fundamental para maximizar os benefícios dessa técnica, como a detecção precoce de problemas, a redução de custos de manutenção, o aumento da disponibilidade dos equipamentos e a segurança operacional.

Além disso, o monitoramento de ondas acústicas, como descrito por Severo, Trojan e Kovalski (2013), utiliza detectores de ultrassom para captar sons industriais que escapam à audição humana. Essa técnica é capaz de identificar problemas como desgaste excessivo, trincas, vazamentos e falta de lubrificação, oferecendo vantagens como a detecção precoce de problemas, a redução dos custos de manutenção, o aumento da disponibilidade dos equipamentos e a segurança.

Por fim, o monitoramento de vibração, uma das técnicas mais utilizadas na manutenção preditiva, permite a avaliação da condição real dos equipamentos. Conforme Antonioli (1999), a análise de vibração pode ser realizada de diversas maneiras, como a análise do nível de vibração global, análise espectral e o uso de parâmetros como envelope e fator de crista. Essa técnica é amplamente utilizada para monitorar a condição de motores, bombas, ventiladores, compressores e redutores, sendo eficaz na detecção de problemas mecânicos como folga em rolamentos, desgaste em engrenagens, desalinhamento e desbalanceamento. A análise de vibração, por ser um método não destrutivo e não invasivo, permite que os dados sejam coletados sem a necessidade de interrupção do processo produtivo, o que a torna uma técnica segura e eficaz para a detecção de problemas em máquinas e equipamentos.

Em suma, o uso dessas técnicas de monitoramento, integradas a um plano de manutenção preditiva, proporciona uma abordagem proativa na manutenção de ativos, contribuindo para a longevidade dos equipamentos, a redução de custos e a segurança operacional.

2.2 Técnicas de medições e análise de vibrações

Os parâmetros quantificados nas medições de vibrações incluem velocidade, aceleração e deslocamento. Esses parâmetros são inicialmente captados por sensores, que convertem as vibrações em sinais elétricos. Se o sinal for digital, ele pode ser diretamente processado por um *software* para análise. No caso de sinais analógicos, eles precisam ser convertidos em digitais por meio de um conversor A/D (analógico-digital) antes de serem processados. A interpretação desses dados permite a identificação de problemas e o planejamento de ações de manutenção.

Além do processamento das informações, outro fator importante é a escolha do ponto adequado para a coleta de dados na máquina. A escolha do ponto adequado permitirá obter a

condição real do equipamento. De modo contrário, a escolha do ponto inadequado resultará em um valor não confiável. Uma boa análise da vibração nos mancais fornecem informações sobre o estado dos rolamentos, a condição de alinhamento e folgas (ANTONIOLLI, 1999).

Outro ponto a ser considerado na coleta de dados que necessita de atenção é o eixo, onde forneceria valores de desbalanceamento e desalinhamento. As engrenagens também fornecem valores importantes, como o desgaste e eventuais falhas nos dentes. A medição de vibração em motores elétricos resultam em informações acerca do desalinhamento, desbalanceamento e falhas em rolamentos. Por último, pode-se medir a vibração na carcaça do equipamento, do qual é possível interpretar os valores para a compreensão sobre a ressonância estrutural e também sobre a fadiga da estrutura (ANTONIOLLI, 1999).

É possível identificar os diferentes defeitos devido à força transmitida e também ao sentido de transmissão dessa força. Ou seja, o movimento vibratório gerado por diferentes defeitos, resulta em diferentes respostas. A análise de vibrações permite obter relacionar as medidas com os possíveis defeitos, por exemplo:

- A amplitude de vibração indica a gravidade da anomalia;
- A frequência de vibração aponta qual o componente ou até mesmo qual a região está originando a vibração;
- A fase de vibração permite a determinação da causa do problema.

Num sistema, muitos componentes vibram, mas estas vibrações serão em diferentes frequências, amplitudes e fases; a análise das vibrações deve ser capaz de identificar as vibrações que se originam das forças ou torques que são transmitidos através do sistema, ou seja, tem energia se alternando entre os componentes.

Os principais métodos de análise de vibrações para monitoramento e diagnóstico de falhas em máquinas são descritos a seguir.

2.2.1 Nível global de vibrações

O método do nível global de vibrações é considerado o primeiro passo do monitoramento de vibrações, uma das formas mais simples de se avaliar a condição de máquinas rotativas (NEPOMUCENO, 1989). Basicamente consistem em medir o valor global de vibrações, obtido por meio de um sensor, no qual, qualquer defeito causará uma mudança no nível global da vibração característica. Essas medições realizadas avaliam a intensidade de vibração e dizem se estão dentro do intervalo aceitável.

A medição periódica de vibrações ocasionará em uma curva de tendências, onde é possível analisar e comparar com medidas padrões para classificar os resultados em três níveis:

- Normal - não há ocorrência de problemas;

- Alerta - aponta eventuais problemas;
- Reparo - indica necessidade de correções de problemas.

Este método não efetua uma análise espectral e também não é sensível a altas frequências, logo, muitos defeitos não são identificados, como por exemplo a falha em rolamentos e em engrenagens. Outro fator inconveniente, é que o método é constituído por um conjunto de vibrações do sistema, ou seja, contém várias frequências e cada uma delas tem influência no valor obtido. Por outro lado, é um método barato, rápido e não há a exigência de pessoal qualificado. Também permite identificar problemas como desbalanceamentos e desalinhamentos grosseiros.

Antoniolli (1999) ressalta a importância de coletar os dados sempre na mesma condição. Com o equipamento trabalhando da mesma forma e sempre coletando os dados nos mesmos pontos.

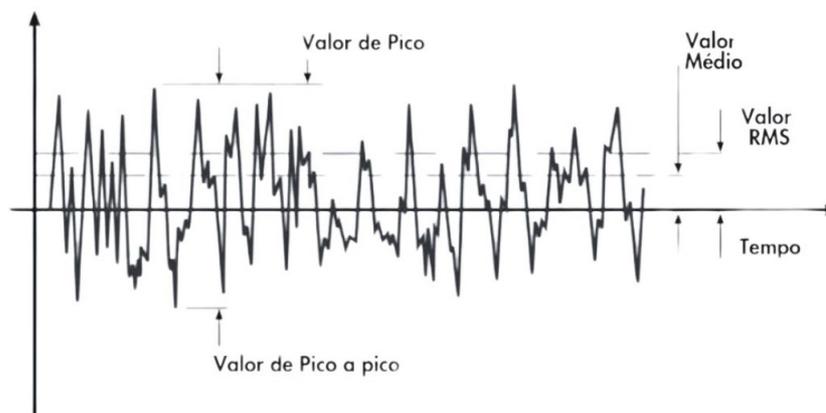
2.2.2 Fator de crista

Fator de crista é definido como sendo a relação do valor de pico com o valor do RMS, dado pela equação 1 que é o valor eficaz e é medido dentro de uma banda de frequência. É considerado um método simples, não é tão elaborado quanto a análise espectral. A principal desvantagem da utilização desta técnica é que ela não determina a localização da falha, apenas indica a existência de uma falha no conjunto.

$$\text{Fator de crista} = \frac{\text{Valor de pico}}{\text{Valor RMS}} \quad (1)$$

A figura 3 mostra o modo de obtenção do valor RMS em uma onda senoidal. Esse valor é a medida mais relevante de amplitude, pois leva em consideração todo o histórico de tempo da onda.

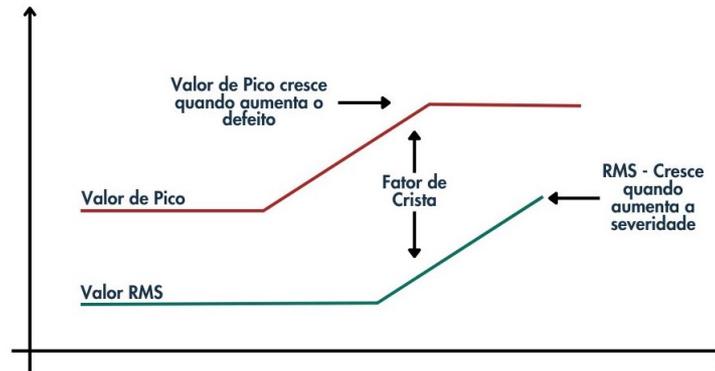
Figura 3 – Relação entre o nível de pico a pico, nível de pico, nível médio e o RMS de uma onda senoidal



Fonte: Adaptado de Kjær (1982).

Na figura 4 é apresentada a relação do fator de crista com os valores de pico e de RMS. É possível observar que conforme o fator de crista aumenta, o valor de pico também aumenta, disto, entende-se que aumentou o defeito. Também pode-se observar que conforme o valor de crista aumenta, o valor de RMS aumenta, ou seja, aumentou a severidade do problema.

Figura 4 – Relação entre fator de crista com valor RMS e valor de pico



Fonte: Adaptado de Teles (2019).

2.2.3 Análise espectral

Segundo Antonioli (1999) o método de análise espectral fundamenta-se na detecção de falhas, tais como tensão de contato excessiva, desalinhamentos e imperfeições, por meio da análise das vibrações geradas por esses problemas. Cada falha gera uma vibração característica em frequências específicas, possibilitando a detecção, acompanhamento da evolução e programação da manutenção no momento mais adequado.

Os valores obtidos são comparados com padrões, proporcionando diversas informações. Por exemplo, a amplitude indica o estado do equipamento, enquanto a frequência revela a natureza do problema. Além disso, a análise espectral fornece o nível de vibração de todas as partes da máquina, uma vantagem significativa que permite a identificação precoce de defeitos (ANTONIOLLI, 1999).

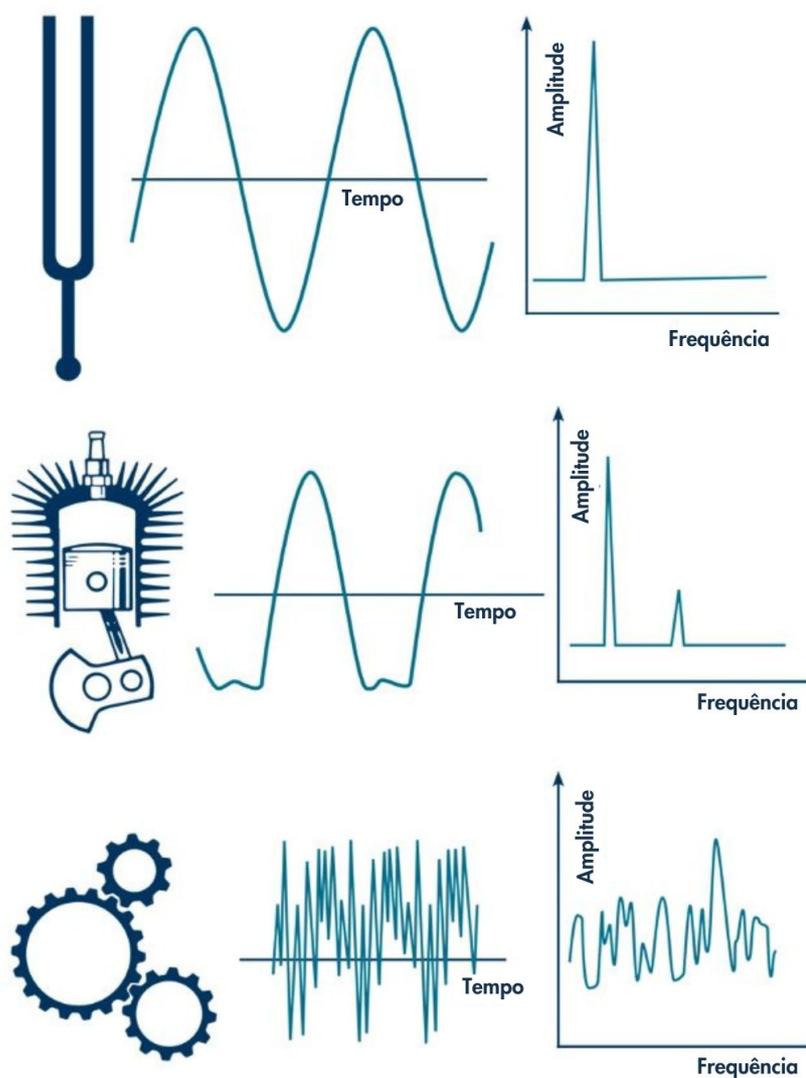
A figura 5 ilustra três diferentes sistemas mecânicos, cada um com suas próprias características de frequência natural. O primeiro elemento, o diapasão, é um exemplo clássico de um sistema que possui apenas uma frequência natural. Quando excitado, ele vibra consistentemente em uma única frequência, produzindo um som puro e estável. Isso o torna ideal para aplicações em que uma referência de frequência precisa e constante é necessária, como na afinação de instrumentos musicais.

O segundo sistema representado é o sistema biela-manivela, que é comumente encontrado em motores a combustão interna. Ao contrário do diapasão, o sistema biela-manivela possui duas frequências naturais típicas. Estas frequências surgem devido à complexidade do movimento envolvido, onde a biela e a manivela estão sujeitas a diferentes forças e movimentos

rotativos e oscilatórios. A presença de múltiplas frequências naturais torna esse sistema mais suscetível a uma variedade de ressonâncias e vibrações indesejadas.

Por fim, o conjunto de engrenagens, representado na figura 5, é um exemplo de um sistema mecânico que pode apresentar várias frequências naturais, dependendo da complexidade e do número de engrenagens envolvidas. Cada engrenagem no sistema pode ter sua própria frequência natural, além de contribuir para as frequências resultantes do contato entre os dentes das engrenagens. Essas frequências combinadas podem gerar padrões vibratórios complexos, exigindo análise detalhada para a identificação de possíveis defeitos ou problemas de alinhamento.

Figura 5 – Gráfico do tempo e da frequência



Fonte: Adaptado de Kjær (1982).

Os espectros padrões, denominados Baseline-e, são obtidos após a análise de uma série de máquinas com características similares e em estado normal de funcionamento. Esses espectros estabelecem um intervalo de valores máximos e mínimos, representando os limi-

tes aceitáveis de variação para o funcionamento das máquinas. Desvios além desses limites indicam a presença de anomalias ou falhas, exigindo investigação e possível intervenção de manutenção.

2.2.4 Densidade espectral de potência

A Densidade Espectral de Potência (PSD) é uma função que descreve como a potência de um sinal ou série temporal é distribuída em função da frequência. Em termos simples, a PSD mostra a intensidade das variações de potência em diferentes frequências dentro de um sinal e permite identificar as frequências que contêm mais energia no sinal, o que pode ser indicativo de defeitos ou irregularidades em componentes mecânicos.

Para calcular a PSD, utiliza-se a Transformada Rápida de Fourier (FFT), que converte o sinal do domínio do tempo para o domínio da frequência. O resultado é um gráfico que apresenta a distribuição da potência do sinal ao longo de uma faixa de frequências, onde o eixo x representa as frequências e o eixo y representa a densidade de potência, como será apresentado nos gráficos do capítulo 4.

A análise da curva PSD é uma ferramenta eficaz para identificar problemas em rolamentos, como defeitos nas pistas interna e externa. Através da análise espectral, é possível identificar picos de vibração em frequências específicas que correspondem a falhas típicas dos rolamentos. Por exemplo, picos nas frequências associadas ao $1 \times \text{BPFO}$ (*Ball Pass Frequency of Outer Race*) e seus harmônicos são indicativos de possíveis defeitos na pista externa do rolamento. A amplitude desses picos fornece informações sobre a gravidade do defeito, permitindo a realização de intervenções preventivas antes que o problema evolua para falhas mais graves. A análise das características dos picos na curva PSD ajuda a distinguir entre diferentes tipos de falhas e a planejar a manutenção de forma mais eficiente.

Em resumo, a PSD é uma ferramenta poderosa para a análise de sinais de vibração, fornecendo informações detalhadas sobre a distribuição de potência em função da frequência, essenciais para a manutenção preditiva e a identificação precoce de problemas em rolamentos e outros componentes mecânicos. (RAO, 2009)

2.3 Análises de vibrações em rolamentos

A seguir são apresentados os tipos e características de rolamentos.

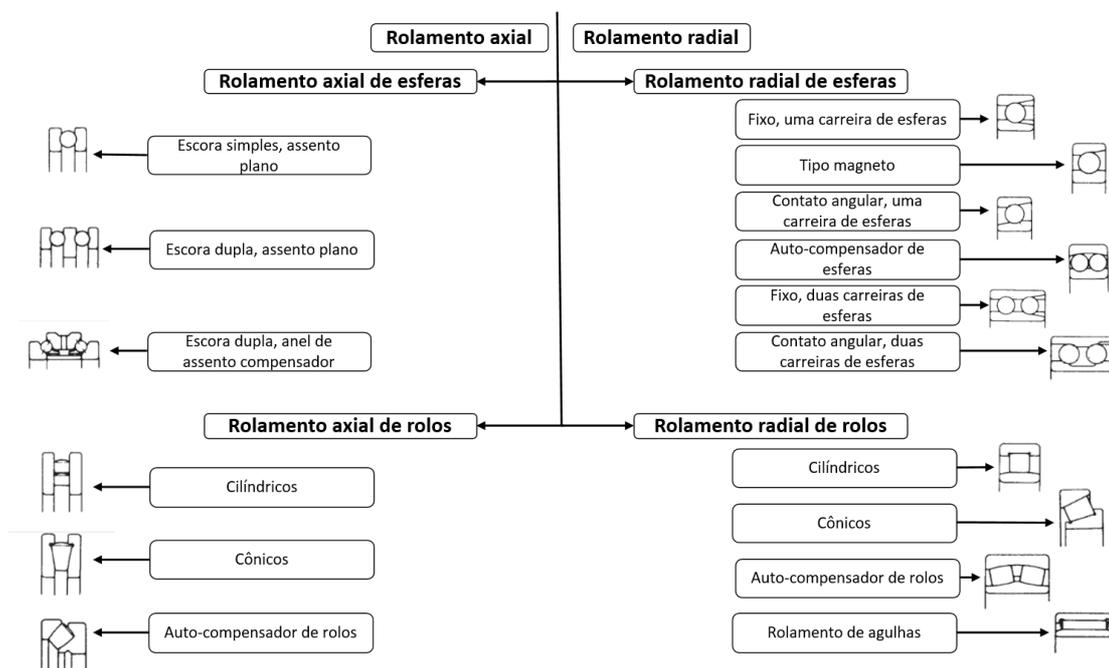
2.3.1 Tipos e características de rolamentos

Rolamentos são elementos mecânicos utilizados para redução do atrito, são projetados para suportarem cargas e facilitar o movimento de rotação ou deslocamento linear de eixos.

Os rolamentos são compostos por anéis internos e externos, que formam as pistas de rolamento, os elementos rolantes, rolos e esferas que ficam entre as pistas. Esses elementos são os responsáveis pela distribuição da carga de forma uniforme, reduzindo o atrito e suavizando o movimento.

Conforme Antonioli (1999), os rolamentos podem ser classificados, de acordo com a carga que suportam, como axiais e radiais. Podem ser, ainda, classificados como rolamentos de esfera e de rolos que, por sua vez, podem ser sub classificados conforme mostrado na figura 6.

Figura 6 – Sub classificação de rolamentos axiais e radiais.



Fonte: Adaptado de Antonioli (1999).

As principais aplicações dos rolamentos de esferas são: rodas dianteiras automotivas, caixas de transmissão, motores elétricos, eletrodomésticos, turbinas a gás, motores de locomotiva elétrica, equipamentos de construção, máquinas agrícolas, máquinas industriais, entre outros. Segundo Antonioli (1999) as principais vantagens do rolamento de esfera são:

- Redução de atrito - projetado para reduzir o atrito do contato, resultando em um movimento mais suave e por consequência prolongando a vida útil dos componentes;
- Suporte de cargas elevadas - são capazes de suportar tanto cargas axiais como cargas radiais, tornando-se ideais para a aplicação em maquinários pesados e em equipamentos industriais;
- Precisão e controle de movimento - proporcionam um movimento preciso e controlado, possibilitando uma exatidão maior, principalmente em aplicação que necessitam alto grau de precisão;

- Redução de desgaste e manutenção - por contribuir com a redução de atrito e distribuição das cargas, tem papel fundamental na redução do desgaste no contato, aumentando a vida útil dos componentes e reduzindo a necessidade de manutenções frequentes;
- Eficiência energética - menor atrito está diretamente relacionado com menor consumo de energia, resultando em economia de custos operacionais;
- Variedade de tipos e tamanhos - existe uma variedade enorme de tipos de rolamentos com diferentes tamanhos e configurações, permitindo a escolha do mais adequado para a necessidade de projeto.

