

ASSOCIAÇÃO EDUCATIVA EVANGÉLICA
FACULDADE EVANGÉLICA DE GOIANÉSIA – FACEG
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

LEOMAR PEREIRA DE OLIVEIRA

**