A escolha de focar exclusivamente nos rolamentos de esferas é devido ao fato de que o rolamento utilizado na bancada de testes deste trabalho é do tipo esférico. Portanto, as vantagens e aplicações descritas são diretamente relacionadas às características específicas deste tipo de rolamento, o que é relevante para a análise e interpretação dos dados obtidos durante o estudo.

2.3.2 Causas de vibrações em rolamentos

De acordo com Antonioli (1999) um rolamento em estado ideal de instalação e operação, pode falhar por cinco fatores diferentes, são eles:

- Fadiga - falhas por fadiga em rolamentos podem ocorrer por um conjunto de fatores, como por exemplo, condição de operação, qualidade do material, carga aplicada, lubrificação inadequada, caso ilustrado na figura 7, vibrações em excesso, entre outros. A fadiga ocorre devido à presença repetitiva de tensões cíclicas no rolamento ao longo do tempo;

Figura 7 – Rolamento autocompensador de rolos descascado devido à lubrificação deficiente



Fonte: NSK (2012).

- Desgaste - o rolamento falha por desgaste quando ocorre a deterioração devido ao atrito progressivo das superfícies diretamente em contato. Pode se desgastar por abrasão, adesão, corrosão ou até mesmo pelo deslizamento entre as superfícies, como mostrado na figura 8;

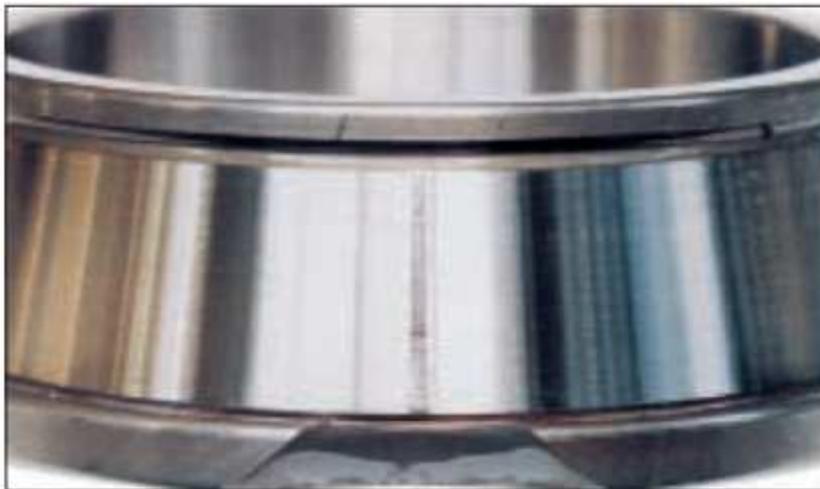
Figura 8 – Exemplo de um anel externo de rolamento pós deslizamento entre superfícies



Fonte: NSK (2012).

- Deformações plásticas - um rolamento está sujeito a sofrer uma deformação plástica quando submetido a cargas excessivas, maiores que sua capacidade de resistência. A deformação plástica é a deformação permanente, são alterações definitivas da forma e das propriedades, como mostrado na figura 9;

Figura 9 – Anel interno de rolamento de rolos cônicos fraturado pós choque no processo de instalação



Fonte: NSK (2012).

- Aderência - a aderência é uma falha que ocorre devido a um aumento considerável entre as superfícies de contato e o rolamento. É caracterizada pela união dessas duas

superfícies. Ocorre devido a falta de lubrificação, temperaturas elevadas, contaminação ou até mesmo devido a cargas excessivas.

- Aquecimento - a falha por aquecimento pode ocorrer devido a falha no plano de lubrificação, velocidade de rotação excessiva, montagem incorreta, sobrecarga e através de contaminantes. O aquecimento causa desgaste excessivo, enfraquecimento do material e conseqüentemente, redução da vida útil, como ilustrado na figura 10.

Figura 10 – Anel interno do rolamento autocompensador de rolos superaquecido devido à lubrificação insuficiente



Fonte: NSK (2012).

Em planos de manutenções que a máquina não roda até a falha a grande preocupação é no desperdício ocasionado pela troca prematura dos rolamentos. A dispersão da vida útil é muito grande devido às falhas externas (ANTONIOLLI, 1999). Por isso deve-se analisar a condição real do rolamento, fazendo a análise de vibração é possível obter os seguintes defeitos:

- Problemas relacionados a lubrificação;
- Fadiga;
- Defeito no eixo ou nos mancais;
- Montagem incorreta;
- Corrosão/erosão por conta de agentes químicos;
- Defeito nas pistas;
- Defeito nos rolos ou nas esferas;
- Vibrações externas;
- Passagem de corrente;

- Material estranho ao rolamento.

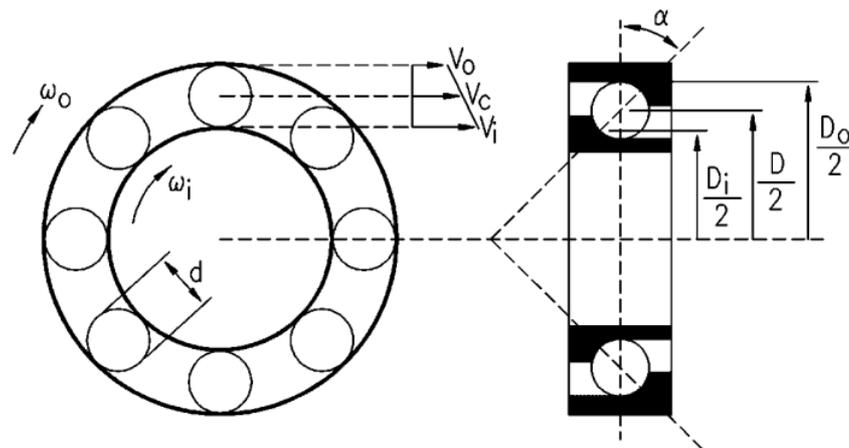
2.3.3 Freqüências de defeitos em rolamentos

Conforme Antonioli (1999), cinco freqüências são associadas com rolamentos defeituosos:

- freqüência de rotação do eixo;
- freqüência de rotação da gaiola;
- freqüência de passagem das esferas na pista interna;
- freqüência de passagem das esferas na pista externa;
- freqüência de rotação das esferas;

As equações das freqüências relacionadas aos defeitos são calculadas em função do tipo de rolamento, da sua geometria, da velocidade de rotação. A formulação mostrada nesta seção é apresentada por Almeida (2007). A figura 11 representa um modelo esquemático de um mancal de rolamento de esferas com pistas internas e externas giratórias no qual α é denotado por ângulo de contato operacional, D é o diâmetro primitivo, D_i é o diâmetro da pista interna, D_o é o diâmetro da pista externa, d é o diâmetro da esfera, ω_i e ω_o são respectivamente, velocidade angular da pista interna e velocidade angular da pista externa e V_o , V_c e V_i são respectivamente, velocidade tangencial da pista externa, velocidade tangencial da gaiola e velocidade tangencial da pista interna.

Figura 11 – Desenho esquemático de um mancal de rolamento com pista interna e externa giratórias.



Fonte: Almeida (2007).

Tendo em vista a geometria apresentada na figura 11, tem-se

$$D = \frac{D_i + D_o}{2} \quad (2)$$

no qual

$$D_i = D - d \cos \alpha \quad (3)$$

e

$$D_o = D + d \cos \alpha \quad (4)$$

A velocidade tangencial da pista interna é dada por

$$V_i = \omega_i \frac{D_i}{2} \quad (5)$$

enquanto a velocidade tangencial da pista externa é dada por

$$V_o = \omega_o \frac{D_o}{2} \quad (6)$$

A velocidade tangencial da gaiola pode ser obtida fazendo a velocidade média das velocidades externa e interna, dessa forma:

$$V_c = \frac{V_i + V_o}{2} \quad (7)$$

Substituindo as equações (2) a (6) na equação (7), obtêm-se:

$$V_c = \frac{\omega_i(D - d \cos \alpha)}{4} + \frac{\omega_o(D + d \cos \alpha)}{4} \quad (8)$$

Dividindo a (8) por πD , obtêm-se a frequência de rotação da gaiola

$$f_c = \frac{f_i \left(1 - \frac{d}{D} \cos \alpha\right)}{2} + \frac{f_o \left(1 + \frac{d}{D} \cos \alpha\right)}{2} \quad (9)$$

no qual f_i e f_o são as frequências de rotação da pista interna e externa, respectivamente.

Considerando a pista externa como sendo estacionária, a frequência de rotação dada em (9) reduz a

$$f_c = \frac{f_i \left(1 - \frac{d}{D} \cos \alpha\right)}{2} \quad (10)$$

A frequência de rotação dos elementos rolantes em relação à pista interna é definida por

$$f_{ri} = f_c - f_i \quad (11)$$

Substituindo a equação (9) na equação (11), obtêm-se:

$$f_{ri} = \frac{(f_o - f_i)\left(1 + \frac{d}{D} \cos \alpha\right)}{2} \quad (12)$$

A frequência de passagem de esfera sobre a pista interna é obtida multiplicando a equação (12) pelo número de elementos rolantes. Seja Z o número de elementos rolantes, então a frequência de passagem de esfera sobre a pista interna é dada por

$$f_{BPFI} = \frac{Z(f_o - f_i)\left(1 + \frac{d}{D} \cos \alpha\right)}{2} \quad (13)$$

Considerando a pista externa como sendo estacionária, o valor da frequência de passagem da esfera resume-se a:

$$f_{BPFI} = \frac{-Z f_i \left(1 + \frac{d}{D} \cos \alpha\right)}{2} \quad (14)$$

A frequência de rotação dos elementos rolantes em relação à pista externa é definida por

$$f_{ro} = f_o - f_c \quad (15)$$

Substituindo a equação (9) na equação (15), obtêm-se:

$$f_{ro} = \frac{(f_o - f_i) \left(1 - \frac{d}{D} \cos \alpha\right)}{2} \quad (16)$$

A frequência de passagem de esfera sobre a pista externa é obtida multiplicando a equação (16) pelo número de elementos rolantes. Seja Z o número de elementos rolantes, então a frequência de passagem de esfera sobre a pista externa é dada por

$$f_{BPFO} = \frac{Z(f_o - f_i) \left(1 - \frac{d}{D} \cos \alpha\right)}{2} \quad (17)$$

Considerando a pista externa como sendo estacionária, simplifica-se a equação para:

$$f_{BPFO} = \frac{Z f_i \left(1 - \frac{d}{D} \cos \alpha\right)}{2} \quad (18)$$

Também é possível obter o valor da frequência de rotação dos elementos rolantes em torno dos seus próprios eixos. A frequência de rotação, admitindo não haver escorregamento, é dada pela equação 19

$$f_{BSF} = f_r i \frac{D_i}{d} \quad (19)$$

Substituindo a equação (3) na equação (19), obtém-se:

$$f_{BSF} = \frac{f_o - f_i}{2} \frac{D}{d} \left(1 - \left(\frac{d}{D} \cos \alpha\right)^2\right) \quad (20)$$

O quadro 2 apresenta um resumo das equações gerais utilizadas para calcular as frequências características de falhas em rolamentos. Essas equações são fundamentais para a análise de vibrações em rolamentos, pois permitem identificar e diferenciar os diversos tipos de defeitos que podem ocorrer nesses componentes mecânicos. Ao determinar com precisão essas frequências, é possível correlacionar padrões de vibração específicos a falhas particulares, facilitando o diagnóstico precoce e a implementação de ações de manutenção adequadas. Além disso, o entendimento e a aplicação corretos dessas equações contribuem para aumentar a confiabilidade e a eficiência dos equipamentos rotativos, reduzindo tempos de parada e custos associados a falhas inesperadas.

Quadro 2 – Resumo das equações gerais de frequência de defeito do rolamento

Elemento do Mancal	Equações de Frequência
Frequência rotacional da gaiola (FTF)	$f_c = \frac{f_i \left(1 - \frac{d}{D} \cos \alpha\right)}{2} + \frac{f_o \left(1 + \frac{d}{D} \cos \alpha\right)}{2}$
Frequência de defeito da pista interna (BPFI)	$f_{BPFI} = \frac{Z(f_o - f_i) \left(1 + \frac{d}{D} \cos \alpha\right)}{2}$
Frequência de defeito da pista externa (BPFO)	$f_{BPFO} = \frac{Z(f_o - f_i) \left(1 - \frac{d}{D} \cos \alpha\right)}{2}$
Frequência de giro das esferas (BSF)	$f_{BSF} = \frac{f_o - f_i}{2} \frac{D}{d} \left(1 - \left(\frac{d}{D} \cos \alpha\right)^2\right)$

Fonte: Autoria própria (2024).

Quadro 3 – Lista de parâmetros das equações de frequência de defeitos em rolamentos.

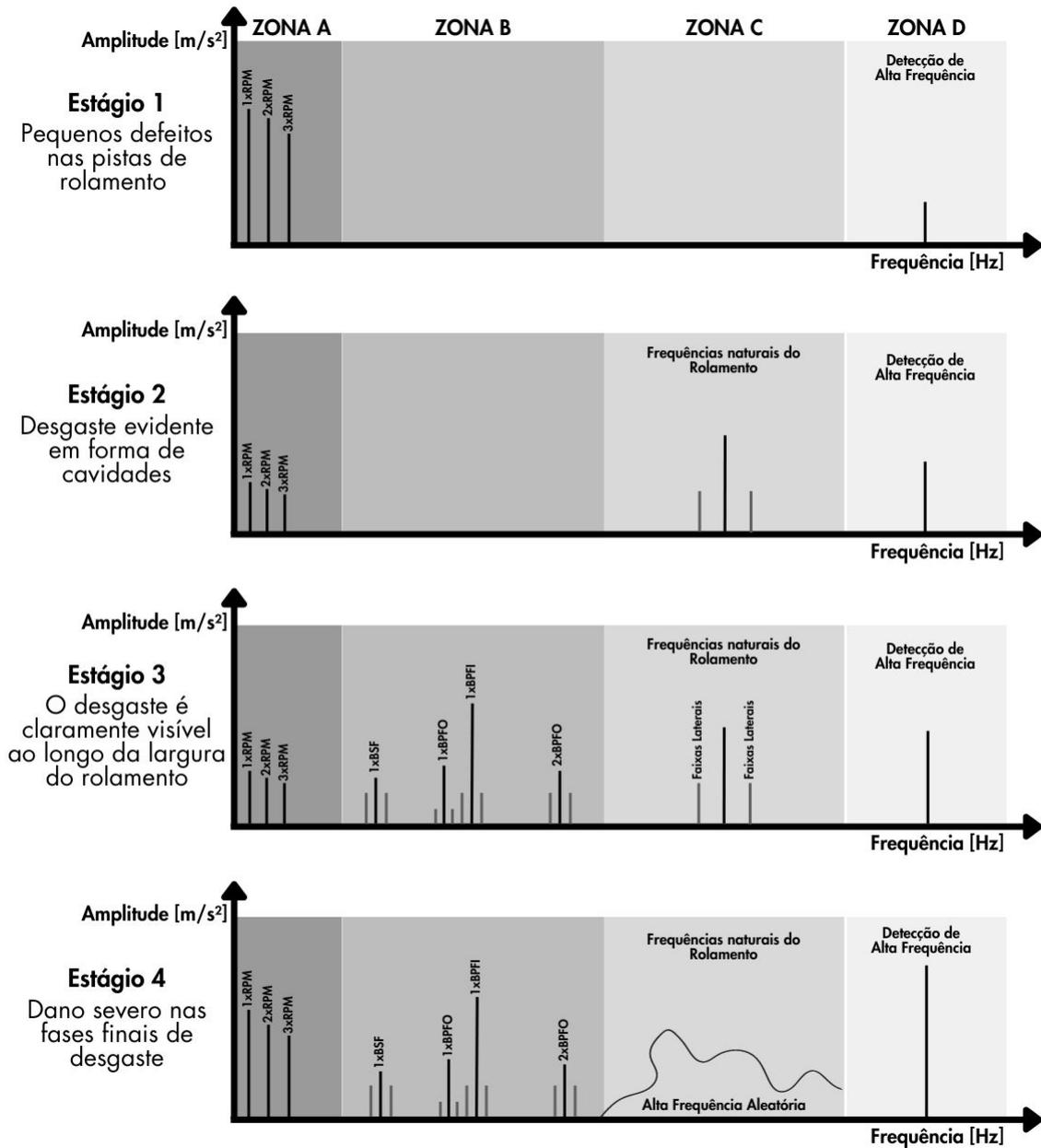
Símbolo	Definição
α	Ângulo de contato operacional constante
D	Diâmetro primitivo
D_i	Diâmetro da pista interna
D_o	Diâmetro da pista externa
d	Diâmetro da esfera
V_i	Velocidade tangencial da pista interna
ω_i	Velocidade angular da pista interna
V_o	Velocidade tangencial da pista externa
ω_o	Velocidade angular da pista externa
V_c	Velocidade tangencial da gaiola
f_c	Frequência da gaiola
f_i	Frequência da pista interna
f_o	Frequência da pista externa
f_{ri}	Frequência de rotação em relação a pista interna
f_{BPI}	Frequência de passagem de esfera na pista interna
Z	Quantidade de elementos rolantes
f_{ro}	Frequência de rotação em relação a pista externa
f_{BPE}	Frequência de passagem de esfera na pista externa
f_{BSF}	Frequência de rotação dos elementos rolantes em torno de seus próprios eixos

Fonte: Autoria própria (2024).

2.3.4 Quatro estágios de falhas em rolamentos

De acordo com Lunusova *et al.* (2023) existem 4 estágios de falhas em rolamentos, conforme mostrados na figura 12, são elas:

Figura 12 – Quatro estágios de falhas em rolamentos



Fonte: Adaptado de lunusova *et al.* (2023).

1. Estágio Inicial:

- Descrição: Este é o estágio em que a falha começa a se desenvolver, mas ainda não é detectável pelos métodos de monitoramento convencionais. Pequenas irregularidades ou microfissuras podem começar a aparecer nas superfícies de contato.

- Sinais: Pode haver uma leve alteração no espectro de vibração, mas geralmente é difícil de detectar sem técnicas avançadas de análise.

2. Estágio de Crescimento Inicial:

- Descrição: As microfissuras e irregularidades começam a crescer e se tornam mais pronunciadas. Neste estágio, as falhas começam a afetar a performance do rolamento, mas ainda podem não ser críticas.
- Sinais: Aumentos nas amplitudes de vibração em frequências específicas associadas aos defeitos de rolamentos, como BPFO, BPFI e BSF.

3. Estágio de Propagação:

- Descrição: A falha cresce rapidamente e começa a causar danos significativos ao rolamento. As irregularidades na superfície de contato tornam-se grandes o suficiente para serem facilmente detectadas por métodos de monitoramento.
- Sinais: Amplitudes de vibração significativamente mais altas e picos de energia em frequências harmônicas. Análises de espectro e de envelope de vibração mostram padrões claros de falha.

4. Estágio de Falha Crítica:

- Descrição: O rolamento está próximo do fim de sua vida útil funcional. As falhas são severas e a operação contínua pode levar a uma falha catastrófica.
- Sinais: Altas amplitudes de vibração em uma ampla faixa de frequências, ruídos audíveis, e aumento da temperatura do rolamento. Este é o estágio em que a falha deve ser detectada e o rolamento substituído imediatamente para evitar danos maiores.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Na metodologia deste trabalho, que é de natureza experimental, foram realizadas medições práticas para avaliar as condições operacionais de rolamentos por meio de técnicas de análise de vibrações. Esse tipo de abordagem visa testar hipóteses e validar conceitos através de experimentos controlados, nos quais as variáveis são manipuladas e os resultados observados diretamente.

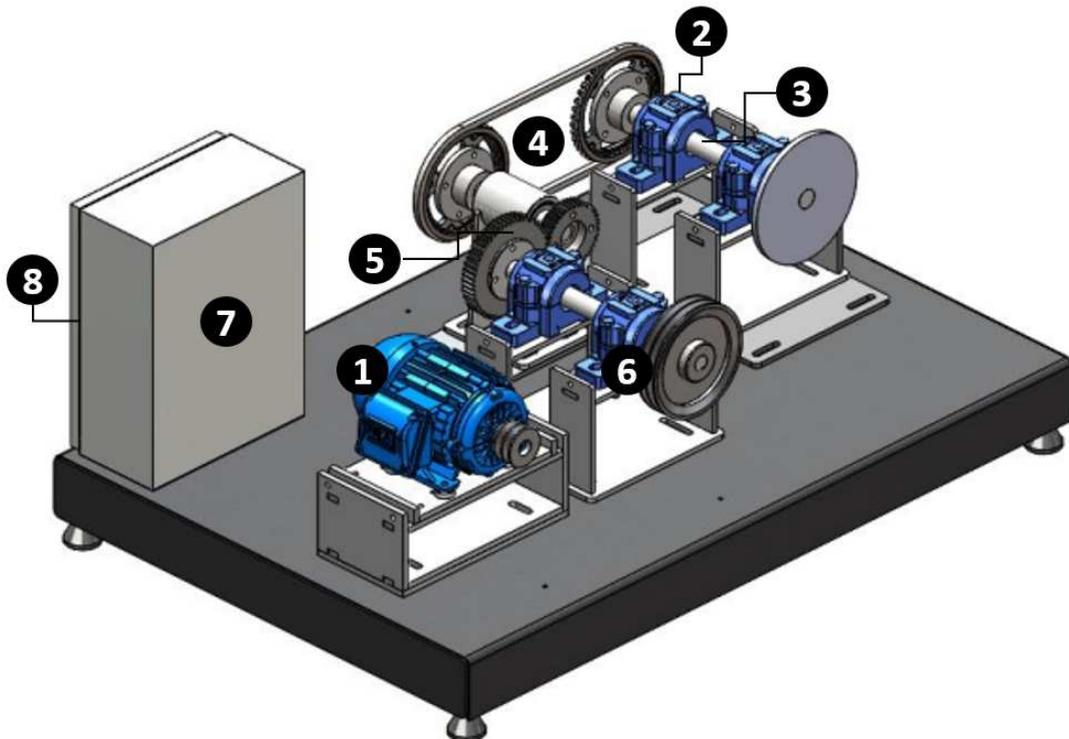
3.1 Materiais

A seguir são apresentados os materiais utilizados neste trabalho.

3.1.1 Bancada didática de transmissão de movimento de três eixos

A transmissão de movimentos é um conceito essencial na engenharia mecânica e é amplamente utilizado em diversos dispositivos e máquinas. A compreensão dos princípios básicos desta área é fundamental para a elaboração de projetos. A bancada didática de transmissão de movimentos de três eixos da marca SOMA, conforme mostrado na figura 13 foi projetada como uma ferramenta auxiliar para a compreensão e aprendizado desses conceitos.

Figura 13 – Bancada didática de transmissão de movimento com três eixos



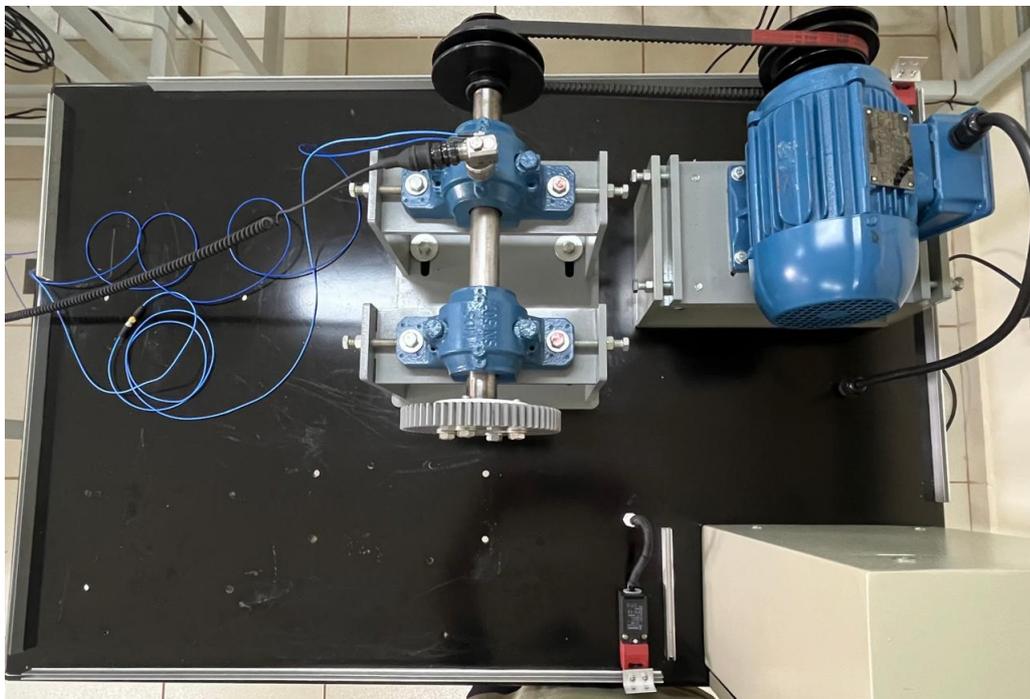
Fonte: Adaptado de SOMA (2017).

Os componentes disponíveis na banda didática mostrada figura 13 são:

1. Motor de indução do tipo gaiola 1 CV, 1730 RPM, 60 Hz;
2. Rolamento 6208Z;
3. Eixo simples;
4. Transmissão polia e correia;
5. Transmissão de engrenagens;
6. Quatro mancais auto compensadores com base regulável;
7. Quadro de comando para acionamento;

Na figura 14, ao contrário da figura 13 é mostrada a bancada da forma como foi realmente utilizada nos experimentos. Para facilitar a análise do espectro de vibrações, alguns componentes foram retirados da bancada de transmissão de movimentos. Essa simplificação da bancada permitiu uma melhor identificação e interpretação dos sinais de vibração, eliminando possíveis interferências e ruídos gerados por componentes adicionais. Ao focar apenas nos elementos essenciais do sistema, foi possível obter um espectro de vibrações mais claro e preciso, facilitando a detecção e análise dos defeitos nos rolamentos.

Figura 14 – Bancada didática de transmissão de movimentos



Fonte: Autoria própria (2024).

O rolamento utilizado nos experimentos é do tipo 6208Z, um rolamento de esferas de alta precisão fabricado pela marca SKF. Este modelo possui uma vedação de metal em um dos

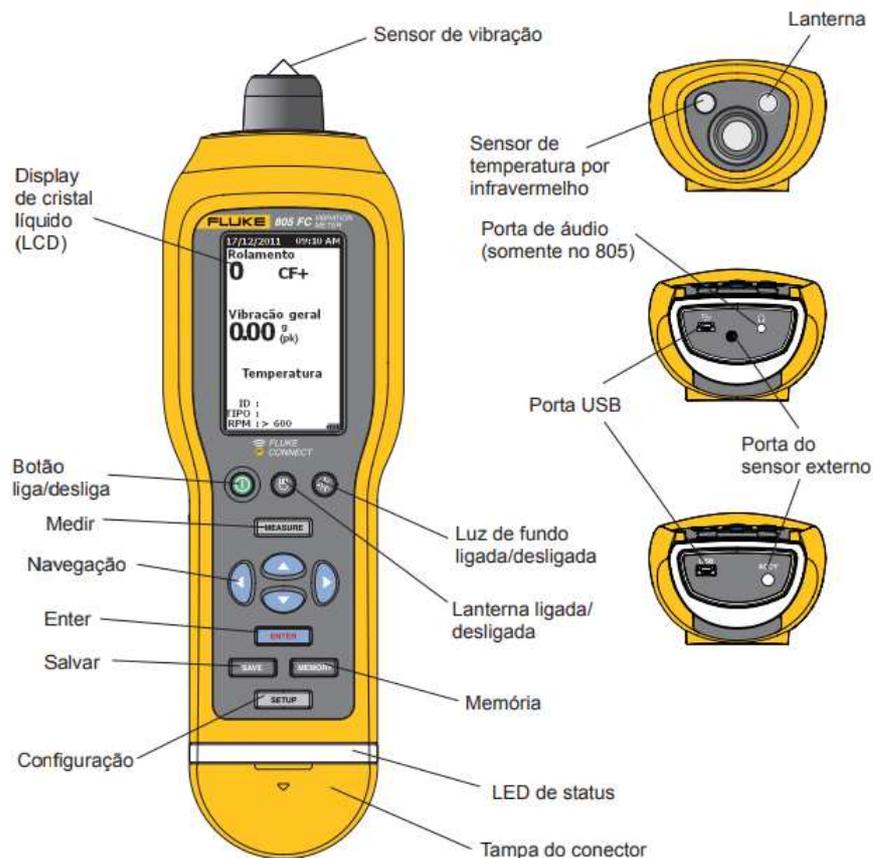
lados (designação "Z"), que oferece proteção contra a entrada de poeira e pequenos detritos, garantindo uma operação mais limpa e duradoura. O rolamento 6208Z possui dimensões padrão, com um diâmetro interno de 40 mm, diâmetro externo de 80 mm e uma largura de 18 mm. A geometria do rolamento é do tipo radial de duas carreiras de esferas, projetado para suportar cargas radiais e axiais moderadas em ambas as direções. O material utilizado na construção do rolamento é aço cromo, conhecido por sua durabilidade e resistência ao desgaste. Esta combinação de especificações torna o rolamento 6208Z adequado para uma ampla gama de aplicações industriais, onde a confiabilidade e a vida útil prolongada são essenciais.

Entre as possibilidades de ajustes de parâmetros as mais utilizadas são o controle da velocidade e posição de modo que, através dos sensores, seja possível monitorar e medir o movimento dos eixos durante os testes experimentais.

3.1.2 Medidor de Vibração Fluke 805 FC

O Fluke 805 FC, conforme ilustrado na figura 15, é um instrumento de medição de vibração utilizado para avaliar a vibração em equipamentos industriais, como motores, compressores, ventiladores, engrenagens, rolamentos, com o intuito de evitar falhas prematuras.

Figura 15 – FLUKE 805 FC



Fonte: Fluke (2012).

As principais características do Fluke 805 FC, mostrado na figura 15, são:

- Faixa de baixa frequência: 10 Hz à 1.000 Hz;
- Faixa de alta frequência (CF +): 4.000 Hz à 20.000 Hz;
- Precisão: $\pm 5\%$ ou $\pm 0,01$ g;
- Resolução: 0,1 g ou 1 g;
- Sensibilidade: $100 \text{ mV/g} \pm 10\%$;
- Limite de vibração: 50 g de pico e 100 g de pico a pico;
- Medição de temperatura: $-20 \text{ }^\circ\text{C}$ a $200 \text{ }^\circ\text{C}$;
- Vida útil da bateria: 250 medições.

O Fluke 805 FC possui várias funcionalidades, entre elas, vale citar que coleta as medidas em um único eixo por vez, porém fornece resultados sobre a aceleração da vibração o que permite avaliar o estado de funcionamento do equipamento mensurado. O medidor também oferece a escolha do método de medida, podendo escolher dentre aceleração, velocidade e deslocamento a que mais se encaixa na necessidade. Outra funcionalidade interessante é que permite a análise de tendências. O equipamento tem uma capacidade de armazenar até 3.500 medições na memória, facilitando o monitoramento contínuo da condição dos equipamentos. É possível exportar esses dados para dispositivos móveis ou computadores e visualizá-los em uma tabela da Fluke, sendo possível a análise gráfica das medições. Como todo equipamento, possui algumas limitações. Sofre com a influência de outros ruídos ambientais e também a leitura e interpretação dos dados não é tarefa simples. Vale a pena ressaltar que o Fluke 805 FC não fornece medidas em frequência, somente médias de medida no tempo e isso restringe boa parte das aplicações.

Medidas podem ser realizadas com o Fluke 805 FC seguindo os seguintes passos:

1. Ligue o Fluke 805 FC e configure conforme as especificações do equipamento a ser medido. Selecione o modo apropriado, como aceleração, velocidade ou deslocamento.
2. Posicione o sensor no local desejado para medir a vibração e certifique-se de que esteja em contato adequado.
3. Pressione o botão *MEASURE* e certifique-se de que uma força constante esteja aplicada.
4. O valor da medida estará disponível no visor, pressione o botão *SAVE* e selecione a pasta adequada para armazenamento.

5. Após coleta de dados, exporte os dados para o computador e compare os resultados obtidos com valores de referência.
6. Documente os dados coletados, podem ser utilizados para acompanhamento da condição dos equipamentos, utilizados em relatórios e para análises futuras.

O Fluke 805 FC fornece o fator de crista - *Crest Factor+* (CF+), tecnologia patenteada pela *Fluke Corporation* para fornecer informações adicionais sobre a condição de vibração de uma máquina. Na Figura 16 é possível observar os intervalos correspondentes a cada grau de gravidade conforme o CF+. O mesmo opera de forma mais eficiente, possibilitando a detecção de picos de vibração transitórios com alta precisão (FLUKE, 2012).

Figura 16 – Escalas de valores do Crest Factor+ X Gravidade

CF+	Gravidade
1 a 5	Bom
6 a 10	Satisfatório
11 a 15	Insatisfatório
acima de 15	Inaceitável

Fonte: Fluke (2012).

O fator de crista possui uma limitação. Pensando-se na vibração causada por uma falha em um rolamento, o valor do fator de crista pode aumentar durante a degradação inicial, no entanto, à medida que o dano piora, o valor do RMS aumentará, contudo, o valor da amplitude de pico não aumenta de forma proporcional. Logo, em estágios avançados, o valor do fator de crista tende a diminuir, estabelecendo então o entendimento de que um baixo valor de fator de crista não é necessariamente uma certeza de integridade do rolamento.

Visto a necessidade de obtenção de dados precisos, a *Fluke Company* desenvolveu um algoritmo para agir justamente nessa limitação. Esse algoritmo faz a medição do fator de crista, porém, leva em consideração a duração e a frequência dos picos de vibração transitórios. Outra diferença importante é que o CF+ é capaz de medir o fator de crista em várias faixas de frequência, possibilitando a identificação desses picos transitórios em diferentes partes da máquina, ou seja, é possível apontar o local onde o defeito está presente.

3.1.3 Acelerômetro axial PCB 352C03

Os acelerômetros axiais PCB (*Piezoelectric Ceramic Bimorph*) são dispositivos de medição de vibração. Realizam medições da aceleração em uma direção específica, pois, cada eixo reage de uma forma diferente às vibrações do sistema. São utilizados em diversas áreas industriais para a obtenção da resposta de vibração. O princípio de funcionamento que segue é o da

piezoelectricidade, no qual diz que certos materiais geram uma carga elétrica quando submetidos a uma tensão mecânica. A carga elétrica gerada é convertida em um sinal elétrico proporcional à aceleração aplicada. Em outras palavras, converte a energia mecânica em energia elétrica.

A principal vantagem dos acelerômetros axiais é que com eles é possível a medição em uma direção específica, fornecendo informações detalhadas sobre a vibração do material estudado nessa direção. São materiais compactos e oferecem ampla faixa de resposta em frequência.

Com base nos dados coletados pelo acelerômetro, é possível realizar análises e diagnósticos a partir da identificação dos padrões de movimento, detecção das falhas, definição de vibrações indesejadas e em seguida, a tomada de decisão relacionada à manutenção.

O acelerômetro utilizado neste trabalho é o modelo PCB 352C03, um sensor de alta precisão amplamente utilizado em análises de vibrações. As especificações técnicas deste dispositivo são cruciais para garantir a precisão e a confiabilidade dos dados coletados:

1. Sensibilidade: 10 mV/g ;
2. Faixa de Amplitude: $\pm 500 \text{ g}$;
3. Faixa de Frequência: $1 \text{ Hz a } 10 \text{ kHz} \pm 10\%$;
4. Corrente de Excitação: $2 \text{ a } 20 \text{ mA}$.

A sensibilidade de 10 mV/g permite detectar pequenas variações na aceleração, enquanto a ampla faixa de amplitude e frequência assegura que o acelerômetro pode ser utilizado em uma variedade de aplicações de análise de vibrações. A corrente de excitação necessária para o funcionamento adequado do sensor varia de $2 \text{ a } 20 \text{ mA}$, conforme especificado no manual.

Embora o equipamento não tenha sido calibrado recentemente, foram utilizados os dados da última calibração feita. No entanto, não é possível avaliar com precisão se o acelerômetro está totalmente preciso. Esta limitação deve ser levada em consideração na análise dos dados, pois pode haver alguma incerteza nas medições devido a possíveis desvios não detectados desde a última calibração.

3.1.4 Módulo de aquisição de dados NI9234

O módulo de aquisição de dados NI9234 foi utilizado neste trabalho para coletar os sinais de vibração medidos pelo acelerômetro. A figura 17 mostra uma imagem do NI9234. As especificações técnicas deste dispositivo são essenciais para garantir a precisão e a integridade dos dados coletados:

1. Taxa de Amostragem: Até 51.2 kS/s por canal;

2. Faixa de Entrada: ± 5 V;
3. Resolução: 24 bits;
4. Número de Canais: 4 canais de entrada analógica simultânea;
5. Faixa de Frequência: DC a 25.6 kHz;
6. Corrente de Excitação: 2 a 20 mA.

Figura 17 – Módulo de aquisição de dados NI9234



Fonte: Autoria própria (2024).

A alta taxa de amostragem de até 51.2 kS/s por canal e a resolução de 24 bits permitem a captura detalhada dos sinais de vibração, enquanto a ampla faixa de entrada de ± 5 V assegura que o módulo pode acomodar uma variedade de sensores de vibração. O NI9234 é capaz de medir sinais de DC a 25.6 kHz, proporcionando uma cobertura abrangente das frequências de interesse nas análises de vibrações.

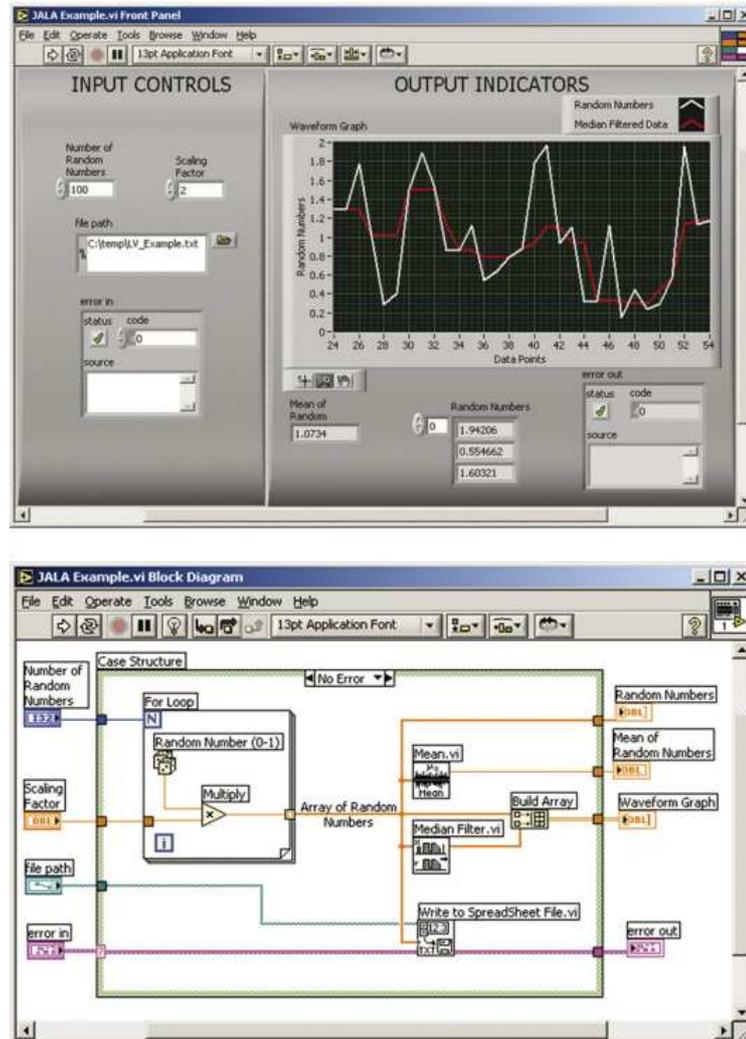
3.1.5 LabVIEW

O LabVIEW é um software de engenharia muito utilizado para obtenção, processamento e análise de dados. A interface de trabalho, conforme a figura 18 utiliza uma abordagem visual baseada em blocos de função, ou seja, os programas são elaborados através da montagem desses blocos.

Possui uma biblioteca de funções completa, o que permite a otimização e também a simplificação do processo. Facilitando inclusive o modo de leitura dos resultados. Outra vantagem do *software* está relacionado com a compatibilidade do mesmo com diversos dispositivos de *hardware*, permitindo a coleta de dados em diversas fontes. O LabVIEW oferece também

diversas ferramentas para análise e processamento de dados, como por exemplo, filtragem, transformações matemáticas, geração de relatórios, entre outros.

Figura 18 – Interface do LabVIEW



Fonte: Elliott *et al.* (2007).

3.2 Métodos

De forma geral, a metodologia adotada seguiu as seguintes etapas:

- adaptação de uma bancada para separar os componentes de transmissão de movimentos, onde as medições serão realizados somente considerando o motor elétrico e um mancal de rolamento;
- realização de medidas experimentais usando um medidor de vibração FLUKE 805 FC para obter respostas máximas de velocidades e aceleração;
- realização de medidas experimentais usando um acelerômetro para obter resposta no domínio da frequência;

- indução de defeitos nos rolamentos;
- comparação de medidas obtidas com o FLUKE 805 FC antes e após defeitos induzidos com valores estabelecidos em normas e manuais.
- comparação de medidas obtidas com o acelerômetro antes e após defeitos induzidos com valores esperados;
- utilização do Labview para coletar as medições realizadas pelo acelerômetro;
- aplicação da transformada de Fourier para obter resposta em frequência;
- utilização do Matlab para analisar as medições obtidas com o acelerômetro e o medidor de vibração.

A seguir será discutido detalhes de cada etapa da metodologia.

Inicialmente, todos os elementos da bancada didática de transmissão de movimentos foram removidos. Posteriormente, o motor foi ativado por meio do painel elétrico, permitindo assim a determinação da frequência de operação. Devido à falta de um tacômetro, os valores de velocidade foram estimados por meio de relações matemáticas, a fim de verificar a concordância entre o valor da frequência e o número de rotações por minuto.

Para a coleta de dados, adotou-se o seguinte procedimento. Inicialmente, o acelerômetro axial foi fixado na posição central do motor, utilizando uma massa adesiva, para garantir a estabilidade durante as medições, juntamente com o medidor de vibrações que manteve-se fixo por conta do suporte magnético. As coletas de dados foram realizadas nas frequências de 20 Hz, 40 Hz e 60 Hz, que correspondem a 600 rpm, 1200 rpm e 1800 rpm, respectivamente. Essas frequências foram escolhidas por serem representativas das condições de operação dos equipamentos analisados. Após análise preliminar, determinou-se que essas frequências seriam suficientes para demonstrar o comportamento dinâmico dos rolamentos, capturando as variações relevantes nos parâmetros de vibração sem a necessidade de incluir frequências mais altas ou baixas, o que tornaria o estudo mais complexo sem acrescentar valor significativo às conclusões.

A partir dessa configuração, procedeu-se à medição da resposta no tempo, utilizando o aplicativo LabVIEW.

Posteriormente, o mancal de rolamentos foi novamente fixado na bancada e conectado ao motor por meio de uma correia dentada. O procedimento de medição seguiu o mesmo padrão. Inicialmente, os dados foram coletados a 20 Hz, seguido por medições subsequentes em intervalos de 20 Hz, abrangendo uma faixa total de 20 Hz a 60 Hz. Simultaneamente à coleta de dados de vibração com os acelerômetros, foi feita uma coleta com o medidor da FLUKE.

A subsequente etapa do processo envolveu o desenvolvimento de um programa no ambiente LabVIEW, o qual empregou a técnica da Transformada Rápida de Fourier (FFT) na manipulação dos dados referentes à resposta temporal. Este procedimento visou a obtenção de

um gráfico representativo da resposta em termos de frequência. Posteriormente, procedeu-se a uma análise visual dos gráficos de resposta no tempo e na frequência no ambiente MatLAB.

Após a aquisição dos dados relativos às vibrações, foi necessário induzir uma falha na superfície externa do rolamento, com o propósito de induzir um defeito. O defeito foi introduzido mediante o emprego de um punção de centro e um martelo, sem preocupação com a dimensão exata do dano, já que o objetivo principal era criar uma irregularidade que pudesse ser detectada nas análises de vibração, sem a necessidade de um controle rigoroso sobre o tamanho ou a forma do defeito. Subsequentemente, o rolamento foi integrado ao sistema e as medições foram reiteradas, de modo idêntico à primeira coleta de dados.

No passo seguinte, foram realizados diversos punctionamentos não lineares na pista externa, a fim de aumentar o defeito. O rolamento foi então integrado novamente ao sistema, e as medições foram reiteradas, seguindo o mesmo procedimento de coleta de dados

Posteriormente, foi utilizado um novo rolamento para realizar um novo conjunto de experimentos, com o objetivo de investigar os efeitos da implementação de um defeito na pista interna do rolamento. Inicialmente, foi feita a medição do rolamento sem qualquer defeito induzido. Em seguida, após um punctionamento único na pista interna, sem preocupação com a caracterização precisa do dano, a coleta de dados foi repetida. Este procedimento seguiu um padrão semelhante ao anterior, utilizando o software LabVIEW para a coleta de dados, seguido pela análise da resposta em frequência por meio da Transformada Rápida de Fourier (FFT) em outro programa. Finalmente, os gráficos obtidos foram analisados no ambiente MatLAB para uma avaliação comparativa.

A bancada didática de transmissão de movimentos viabilizou a coleta de dados enquanto o motor operava no intervalo de 05 Hz a 60 Hz, com incrementos de frequência de 5 Hz. Para a análise de dados, foram selecionadas as frequências de 20 Hz, 40 Hz e 60 Hz.

Para a obtenção de dados utilizando o medidor de vibrações FLUKE 805FC, adotou-se um protocolo semelhante ao utilizado com o acelerômetro. Esta abordagem permitiu uma comparação direta entre as medições obtidas pelo acelerômetro e pelo medidor FLUKE 805FC, fornecendo uma análise abrangente da vibração no sistema. Ambos os grupos de coletas foram realizados na bancada didática de transmissão de movimentos, mantendo o motor operando no intervalo de 05 Hz a 60 Hz, com incrementos de frequência de 5 Hz. Para a análise subsequente, foram escolhidas as frequências específicas de 20 Hz, 40 Hz e 60 Hz, proporcionando uma avaliação detalhada do comportamento vibracional em condições diversas. As medições foram tomadas nas seguintes condições:

- Temperatura externa no dia da coleta: A temperatura externa no dia da coleta foi registrada como sendo 32°C. No entanto, esse valor não foi incorporado como uma variável considerada durante a obtenção dos resultados. Isso se deve ao fato de que a análise de vibrações em rolamentos, foco principal deste estudo, é influenciada principalmente por parâmetros como velocidade, aceleração, e deslocamento. A variação da tempe-

ratura externa, embora possa ter impacto em determinadas condições operacionais, não afetaria significativamente as medições e a interpretação dos dados de vibração para os objetivos específicos deste experimento. Portanto, seu impacto foi considerado irrelevante para as análises em questão.

- Ambiente experimental: O ambiente experimental consistiu em um laboratório fechado. As medições foram conduzidas em um sábado à tarde, momento caracterizado por uma reduzida circulação de pessoas nas instalações. Essa escolha estratégica de horário visou minimizar possíveis interferências e garantir a obtenção de dados de vibração mais precisos, reduzindo a probabilidade de coletas equivocadas devido à interferência externa.
- Estado operacional do motor: O motor em questão foi submetido a testes de vibração que corroboraram sua condição de novo. A limitada utilização do equipamento até o momento da coleta de dados contribuiu para garantir a integridade e estabilidade do sistema durante as análises realizadas.
- Estado de calibração do medidor de vibrações: Em relação ao estado de calibração, foram utilizados dois medidores durante as medições: o FLUKE 805FC, adquirido aproximadamente há um ano, e um acelerômetro piezoelétrico. É relevante observar que, até a data da coleta de dados, nenhum procedimento de calibração pós-compra foi realizado para o FLUKE 805FC. Quanto ao acelerômetro piezoelétrico, sua última calibração foi conduzida em junho de 2018. Embora o FLUKE 805FC seja relativamente recente, a ausência de calibração subsequente é uma consideração importante ao interpretar os resultados. Adicionalmente, futuras calibrações podem ser implementadas para assegurar a precisão contínua das medições realizadas por ambos os medidores.
- Posicionamento do sensor: O posicionamento dos sensores foi cuidadosamente determinado após uma série de testes considerativos. A seleção das posições de aplicação foi baseada na evidência obtida durante esses testes, visando assegurar uma colocação estratégica e significativa dos sensores.

4 RESULTADOS

Neste capítulo, serão apresentados os termos investigados, acompanhados dos valores numéricos calculados com base nos equacionamentos descritos previamente. Em seguida, serão detalhadas as quatro condições de estado do rolamento e os gráficos correspondentes, mostrando as observações feitas tanto para rolamentos em bom estado quanto para aqueles com defeitos induzidos. Para cada condição, será realizada uma análise minuciosa dos dados coletados a partir das medições de vibração. Serão apresentados os gráficos de resposta no tempo e em frequência do motor operando em diferentes condições, destacando-se os picos críticos que indicam possíveis defeitos. Essas observações são fundamentais para compreender se o rolamento está apresentando eventuais problemas e para tomar medidas preventivas adequadas, contribuindo para a eficácia da manutenção preditiva e a prevenção de falhas catastróficas.

4.1 Determinação das frequências críticas do rolamento

A tabela 1 descreve cada um dos termos investigados, os valores calculados com base no equacionamento apresentado no capítulo 2 e a validação desses valores com os dados do manual do rolamento operando a 60 RPM.

1. Frequência Setada do Inversor: A frequência setada do inversor foi medida em Hz durante o teste de operação do rolamento.

2. Velocidade do Eixo: A velocidade do eixo, em rotações por minuto, foi registrada durante o teste para correlacionar os dados com as frequências características do rolamento.

3. Frequência do Eixo: A frequência do eixo foi calculada a partir da velocidade do eixo em RPM, convertida para Hz para análise de frequências críticas.

4. Frequência e defeito da pista externa (BPFO): O BPFO, foi calculado utilizando fórmulas padrão de análise de falhas em rolamentos e comparado com os valores indicados no manual do rolamento para operação a 60 RPM.

5. Frequência de defeito da pista interna (BPFI): O BPFI, foi determinado para avaliar a frequência de falha associada com o caminho interno do rolamento operando a 60 RPM.

6. Frequência rotacional da gaiola (FTF): A FTF foi calculada para entender as características dinâmicas do rolamento sob as condições específicas de operação a 60 RPM.

7. Frequência de giro das esferas (BSF): A BSF foi determinada para avaliar os efeitos dinâmicos das cargas no rolamento durante a operação a 60 RPM.

Tabela 1 – Frequências críticas do rolamento 1207KC03.

f_{inv} (Hz)	v_{eixo} (rpm)	f_{eixo} (Hz)	BPFO (Hz)	BPFI (Hz)	FTF (Hz)	BSF (Hz)
2	60	1	6,813	9,187	0,426	3,295
20	600	9,611	65,478	88,298	4,092	31,666
40	1200	19,222	130,956	176,596	8,185	63,333
60	1800	28,833	196,436	264,898	12,277	95,000

Fonte: Autoria própria (2024).

4.2 Medições, análises e discussões

O defeito da condição 1 na pista externa do rolamento foi induzido utilizando um punção de centro e um martelo. O punção foi aplicado diretamente na superfície externa do anel do rolamento, criando uma pequena imperfeição. Não houve preocupação em determinar a dimensão exata do defeito, pois o objetivo era criar uma irregularidade que pudesse ser detectada nas análises de vibração. A figura 19 mostra o defeito induzido na pista externa.

Figura 19 – Condição 1 - Rolamento com defeito induzido na pista externa



Fonte: Autoria própria (2024).

Na indução do defeito na pista externa na condição 2, novamente foi utilizado um punção de centro e um martelo. Foram aplicados diversos puncionamentos, resultando em uma imperfeição intensificada. Não houve preocupação com o dimensionamento exato ou a precisão dos

defeitos, pois o objetivo era apenas criar uma irregularidade significativa para ser detectada nas análises de vibração. A figura 20 mostra o rolamento pós indução do segundo nível de defeito.

Figura 20 – Condição 2 - Rolamento com aumento do defeito induzido na pista externa



Fonte: Autoria própria (2024).

Para induzir o defeito na pista interna, um novo rolamento foi utilizado. Assim como no caso do defeito na pista externa, foi empregado um punção de centro para criar a imperfeição na superfície interna do anel do rolamento. Inicialmente, o rolamento foi analisado sem defeito induzido, e em seguida, foi realizado um puncionamento único na pista interna.

4.2.1 Rolamento sem defeito induzido (condição 0)

A figura 21 mostra a resposta em aceleração no domínio do tempo para o motor acionado por inversor de frequência a 20 Hz que implica que o eixo gira a aproximadamente 600 rpm (ou 10 Hz). A figura 21a apresenta a aceleração obtida com o acelerômetro axial da PCB durante 10 s enquanto a figura 21b mostra detalhes do comportamento da aceleração durante o intervalo de $4,95 \leq t \leq 5,05$ s.

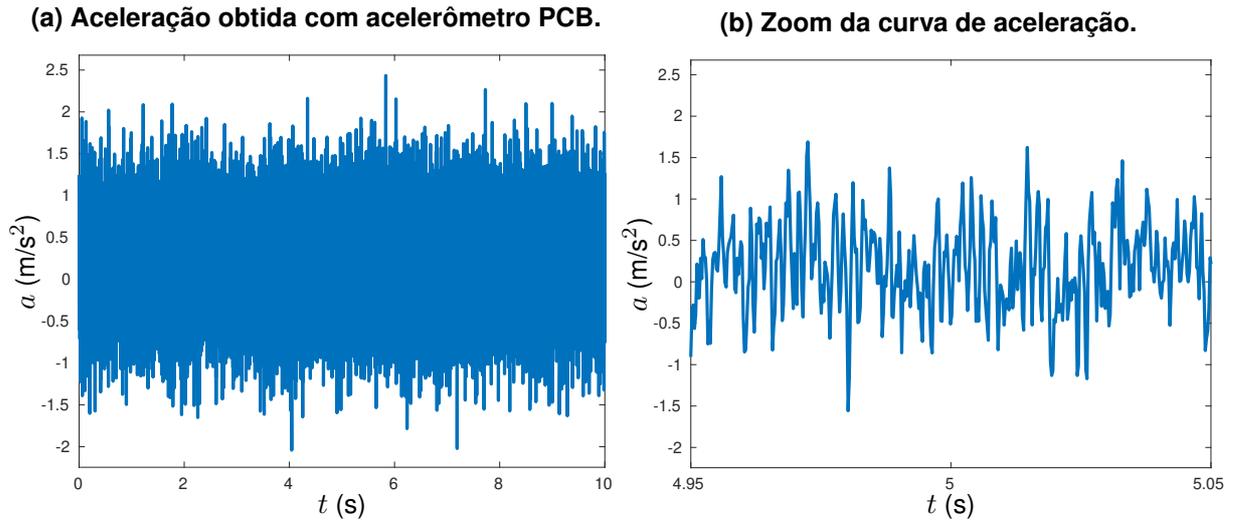
A tabela 2 apresenta valores obtidos a partir dos dados de aceleração mostrados na figura 21, que incluem os parâmetros de pico positivo, valor quadrático médio (RMS) e fator de crista.

Tabela 2 – Fator de crista obtido com acelerômetros PCB e FLUKE.

	PCB	FLUKE
Pico Positivo (m/s^2)	2,43	0,83
Valor Quadrático Médio (m/s^2)	0,53	0,59
Fator de crista	4,57	1,41

Fonte: Aatoria própria (2024).

Figura 21 – Resposta no tempo com motor a aproximadamente 600 rpm.



Fonte: Aatoria própria (2024).

O pico positivo é o valor máximo de aceleração medido durante um período específico em um gráfico de vibração. Esse pico representa a aceleração máxima que a máquina ou componente experimenta em um dado instante de tempo. É uma medida importante porque um pico elevado pode indicar a presença de choques ou impactos súbitos no sistema, que podem ser causados por defeitos como folgas mecânicas, engrenagens desalinhadas ou rolamentos danificados. A amplitude do pico pode ser usada para avaliar a severidade de uma condição de falha, com picos mais altos geralmente indicando condições mais severas.

O valor quadrático médio, é uma medida estatística que representa a magnitude média da vibração ao longo do tempo. É calculado pela média dos quadrados dos valores de aceleração, e depois tirando a raiz quadrada dessa média. É uma medida muito útil em análise de vibração porque fornece uma indicação da energia total da vibração presente no sistema. É útil para avaliar a vibração geral e determinar se está dentro dos limites aceitáveis. Diferente do pico positivo, o valor RMS não é influenciado por picos súbitos e raros, fornecendo uma visão mais estável e consistente da condição de vibração.

O fator de crista é a razão entre o valor do pico positivo e o valor RMS da vibração. O fator de crista é importante porque um fator elevado pode indicar a presença de defeitos localizados, como folgas, rachaduras ou impactos repetitivos, que produzem picos elevados de vibração. Ajuda a distinguir entre diferentes tipos de falhas, por exemplo, um rolamento com defeito pode

ter um fator de crista elevado devido aos picos de vibração quando as esferas passam sobre a imperfeição.

A figura 22 mostra a Densidade Espectral de Potência (PSD) para motor girando a aproximadamente 600 rpm (ou 10 Hz). A figura 22a apresenta a PSD no intervalo de frequência de $0 \leq f \leq 1500$ Hz obtida usando o método da Transformada Rápida de Fourier (FFT) disponível na função *Spectral Measurement* do software LabView. A figura 22b mostra a PSD em baixas frequência destacando com linhas tracejadas verticais as frequências de rotação do eixo e as frequências críticas do rolamento. A interpretação dos gráficos obtidos baseia-se nos quatro estágios da falha: picos na frequência de rotação, picos nas frequências de defeitos de elementos de rolamento, bandas laterais e não linearidades.

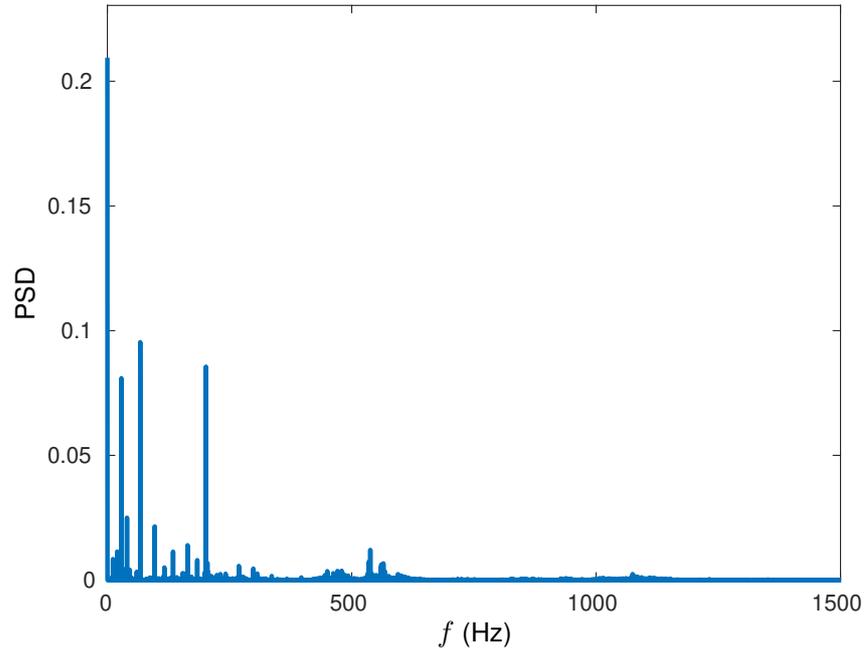
Ao examinar a figura 22b, observamos picos significativos nas frequências de 1x, 2x e 3x RPM do eixo. Esses picos indicam que há uma vibração regular que corresponde à frequência de rotação do eixo principal e suas harmônicas. A presença desses picos sugere que a condição do eixo está dentro dos parâmetros esperados de operação. No entanto, é importante monitorar esses picos, pois um aumento nas amplitudes pode indicar um início de desequilíbrio ou desalinhamento no eixo.

No gráfico, identificamos picos nas frequências de 1x, 2x e 3x BPFO. A presença desses picos é um indicador claro da existência de um possível defeito na pista externa do rolamento. Esses picos são críticos, pois sugerem que há uma irregularidade ou dano que está sendo amplificado à medida que as esferas passam sobre a pista externa. A detecção precoce desses picos permite ações preventivas antes que o defeito progrida para uma falha mais severa.

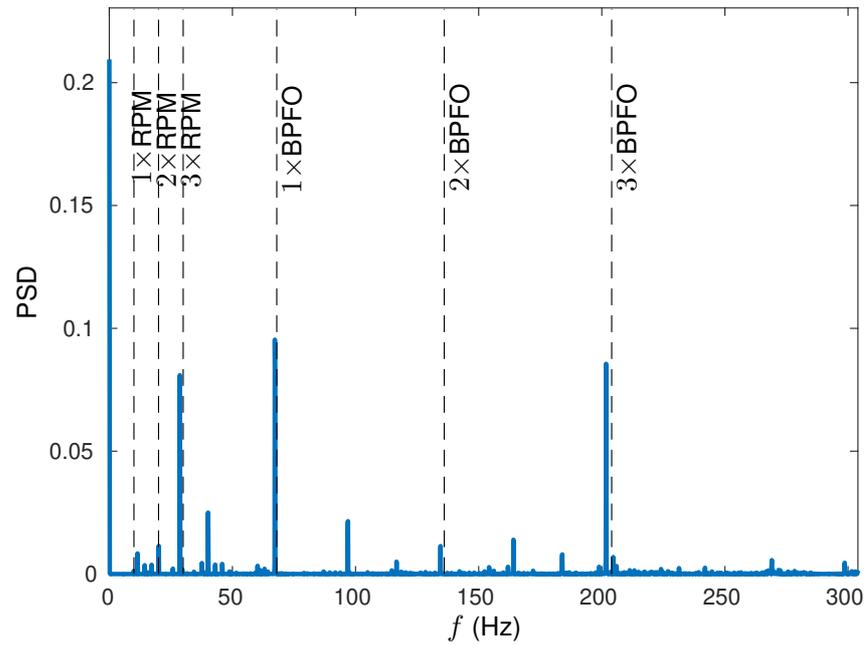
Os gráficos também mostram a presença de bandas laterais, ou picos menores próximos às frequências críticas identificadas. Essas bandas laterais geralmente aparecem devido a modulações na amplitude ou frequência das vibrações principais. A existência dessas bandas pode indicar a presença de problemas como folgas mecânicas ou desgaste desigual em componentes do sistema de transmissão. Monitorar essas bandas é essencial para entender a progressão dos defeitos e identificar pontos críticos que requerem intervenção.

Finalmente, observamos frequências subharmônicas no espectro de vibração, que são indicativas de não linearidades no sistema. Essas frequências não lineares podem surgir devido a uma série de fatores, incluindo contato irregular entre componentes, atrito não uniforme ou ressonâncias internas. A presença de subharmônicas é um sinal de comportamento complexo no sistema que pode preceder falhas significativas se não for tratado adequadamente. Esses sinais sugerem a necessidade de uma análise mais aprofundada para identificar e mitigar as causas das não linearidades.

Figura 22 – Resposta em frequência com motor a aproximadamente 600 rpm.
(a) Densidade de Potência Espectral (PSD) obtida usando a FFT.



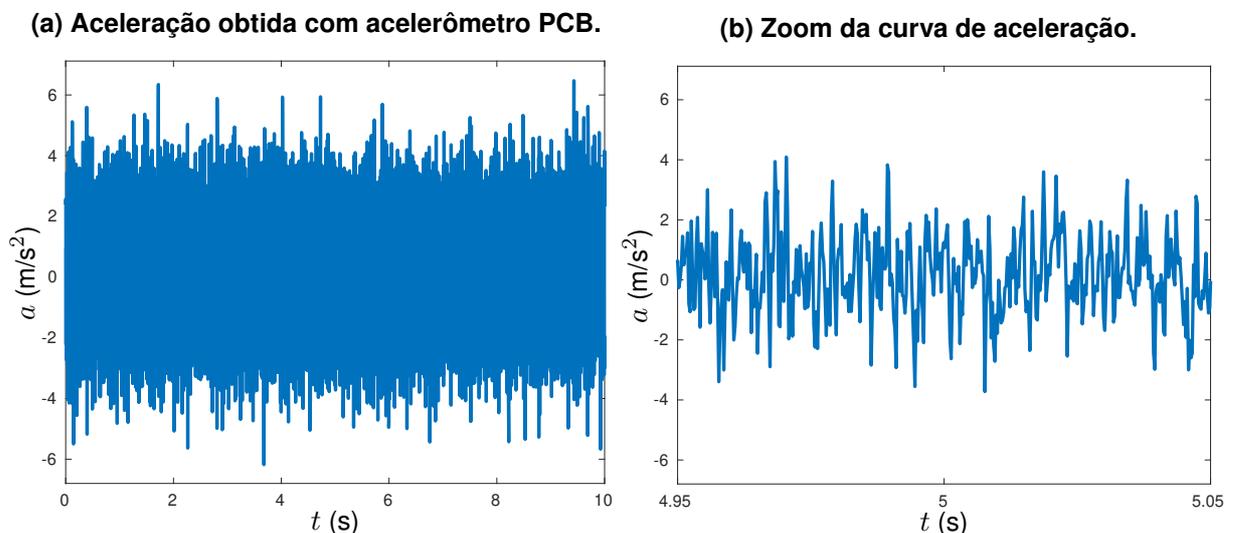
(b) Zoom da curva PSD.



Fonte: Autoria própria (2024).

A figura 23 apresenta a resposta em aceleração no domínio do tempo para o motor acionado por inversor de frequência a 40 Hz, o que implica que o eixo gira a aproximadamente 1200 rpm (ou 20 Hz). Na figura 23a, é exibida a aceleração registrada pelo acelerômetro axial da PCB ao longo de 10 segundos. Já a figura 23b detalha o comportamento da aceleração no intervalo de $4,95 \leq t \leq 5,05$ s. Observa-se que o valor da aceleração nesta condição é significativamente maior do que o registrado para a velocidade de 600 rpm, indicando um aumento na magnitude das vibrações com a elevação da rotação do motor. Esse aumento é consistente com a expectativa de que maiores velocidades de operação geram maiores níveis de vibração.

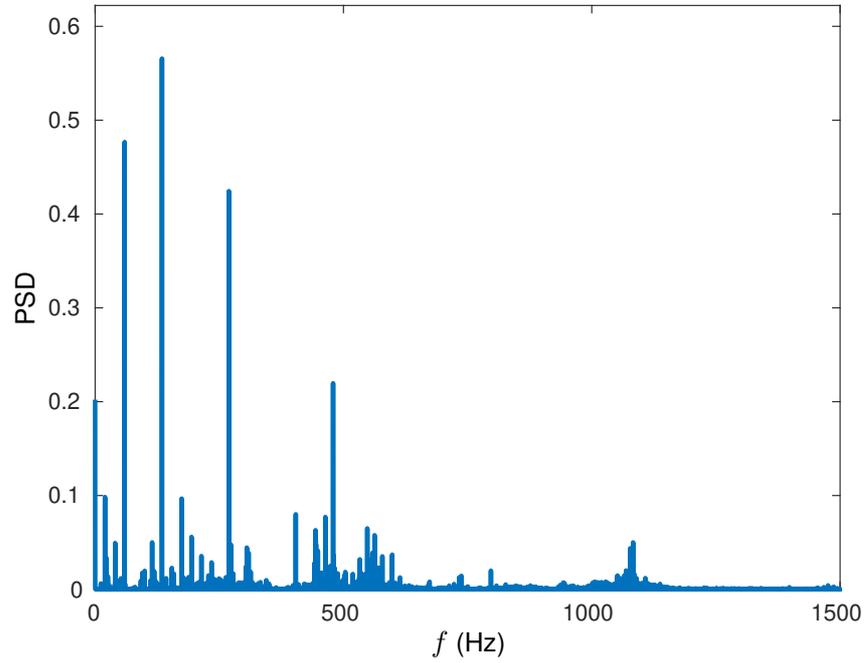
Figura 23 – Resposta no tempo com motor a aproximadamente 1200 rpm.



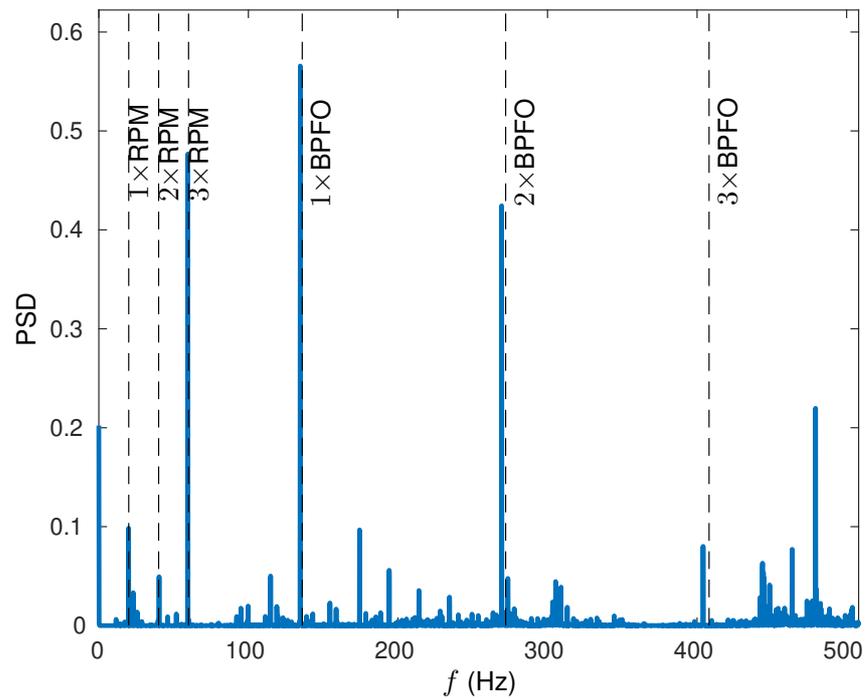
Fonte: Autoria própria (2024).

A figura 24 apresenta a Densidade Espectral de Potência (PSD) para um motor que gira a cerca de 1200 rpm (ou 20 Hz). A figura 24a mostra a PSD no intervalo de frequência de $0 \leq f \leq 1500$ Hz, obtida utilizando a Transformada Rápida de Fourier (FFT) através da função *Spectral Measurement* do software LabView. Já a figura 24b exibe a PSD em baixas frequências, com linhas tracejadas verticais que destacam as frequências de rotação do eixo e as frequências críticas dos rolamentos. O pico em $3x\text{BPFO}$ pode ser mais baixo em comparação com os picos em $1x\text{BPFO}$ e $2x\text{BPFO}$ devido à natureza da distribuição das vibrações geradas por falhas no rolamento. O pico em $3x\text{BPFO}$ pode ser menos pronunciado por vários motivos. Entre eles, a diminuição da intensidade das vibrações em frequências mais altas ou a interferência de outros componentes.

Figura 24 – Resposta em frequência com motor a aproximadamente 1200 rpm.
(a) Densidade de Potência Espectral (PSD) obtida usando a FFT.



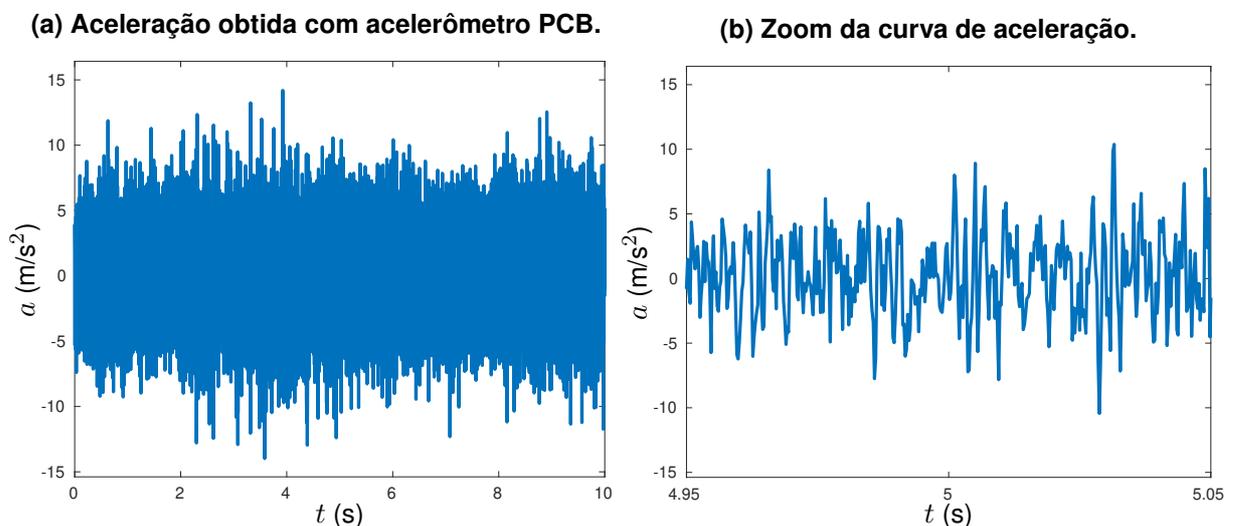
(b) Zoom da curva PSD.



Fonte: Autoria própria (2024).

A figura 25 ilustra a resposta em aceleração no domínio do tempo para um motor operado por um inversor de frequência a 60 Hz, resultando em uma rotação do eixo de aproximadamente 1800 rpm (ou 30 Hz). A figura 25a mostra a aceleração medida pelo acelerômetro axial da PCB ao longo de 10 segundos. Em contraste, a figura 25b detalha o comportamento da aceleração no intervalo de $4,95 \leq t \leq 5,05$ s. Observa-se que o valor da aceleração é significativamente maior em comparação com as velocidades de 600 rpm e 1200 rpm. Esse aumento na aceleração pode ser atribuído ao fato de que, com a elevação da velocidade do motor, as vibrações geradas também aumentam, resultando em maiores amplitudes de aceleração. Esse comportamento é esperado, pois a intensidade das vibrações tende a crescer com a rotação do eixo, refletindo a resposta dinâmica do sistema a velocidades mais altas.

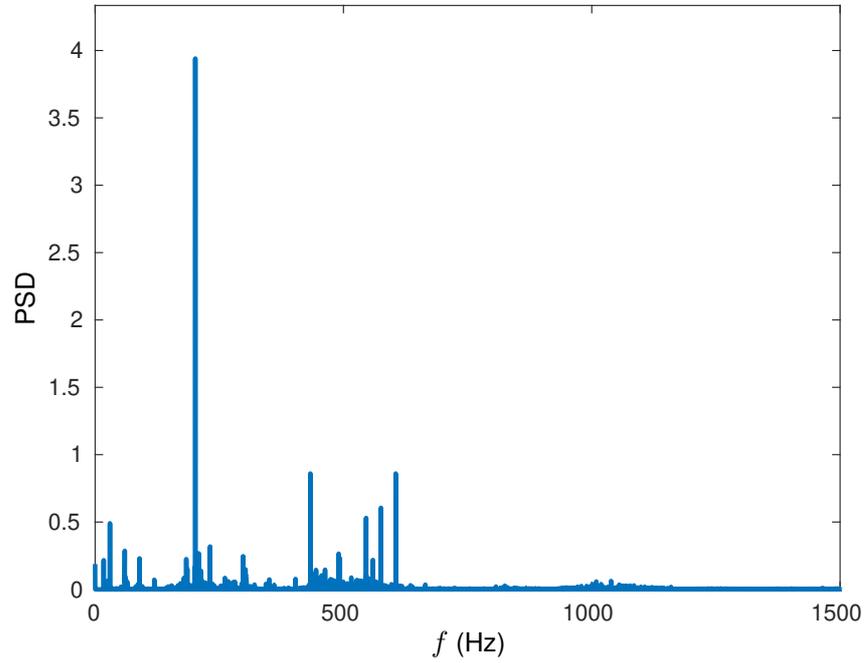
Figura 25 – Resposta no tempo com motor a aproximadamente 1800 rpm.



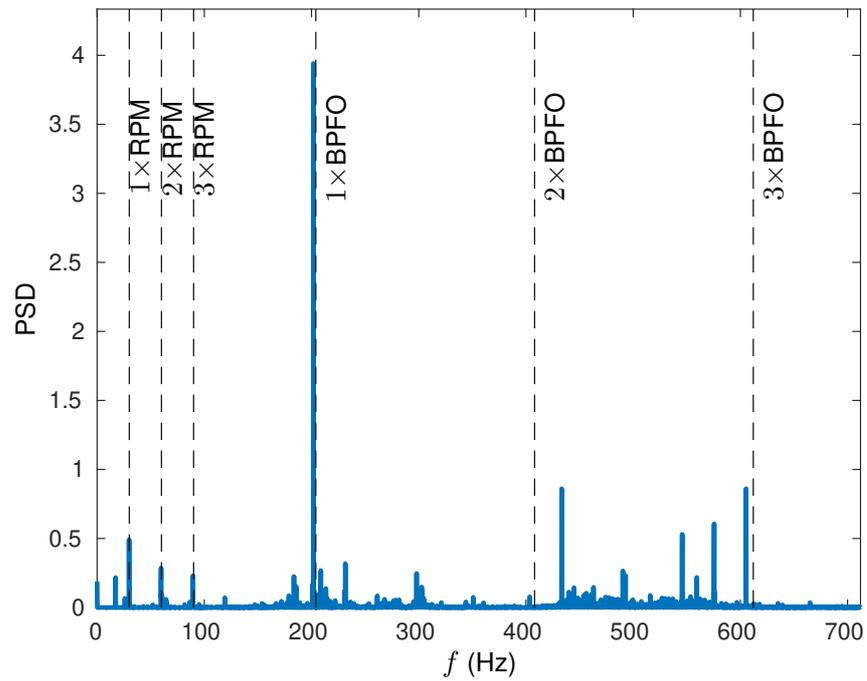
Fonte: Autoria própria (2024).

A figura 26 ilustra a Densidade Espectral de Potência (PSD) para um motor que opera a aproximadamente 1800 rpm (ou 30 Hz). A figura 26a mostra a PSD no intervalo de frequência de $0 \leq f \leq 1500$ Hz, obtida por meio da Transformada Rápida de Fourier (FFT) utilizando a função *Spectral Measurement* do software LabView. Por sua vez, a figura 26b detalha a PSD em baixas frequências, destacando com linhas tracejadas verticais que destacam as frequências de rotação do eixo e as frequências críticas dos rolamentos.

Figura 26 – Resposta em frequência com motor a aproximadamente 1800 rpm.
(a) Densidade de Potência Espectral (PSD) obtida usando a FFT.



(b) Zoom da curva PSD.



Fonte: Autoria própria (2024).

4.2.2 Rolamento com defeito induzido na pista externa (condição 1)

Para a análise de rolamentos com defeito induzido na pista externa, apenas os dados referentes ao motor operando a 1800 rpm serão apresentados. Este caso é considerado suficiente para a análise e, portanto, os dados coletados a 600 rpm e 1200 rpm não serão incluídos nesta seção.

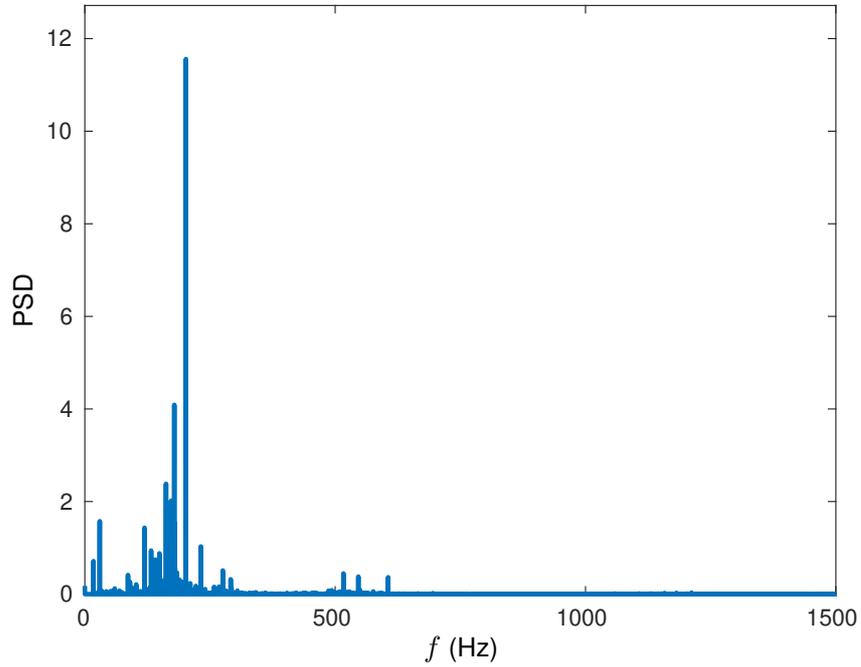
Na condição 1, foi realizado um puncionamento único, resultando em um defeito na pista externa do rolamento, com o objetivo de simular uma falha específica na pista externa. Esta abordagem permite observar e analisar os impactos específicos desse tipo de defeito nas medições de vibração, facilitando a identificação de padrões e características associadas a falhas na pista externa.

A figura 27 apresenta as respostas em frequências do motor operando a aproximadamente 1800 rpm, com um defeito induzido na pista externa do rolamento.

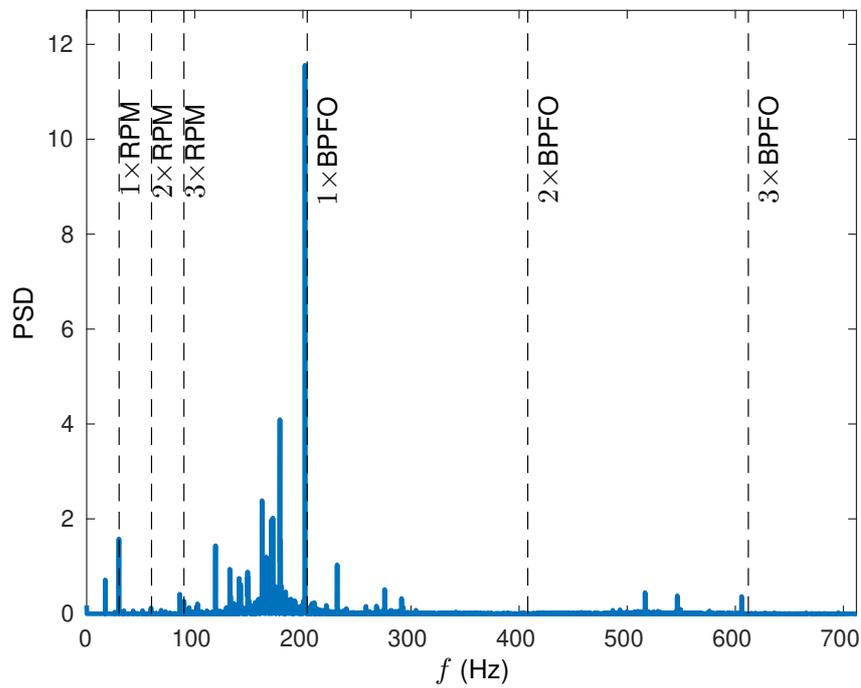
Na figura 27b, é possível observar um pico crítico no ponto correspondente a $1 \times \text{BPFO}$, que é a frequência de passagem da esfera pela pista externa do rolamento. Esse pico indica a presença de uma vibração significativa na frequência associada ao defeito induzido.

A presença de um pico crítico em $1 \times \text{BPFO}$ é uma evidência clara de que o defeito na pista externa está afetando o desempenho do rolamento. Essa frequência é específica para falhas na pista externa e a magnitude do pico sugere a gravidade do defeito. A detecção de um pico elevado nesta frequência permite a identificação precoce de problemas, possibilitando ações corretivas antes que ocorram falhas catastróficas, melhorando a eficiência da manutenção preditiva.

Figura 27 – Resposta em frequência com motor a aproximadamente 1800 rpm.
(a) Densidade de Potência Espectral (PSD) obtida usando a FFT.



(b) Zoom da curva PSD.



Fonte: Autoria própria (2024).

4.2.3 Rolamento com aumento do defeito induzido na pista externa (condição 2)

Na condição dois, foram realizados diversos punctionamentos na pista externa do rolamento, com o objetivo de simular um defeito muito avançado. Esta abordagem visa recriar uma situação de falha grave para analisar seu impacto nas medições de vibração.

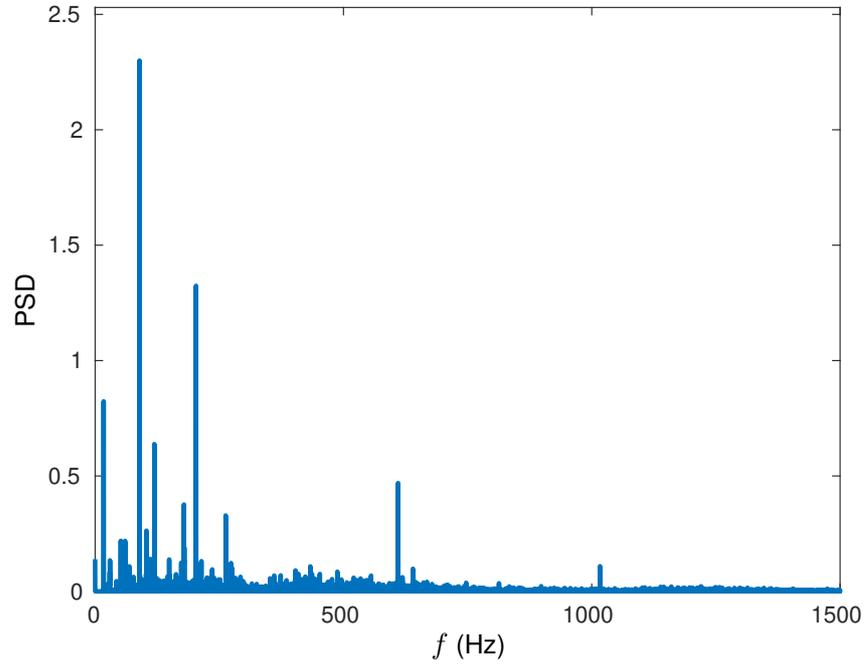
Para esta análise, somente os dados referentes ao motor operando a 1800 rpm serão considerados, pois este caso oferece uma representação suficiente e adequada para a análise detalhada. Embora as medições a 600 rpm e 1200 rpm tenham sido realizadas para proporcionar uma visão abrangente do comportamento do rolamento em diferentes velocidades, a análise focada a 1800 rpm é suficiente para a avaliação dos defeitos induzidos. Os dados das outras velocidades ajudam a entender o impacto da rotação na resposta de vibração, mas para a análise específica de cada condição, a velocidade de 1800 rpm é a mais representativa e relevante, facilitando a identificação e interpretação dos resultados. Portanto, os dados coletados a 600 rpm e 1200 rpm não serão incluídos nesta seção específica, uma vez que não alteram significativamente as conclusões obtidas na análise a 1800 rpm.

Na figura 28, observa-se um pico acentuado em $1x\text{BPFO}$, embora com uma magnitude menor em comparação com a condição 1. Isso indica que, apesar da severidade do defeito, a energia associada à frequência de passagem da esfera pela pista externa é relativamente menor. Este fenômeno pode ocorrer devido a uma distribuição mais ampla da energia vibracional causada pelos múltiplos punctionamentos.

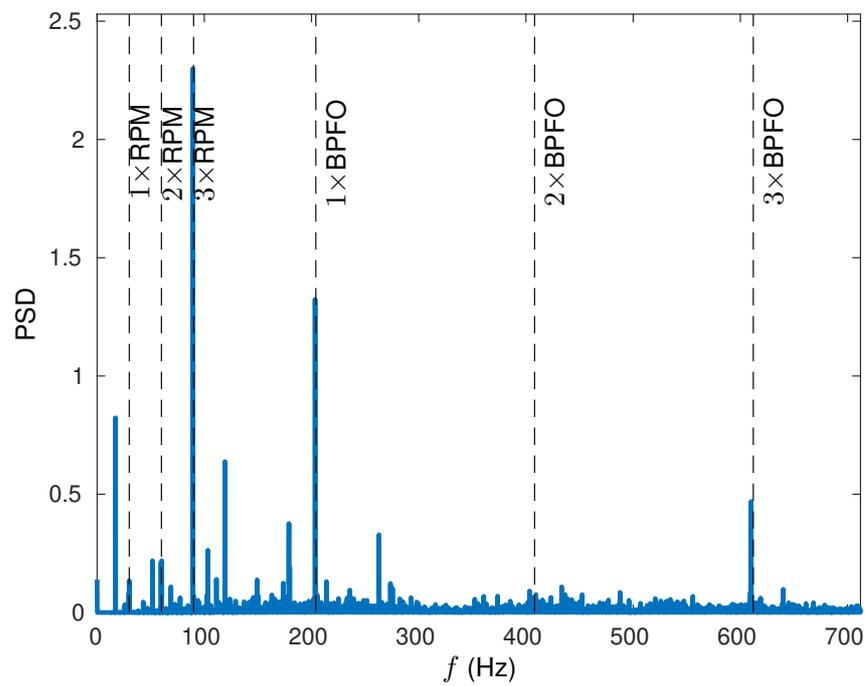
Além disso, nota-se o aparecimento de um pico em $3x\text{BPFO}$. A presença deste pico adicional sugere uma evolução do defeito, indicando que a falha avançada está gerando harmônicos de frequências mais altas. Os harmônicos, como $3x\text{BPFO}$, podem aparecer quando o defeito se torna mais severo e a vibração resultante é mais complexa, afetando múltiplas frequências.

A análise desses picos é fundamental para a compreensão do estado dos rolamentos. Um pico em $1x\text{BPFO}$ é uma clara indicação de defeito na pista externa, e a presença de harmônicos como $3x\text{BPFO}$ reforça a gravidade da falha. Essa informação é crucial para a implementação de estratégias de manutenção preditiva, permitindo intervenções mais precisas e oportunas para evitar falhas catastróficas e reduzir custos operacionais.

Figura 28 – Resposta em frequência com motor a aproximadamente 1800 rpm.
(a) Densidade de Potência Espectral (PSD) obtida usando a FFT.



(b) Zoom da curva PSD.



Fonte: Autoria própria (2024).

4.2.4 Rolamento sem defeito induzido (condição 3)

Na condição 3, foram realizadas medições nas três velocidades de operação: 600 rpm, 1200 rpm e 1800 rpm, utilizando um rolamento novo e em bom estado, sem defeitos induzidos. A análise dos dados coletados demonstra um aumento dos valores da aceleração à medida que a velocidade de rotação aumenta. Esse comportamento é esperado, pois, conforme a rotação do rolamento se eleva, a energia cinética e as forças dinâmicas internas também aumentam, resultando em valores de aceleração mais elevados.

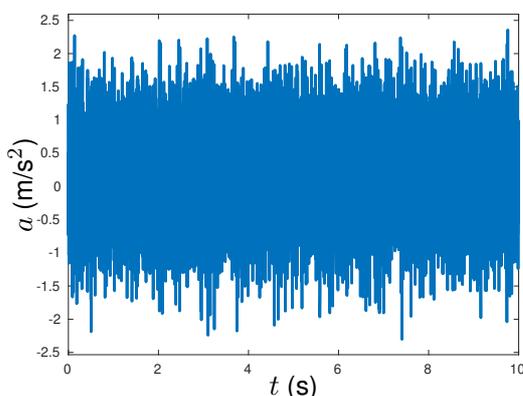
O aumento observado nos valores de aceleração é relativamente baixo e coerente com as expectativas para um rolamento em boas condições. Especificamente, a resposta em frequência mostra que, mesmo nas velocidades mais altas, os picos de aceleração permanecem dentro dos limites aceitáveis, indicando que não há presença de defeitos ou irregularidades significativas. Essa consistência nos dados reforça a integridade do rolamento e a precisão dos métodos de medição empregados.

Essa observação é crucial para estabelecer uma linha de base de comportamento normal, contra a qual defeitos futuros podem ser comparados. A linha de base serve como um padrão de referência, permitindo a identificação de anomalias e desvios nos dados de vibração em medições subsequentes. A partir dessa linha de base, é possível detectar precocemente qualquer degradação no desempenho do rolamento, facilitando a implementação de ações corretivas antes que ocorram falhas catastróficas.

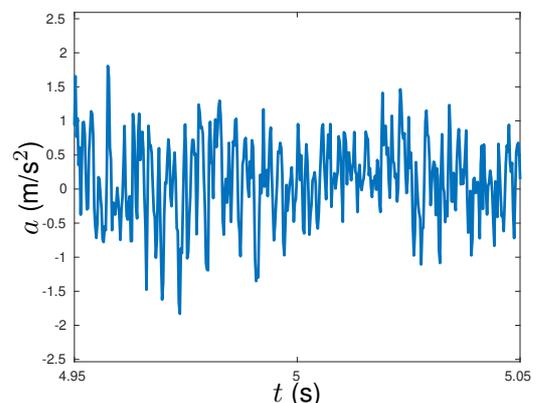
A figura 29 ilustra a resposta em aceleração no domínio do tempo para o motor operando a 600 rpm. Os dados medidos mostram que o valor da aceleração é compatível com as expectativas para um rolamento novo em bom estado. A aceleração registrada é relativamente baixa, o que é indicativo de um desempenho estável do rolamento nessa velocidade. Como esperado, a aceleração aumenta com o incremento da velocidade de operação, refletindo o comportamento típico de rolamentos novos e em bom estado.

Figura 29 – Resposta no tempo com motor a aproximadamente 600 rpm.

(a) Aceleração obtida com acelerômetro PCB.



(b) Zoom da curva de aceleração.

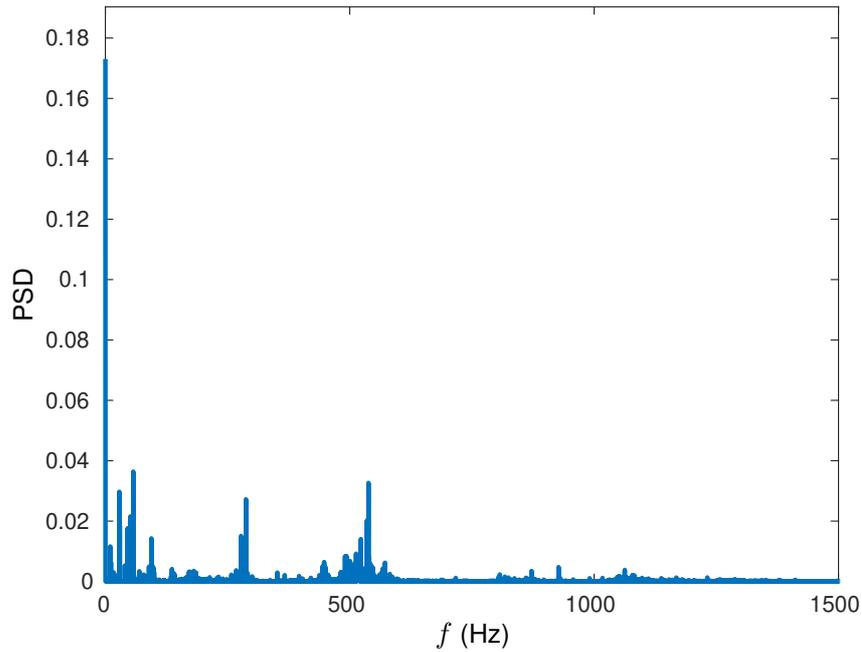


Fonte: Autoria própria (2024).

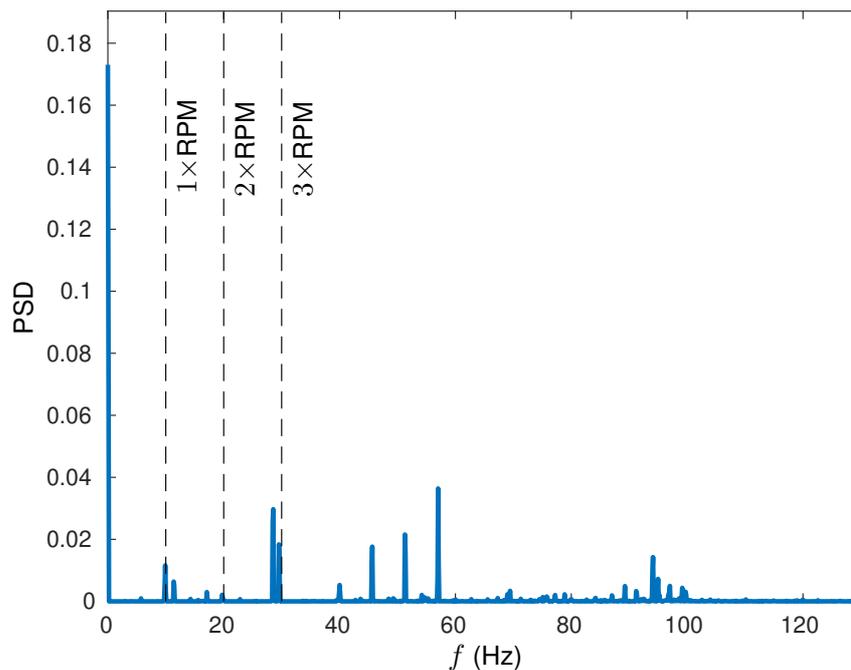
A figura 30 mostra a resposta em aceleração no domínio da frequência para o motor operando a 600 rpm com um rolamento novo. Não são observados picos em frequências características de defeito, como BPFO, BPFI, FTF, BSF e seus harmônicos. Esse comportamento sugere que o rolamento está funcionando corretamente e não apresenta sinais de desgaste ou falhas, refletindo uma condição operacional normal para essa velocidade.

Figura 30 – Resposta em frequência com motor a aproximadamente 600 rpm.

(a) Densidade de Potência Espectral (PSD) obtida usando a FFT.



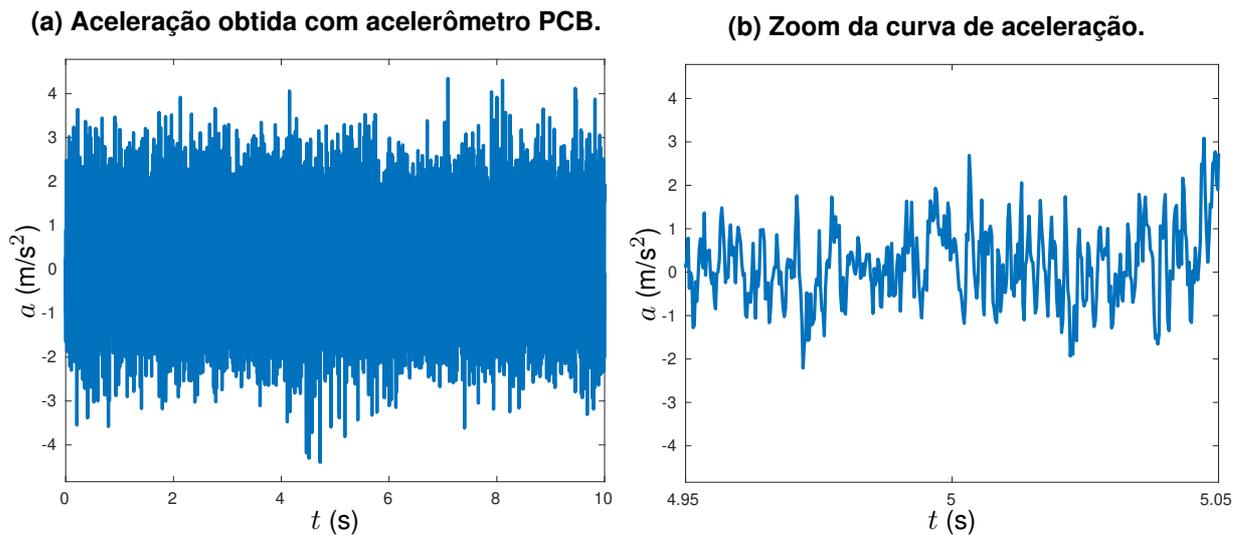
(b) Zoom da curva PSD.



Fonte: Autoria própria (2024).

Na figura 31, a resposta em aceleração para o motor a 1200 rpm é apresentada. Os dados obtidos confirmam que a aceleração está em conformidade com o esperado para um rolamento novo, mostrando um aumento em relação à velocidade de 600 rpm. Este aumento na aceleração é consistente com o comportamento previsto para rolamentos em boas condições quando a velocidade de rotação é dobrada. A elevação nos valores de aceleração com a maior velocidade é um reflexo da dinâmica normal do rolamento sob condições de operação mais rápidas

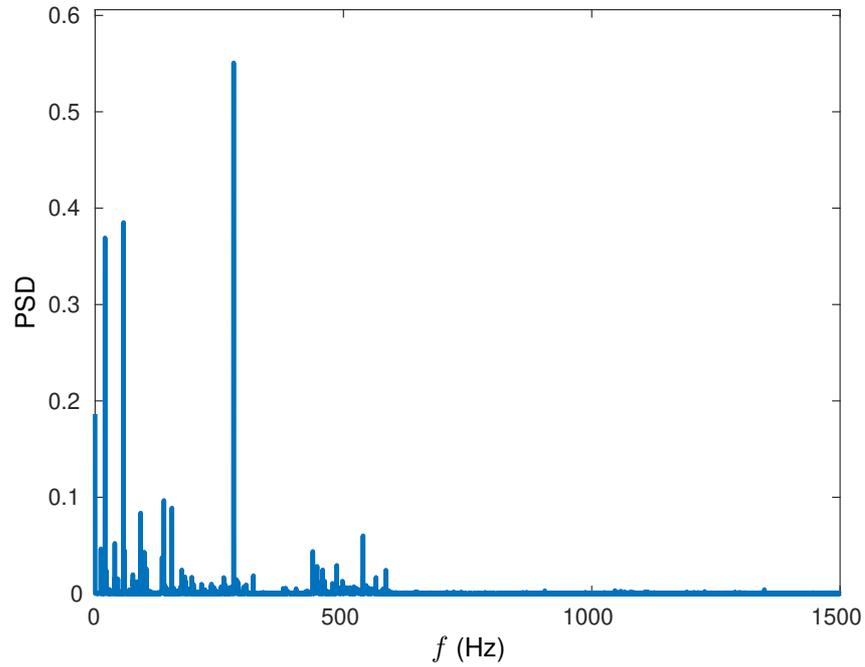
Figura 31 – Resposta no tempo com motor a aproximadamente 1200 rpm.



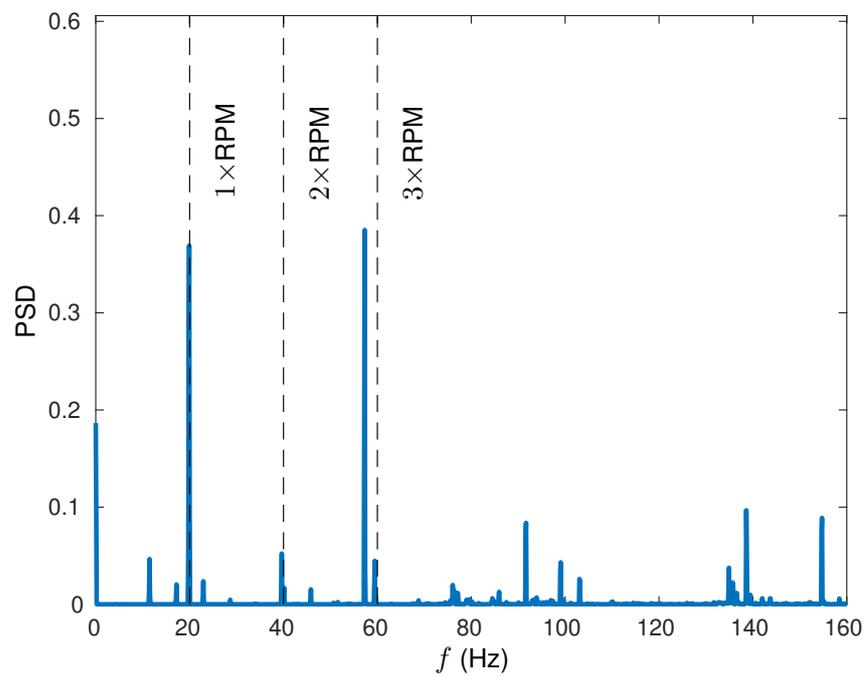
Fonte: Autoria própria (2024).

A figura 32 ilustra a resposta em aceleração no domínio da frequência para o motor operando a 1200 rpm com um rolamento novo. A análise da curva PSD demonstra um aumento proporcional dos valores com o aumento da frequência. Esse aumento gradual da PSD confirma que o rolamento está em boas condições e funcionando adequadamente. A ausência de picos característicos de falhas indica que o rolamento não apresenta problemas evidentes, mesmo com a elevação da velocidade operacional.

**Figura 32 – Resposta em frequência com motor a aproximadamente 1200 rpm.
(a) Densidade de Potência Espectral (PSD) obtida usando a FFT.**



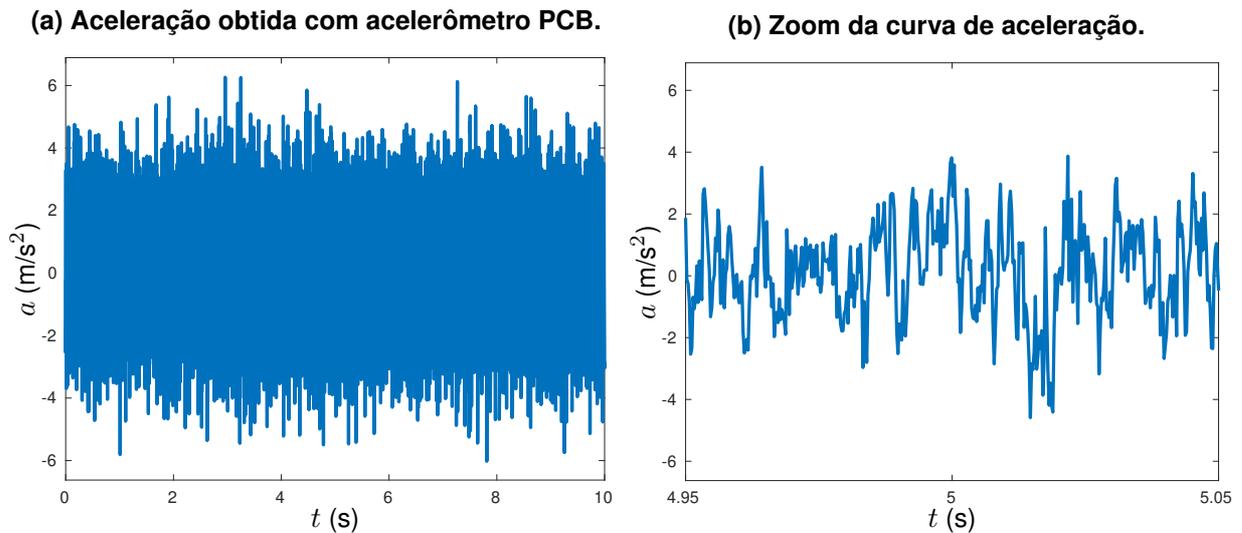
(b) Zoom da curva PSD.



Fonte: Autoria própria (2024).

A figura 33 apresenta a resposta em aceleração para o motor operando a 1800 rpm. Os resultados indicam que o valor da aceleração continua a subir em comparação com as velocidades de 600 rpm e 1200 rpm, mantendo a adequação para um rolamento novo. A aceleração mais alta observada a 1800 rpm está alinhada com o aumento esperado devido ao incremento na velocidade de operação. Esses dados confirmam que o rolamento está operando conforme o esperado para uma peça nova, demonstrando um comportamento consistente com a teoria de que a aceleração aumenta com a velocidade do eixo.

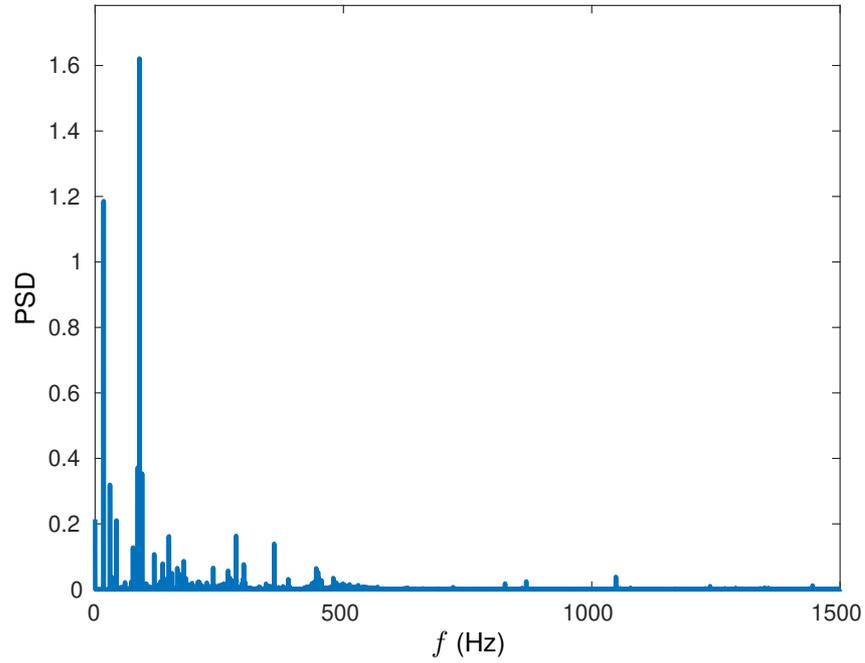
Figura 33 – Resposta no tempo com motor a aproximadamente 1800 rpm.



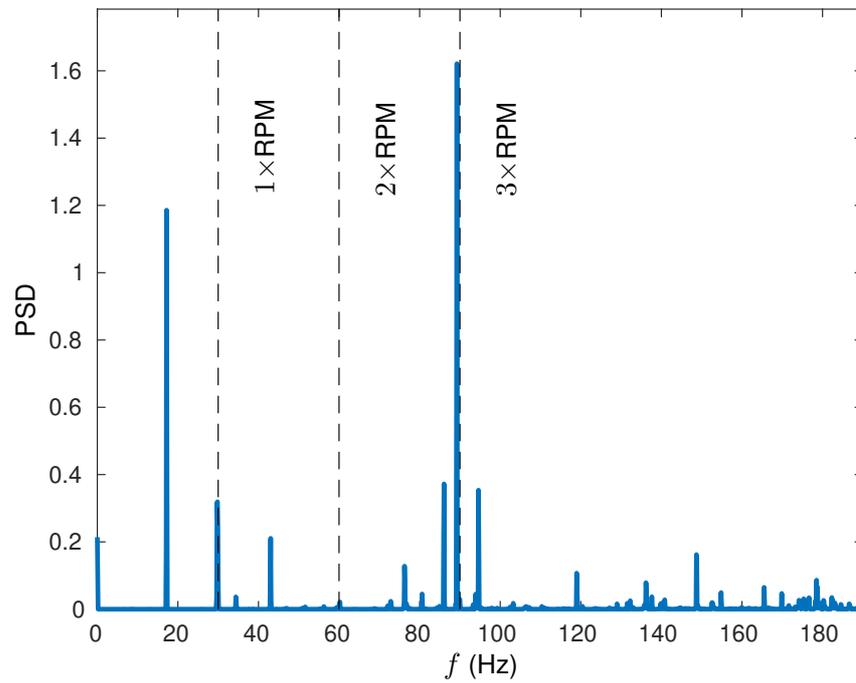
Fonte: Autoria própria (2024).

A figura 34 apresenta a resposta em aceleração no domínio da frequência para o motor operando a 1800 rpm com um rolamento novo. A análise da curva PSD mostra um aumento adequado dos valores conforme a frequência, corroborando que o rolamento está em boas condições. A ausência de picos nas frequências típicas de defeitos, como 1xBPFI, 2xBPFI e 3xBPFI, confirma que não há sinais de falhas no rolamento. O aumento contínuo e justo da PSD é indicativo de um rolamento em bom estado e funcionando corretamente mesmo em altas velocidades.

Figura 34 – Resposta em frequência com motor a aproximadamente 1800 rpm.
(a) Densidade de Potência Espectral (PSD) obtida usando a FFT.



(b) Zoom da curva PSD.



Fonte: Autoria própria (2024).

4.2.5 Rolamento com defeito induzido na pista interna (condição 4)

Na condição 4, um defeito foi induzido na pista interna do rolamento. Para isso, uma esfera do rolamento foi retirada, e um dano foi feito na pista interna utilizando uma punção. Após a realização do dano, a esfera foi recolocada no conjunto, e o rolamento foi instalado novamente para a coleta de dados. Esta abordagem visa simular um defeito específico na pista interna e permite a análise detalhada dos impactos desse tipo de falha nas medições de vibração.

Para esta análise, somente os dados referentes ao motor operando a 1800 rpm serão considerados, pois esta velocidade se mostra suficiente para uma avaliação detalhada dos defeitos induzidos. A escolha de focar nessa velocidade deve-se a vários fatores. Em primeiro lugar, a 1800 rpm, os efeitos dos defeitos nos rolamentos são mais evidentes e claros, o que facilita a identificação e a interpretação dos padrões de vibração. Essa velocidade é particularmente crítica porque muitos sistemas operam perto dessa faixa, e os resultados obtidos refletem melhor o comportamento do rolamento em condições típicas de operação.

Além disso, em velocidades mais altas, como 1800 rpm, os harmônicos e picos característicos associados a defeitos específicos, como o BPFI, tendem a se destacar mais claramente no espectro de vibrações. Isso possibilita uma análise mais precisa e facilita a detecção dos padrões de falha.

Na figura 35, é possível perceber que o valor da aceleração é significativamente maior quando comparado à condição 3, onde o rolamento estava em bom estado, operando na mesma velocidade. Esta diferença marcante nos valores de aceleração destaca a presença do defeito induzido e seu impacto nas medições de vibração. O aumento nas acelerações indica uma maior instabilidade e intensidade das forças dinâmicas no rolamento devido ao dano na pista interna.

É possível observar na figura 36b apresenta frequências em torno dos pontos $2 \times \text{BPFI}$ e $3 \times \text{BPFI}$. Este comportamento indica que a falha na pista interna está gerando vibrações em frequências harmônicas específicas, associadas à passagem das esferas pela área danificada. A proximidade desses picos a $2 \times \text{BPFI}$ e $3 \times \text{BPFI}$ sugere que o dano induzido está significativamente afetando a dinâmica do rolamento, causando uma amplificação das vibrações nessas frequências.

Na figura 36a, é possível perceber que em aproximadamente $4 \times \text{BPFI}$ há uma elevação acentuada, mesmo se comparado aos harmônicos anteriores. Este pico substancialmente maior sugere que o dano na pista interna está gerando uma ressonância significativa nesta frequência específica. A presença de um pico tão grande em $4 \times \text{BPFI}$ indica que a falha não só está presente, mas também está se agravando, causando uma amplificação extrema das vibrações a esta frequência. Isso pode ser interpretado como um sinal claro da gravidade do defeito, indicando que a falha está em um estágio avançado e pode estar próxima de causar uma falha catastrófica se não for tratada.

Esses resultados são cruciais para a manutenção preditiva, pois demonstram como a análise de vibração pode detectar e caracterizar defeitos específicos dentro do rolamento. A identificação de picos em frequências harmônicas associadas aos defeitos permite uma intervenção precoce, evitando danos mais graves e tempo de inatividade não planejado.

Figura 35 – Resposta no tempo com motor a aproximadamente 1800 rpm.

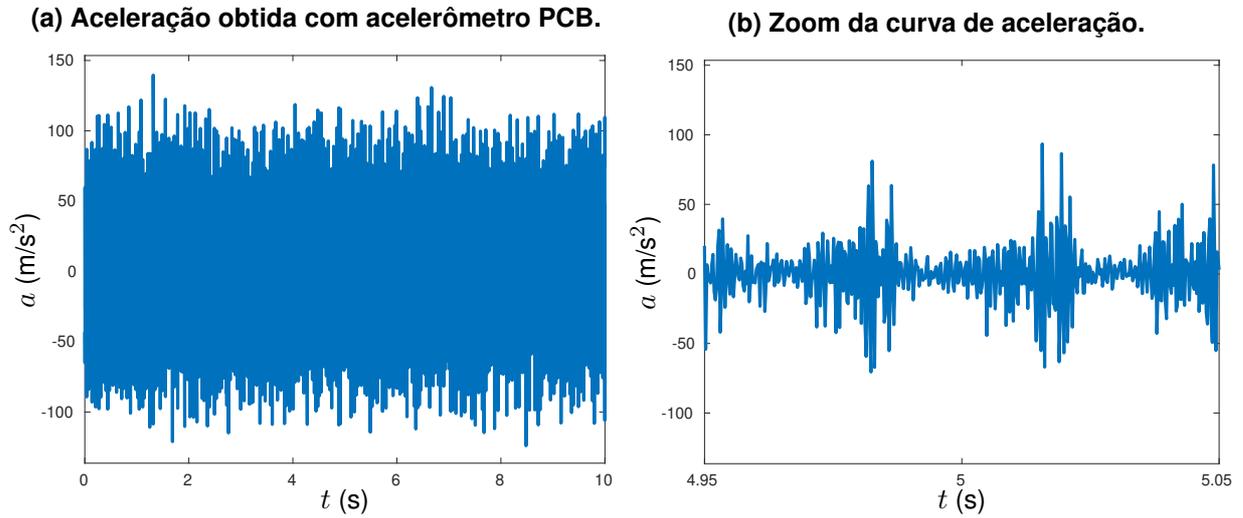
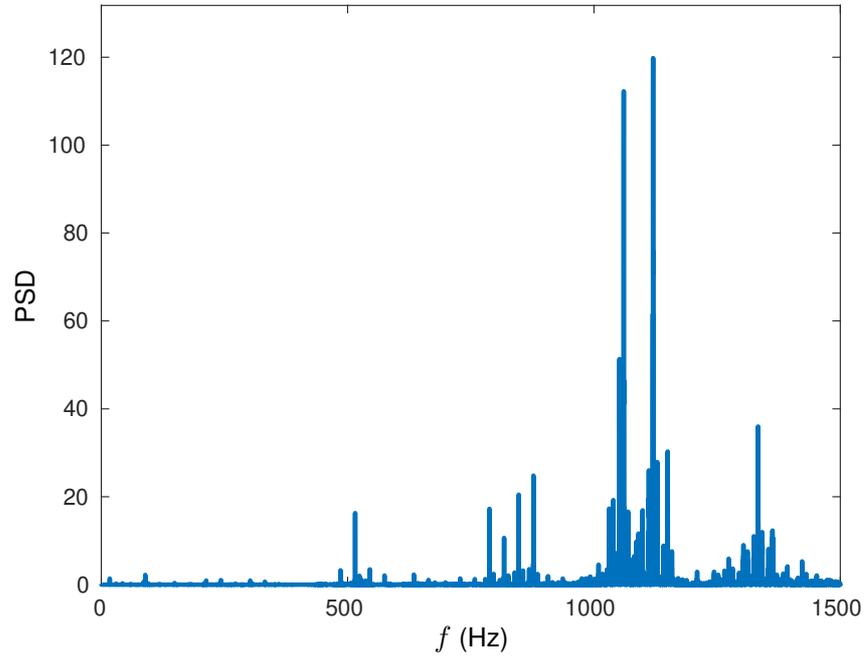
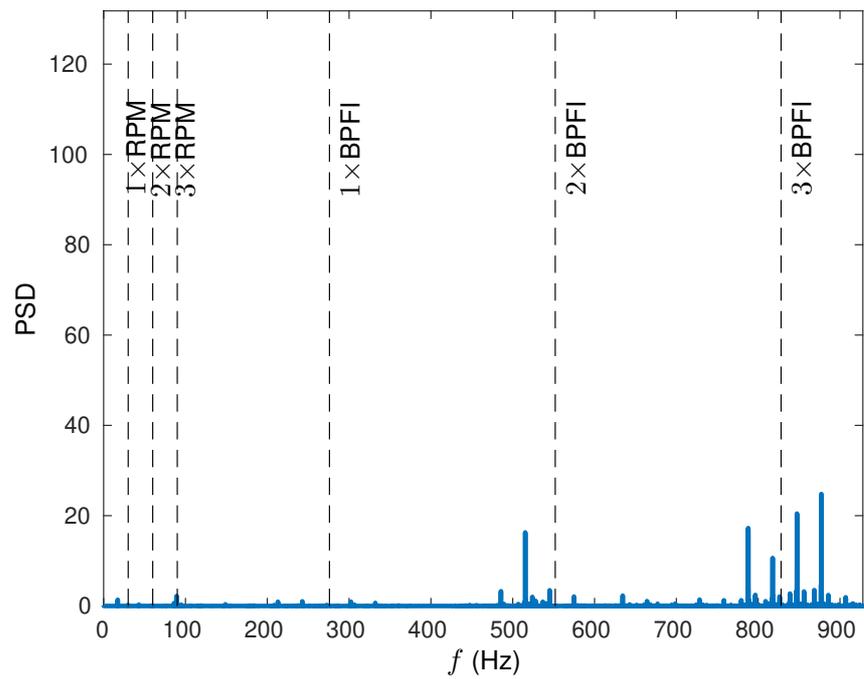


Figura 36 – Resposta em frequência com motor a aproximadamente 1800 rpm.
(a) Densidade de Potência Espectral (PSD) obtida usando a FFT.



(b) Zoom da curva PSD.



Fonte: Autoria própria (2024).

4.2.6 Dados Fluke

Os dados obtidos com o aparelho FLUKE foram analisados para diferentes condições de rolamento, incluindo rolamentos sem defeito induzido, com defeito induzido na pista externa e interna, além de rolamentos com aumento de defeito na pista externa. Os valores medidos foram velocidade (mm/s), aceleração (m/s^2) e RMS (m/s^2) para três frequências de operação: 20 Hz, 40 Hz e 60 Hz. No entanto, a interpretação dos resultados obtidos com o FLUKE 805FC apresenta algumas limitações e incertezas, principalmente devido à dificuldade de garantir que o equipamento esteja devidamente calibrado.

Para a condição 0, rolamento sem defeito induzido, os valores de velocidade, aceleração e RMS aumentam com a frequência de operação, mas os valores obtidos não apresentam características distintivas que possam indicar a presença de defeitos específicos. Por exemplo, na tabela 3, a velocidade varia de 1,79 mm/s a 8,19 mm/s conforme a frequência aumenta de 20 Hz para 60 Hz, mas isso não fornece informações conclusivas sobre o estado do rolamento.

Tabela 3 – Rolamento sem defeito induzido (condição 0)

	Velocidade (mm/s)	Aceleração (m/s^2)	RMS (m/s^2)
20 Hz	1,79	0,77	0,54
40 Hz	2,04	1,53	1,08
60 Hz	8,19	4,06	2,87

Fonte: Autoria própria (2024).

Na condição 1, rolamento com defeito induzido na pista externa, os valores de velocidade, aceleração e RMS são mais elevados em comparação com a condição 0. No entanto, esses valores aumentados podem ser atribuídos ao defeito induzido, mas sem uma análise mais detalhada e conhecimento especializado, não é possível determinar com certeza a gravidade ou a localização exata do defeito. A velocidade na tabela 4 varia de 3,36 mm/s a 20,82 mm/s conforme a frequência aumenta de 20 Hz para 60 Hz, o que sugere uma possível deterioração do rolamento.

Tabela 4 – Rolamento com defeito induzido na pista externa (condição 1)

	Velocidade (mm/s)	Aceleração (m/s^2)	RMS (m/s^2)
20 Hz	3,36	1,55	1,09
40 Hz	4,99	3,10	2,19
60 Hz	20,82	8,47	5,99

Fonte: Autoria própria (2024).

Para a condição 2, rolamento com aumento do defeito induzido na pista externa, os valores da tabela 5 são ainda mais altos do que na condição 1, especialmente em 60 Hz, onde a velocidade atinge 20,85 mm/s. Isso indica que o aumento do defeito tem um impacto significativo nas medições de vibração, mas novamente, sem uma análise detalhada, é difícil obter conclusões precisas.

Tabela 5 – Rolamento com aumento do defeito induzido na pista externa (condição 2)

	Velocidade (mm/s)	Aceleração (m/s^2)	RMS (m/s^2)
20 Hz	4,11	1,57	1,11
40 Hz	4,53	2,22	1,57
60 Hz	20,85	5,71	4,04

Fonte: Autoria própria (2024).

Na condição 3, rolamento sem defeito induzido, os valores de velocidade, aceleração e RMS são menores do que nas condições com defeitos induzidos. No entanto, os valores aumentam com a frequência, semelhante à condição 0, mas os dados da tabela 6 não fornecem informações conclusivas sobre a presença de defeitos.

Tabela 6 – Rolamento sem defeito induzido (condição 3)

	Velocidade (mm/s)	Aceleração (m/s^2)	RMS (m/s^2)
20 Hz	1,14	0,86	0,61
40 Hz	3,22	1,81	1,28
60 Hz	5,53	2,41	1,70

Fonte: Autoria própria (2024).

Finalmente, na condição 4, rolamento com defeito induzido na pista interna, os valores de velocidade, aceleração e RMS observados na tabela 7 são elevados, especialmente em 40 Hz, onde a velocidade atinge 14,97 mm/s. No entanto, a interpretação desses dados também é limitada pela dificuldade de garantir a calibração do equipamento e pela falta de padrões claros de falha nas medições.

Tabela 7 – Rolamento com defeito induzido na pista interna (condição 4)

	Velocidade (mm/s)	Aceleração (m/s^2)	RMS (m/s^2)
20 Hz	4,79	5,36	8,67
40 Hz	14,97	14,95	21,04
60 Hz	10,59	10,57	14,88

Fonte: Autoria própria (2024).

Em resumo, os dados coletados com o medidor de vibrações FLUKE 805FC não permitem tirar conclusões definitivas sobre o estado dos rolamentos testados. A análise dos gráficos e a comparação dos valores medidos são insuficientes para determinar a presença e a gravidade dos defeitos com certeza. Portanto, é necessário utilizar métodos de análise mais avançados e garantir a calibração adequada dos equipamentos de medição para obter resultados mais confiáveis e conclusivos.

5 CONCLUSÕES

A primeira conclusão que pôde-se chegar é que a análise de vibrações em rolamentos oferece uma ferramenta poderosa para detectar e caracterizar defeitos. No entanto, com o medidor de vibrações FLUKE 805FC, é difícil extrair conclusões precisas, já que não garantimos que o equipamento está realmente calibrado. Os dados encontrados e analisados foram obtidos através do acelerômetro PCB, e toda a interpretação foi feita com base na análise e cálculo a partir da coleta de dados do mesmo. Na condição 0, não sabíamos que havia um defeito no sistema, mas com as experimentações, foi possível observá-lo analisando o gráfico.

Nos gráficos simulando a falha na pista interna, o defeito ficou claramente evidente. Conforme a rotação aumenta, os valores de PSD aumentam gradualmente. Esse aumento ocorre porque, à medida que a velocidade de rotação do motor aumenta, a energia das vibrações geradas pelo sistema também aumenta, resultando em um aumento dos valores de PSD. Na figura 36b, observa-se um pico bem próximo aos pontos $2 \times \text{BPFI}$ e $3 \times \text{BPFI}$, indicando que a falha na pista interna está gerando vibrações em frequências harmônicas específicas associadas à passagem das esferas pela área danificada. Na figura 36a, um pico significativo em aproximadamente $4 \times \text{BPFI}$ é observado, muito maior em comparação com os harmônicos anteriores, sugerindo uma ressonância significativa nesta frequência específica. Isso indica que o defeito induzido está em um estágio avançado, causando uma amplificação extrema das vibrações. Esses picos não apenas confirmam a presença do defeito, mas também fornecem informações cruciais sobre sua gravidade. Vale ressaltar que os valores de velocidade são aproximados, já que não foi utilizado um tacômetro para comprovar a rotação.

A análise dos dados coletados nas diferentes condições mostrou que os valores medidos de velocidade, aceleração e RMS variam conforme a condição do rolamento e a frequência de operação. Para a condição 0 (rolamento sem defeito induzido), identificamos picos nas frequências de $1 \times$, $2 \times$ e $3 \times \text{BPFO}$. A presença desses picos é um indicador claro da existência de um possível defeito na pista externa do rolamento, sugerindo que havia uma irregularidade ou dano que estava sendo amplificado à medida que as esferas passavam sobre a pista externa. Esses picos críticos permitiram a detecção precoce de defeitos, permitindo ações preventivas antes que o defeito progredisse para uma falha mais severa. Na condição 1 (rolamento com defeito induzido na pista externa), os valores foram mais elevados, sugerindo uma possível deterioração do rolamento. Na condição 2 (rolamento com aumento do defeito induzido na pista externa), os valores foram ainda mais altos, especialmente em 60 Hz, indicando que o aumento do defeito tem um impacto significativo nas medições de vibração. Na condição 3 (rolamento sem defeito induzido), os valores foram menores do que nas condições com defeitos, mas aumentaram com a frequência, semelhante à condição 0. Finalmente, na condição 4 (rolamento com defeito induzido na pista interna), os valores foram elevados, especialmente em 40 Hz, mas a interpretação desses dados é limitada pela dificuldade de garantir a calibração do equipamento e pela falta de padrões claros de falha nas medições.

A análise de vibrações oferece uma poderosa ferramenta para detectar e caracterizar defeitos, mas a falta de conhecimento na interpretação dos dados pode limitar a capacidade de identificar com clareza os defeitos.

Confirmada a eficácia da análise de vibrações com o acelerômetro na identificação e caracterização de defeitos na pista externa, surge a questão de como implementar essa técnica de forma prática e eficiente na indústria. Isso envolve a adoção de sistemas de monitoramento de vibração em tempo real, capazes de detectar anomalias e emitir alertas automáticos diante de problemas.

Esses sistemas podem ser integrados aos sistemas de controle de máquinas existentes, permitindo supervisão contínua da condição dos rolamentos durante a operação. Além disso, o uso de técnicas avançadas de processamento de sinal e análise de dados, como a análise espectral e de tendências, pode aprimorar ainda mais a capacidade de detecção de defeitos e fornecer *insights* valiosos sobre a saúde geral dos equipamentos.

A identificação dos harmônicos associados ao defeito não apenas confirma sua presença, mas também fornece informações cruciais sobre sua gravidade e extensão. Por exemplo, a amplitude dos harmônicos pode indicar a severidade do defeito e sua possível progressão ao longo do tempo, permitindo medidas proativas para evitar falhas catastróficas e reduzir o tempo de inatividade não planejado das máquinas.

Além disso, a análise de vibrações é uma técnica não invasiva e em tempo real, permitindo sua realização enquanto o equipamento está em operação normal. Isso possibilita a monitorização contínua da condição dos rolamentos, permitindo a detecção precoce de defeitos e a implementação de medidas corretivas antes que danos mais graves ocorram.

No entanto, é importante ressaltar que a interpretação precisa dos dados de vibração requer conhecimento especializado e experiência na análise de falhas de rolamentos. A identificação correta dos padrões de vibração e a distinção entre os harmônicos associados a defeitos e outros fenômenos são essenciais para evitar falsos positivos e garantir uma manutenção eficaz.

Portanto, investir em treinamento adequado para os operadores e engenheiros responsáveis pela análise de vibrações é fundamental para maximizar os benefícios dessa técnica e garantir a confiabilidade operacional dos sistemas de rolamento em uma variedade de aplicações industriais.

Além disso, a implementação de programas de manutenção preditiva baseados em dados de vibração pode substituir os intervalos de manutenção fixos, usando dados em tempo real para prever o momento ideal para a realização de manutenção preventiva.

Por fim, a análise de vibrações pode ser complementada por outras técnicas de monitoramento de condição, como análise de óleo, termografia e inspeção visual, para obter uma visão abrangente do estado dos rolamentos e dos sistemas mecânicos em geral. Integrando essas diferentes abordagens, as empresas podem desenvolver estratégias de manutenção mais ro-

bustas e eficientes, que maximizam a disponibilidade operacional e garantem a segurança dos equipamentos e dos trabalhadores.

Resumindo, os resultados da análise de vibrações em rolamentos oferecem *insights* valiosos que podem ser traduzidos em práticas de manutenção mais inteligentes e eficazes. Ao adotar uma abordagem proativa e baseada em dados para a manutenção de rolamentos, as empresas podem melhorar sua eficiência operacional, reduzir os custos de manutenção e aumentar a confiabilidade de seus equipamentos.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, F. R. do V. **Análises estatísticas e reconhecimento de padrão aplicados em diagnósticos de defeitos em rolamentos através da análise de vibração**. 2007. 111 p. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2007.
- ANTONIOLLI, E. B. **Estudo comparativo de técnicas de medição e análise de vibrações para manutenção preditiva em mancais de rolamentos**. 1999. 142 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade Estadual de Santa Catarina, Florianópolis, 1999.
- CARVALHO, A.; SALES, D.; ZANDON, A. **Vibrações mecânicas**. **EVINCI**, Curitiba, 2015.
- CAVALCANTE, P. F.; JESUS, S. S. Utilização de bancadas de ensaio para estudo do comportamento dinâmico de máquinas rotativas. **HOLOS**, n. 3, p. 18–40, 2011.
- ELLIOTT, C. *et al.* National instruments labview: A programming environment for laboratory automation and measurement. **ScienceDirect**, p. 17–24, 2007. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1535553506003480>.
- FLUKE. **805/805FC Vibration Meter**. 1a. ed. Everett, 2012. Disponível em: https://dam-assets.fluke.com/s3fs-public/805_____umpor0200.pdf. Acesso em: 20 abr. 2023.
- GALLI, V. B. **Manutenção Preditiva por Análise de Vibração Mecânica em Máquinas Rotativas**. [S.l.], 2017. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/157012/000906450.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 24 mai. 2023.
- GIRDHAR, P. **Practical machinery vibration analysis and predictive maintenance**. Burlington, MA: Newnes, 2004. ISBN 9780750662758.
- GREGÓRIO, G. F. P.; SILVEIRA, A. M. da. **Manutenção Industrial**. [S.l.]: Grupo A, 2018. ISBN 9788595026971.
- HOLANDA, S. M. S. **Aplicação da manutenção preditiva por análise de vibrações em equipamentos de trens urbanos com plano de manutenção proposto**. 2016. 97 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2016.
- INMAN, D. J. **Vibrações Mecânicas**. Rio de Janeiro, RJ: Elsevier, 2018. ISBN 9788535288896.
- IUNUSOVA, E. *et al.* Early fault diagnosis in rolling element bearings: comparative analysis of a knowledge-based and a data-driven approach. **Journal of Intelligent Manufacturing**, v. 35, n. 01, p. 2327–2347, 2023.
- JAIN, P. H.; BHOSLE, S. A review on vibration signal analysis techniques used for detection of rolling element bearing defects. **International Journal of Mechanical Engineering**, v. 8, n. 1, p. 14–29, 2021.
- JUNIOR, C. R. d. A.; BRAGA, G. R. **Aplicação de técnicas de manutenção preditiva nas inspeções de rotina de uma montadora automobilística**. [S.l.], 2021. Disponível em: <http://repositorio.unitau.br/jspui/handle/20.500.11874/5984>. Acesso em: 24 mai. 2023.
- KARDEC, A.; NASCIF, J. **Manutenção: função estratégica**. 2. ed. Rio de Janeiro, RJ: Qualitymark, 2009. ISBN 9788573038989.

- KJær, B. . **Measuring Vibration**. 1a. ed. Nærum, 1982. Disponível em: <https://www.bksv.com/-/media/literature/Primers/br0094.ashx?la=en&hash=386CAC9B3EB78550224D5EC44CA483BC725AF8A0>. Acesso em: 04 mai. 2023.
- KRISHNA, V.; VISHWAKARMA, M. A review on vibration-based fault diagnosis in rolling element bearings. **International Journal of Applied Engineering Research**, v. 13, n. 8, p. 6188–6192, 2018.
- LIMA, A. B. G. d. **Análise de vibração em mancais de rolamento de motores e bombas**. [S.l.], 2019. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/46992>. Acesso em: 24 mai. 2023.
- MARÇAL, R. A.; SANTOS, R. L. d. **Medição, análise e controle de vibração em máquinas industriais: estudo de caso em uma empresa de grande porte do setor madeireiro**. [S.l.], 2013. Disponível em: <https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/16928>. Acesso em: 27 mar. 2023.
- MERCURI, J. R.; MARTINS, O. F.; TRAUTMANN, P. V. **Desenvolvimento de um sistema supervisor para análise de motores elétricos através da vibração mecânica**. [S.l.], 2011. Disponível em: <https://educapes.capes.gov.br/handle/capes/652071>. Acesso em: 27 mar. 2023.
- MOURA, R. E. L.; RUZENE, D. S.; SILVA, D. P. O *just-in-time* como método de planejamento e controle: uma revisão bibliográfica. In: **Anais do IX Simpósio de Engenharia de Produção de Sergipe**. Sergipe, SE: [s.n.], 2017. p. 552–558.
- NEPOMUCENO, L. X. **Técnicas de manutenção preditiva**. São Paulo, SP: Blucher, 1989. v. 1. ISBN 8521200927.
- NSK. **NSK Bearing Doctor - Diagnóstico Rápido de Ocorrências em Rolamentos**. 1a. ed. São Paulo, 2012. Disponível em: <https://nsk.com.br/upload/file/B08.pdf>. Acesso em: 14 jun. 2023.
- OTANI, M.; MACHADO, W. V. A proposta de desenvolvimento de gestão da manutenção industrial na busca da excelência ou classe mundial. **Revista Gestão Industrial**, v. 04, n. 02, p. 01–16, 2008.
- PASSAMAI, B. D.; CASTILHO, G. B. D. **Nova metodologia de análise de falha em empresa de refrigerante - Proposta e estudo de caso**. [S.l.], 2007.
- RAO, S. **Vibrações Mecânicas**. 4. ed. São Paulo, SP: Pearson Prentice Hall, 2009. ISBN 9788576052005.
- SANTANDER, E. J. O. **Aplicação de curtose espectral na identificação de falhas em mancais de rolamentos**. 2014. 138 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.
- SEVERO, B. B.; TROJAN, F.; KOVALESKI, J. L. Manutenção preditiva por ultrassom. In: **III CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE PR**. Ponta Grossa, PR: [s.n.], 2013. p. 1–9.
- SILVEIRA, C. B. Confiabilidade e disponibilidade de máquinas. **Citisystems**, 2012.
- SOMA. **Manual - Bancada didática de transmissão de movimentos com três eixos**. 1a. ed. São José, 2017. Disponível em: <https://soma.eng.br/bancadas/conjunto-transmissao-de-movimentos-3-eixos/>. Acesso em: 22 mai. 2023.

TELES, J. **Planejamento e controle da manutenção descomplicado**: uma metodologia passo a passo para implementação do PCM. Brasília, DF: Engeteles Editora, 2019. ISBN 9786590051400.

TIBONI, M. *et al.* A review on vibration-based condition monitoring of rotating machinery. **Applied Sciences**, v. 12, n. 3, p. 1–44, 2022.

WU, G. *et al.* A review on rolling bearing fault signal detection methods based on different sensors. **Sensors**, v. 22, n. 21, p. 1–30, 2022.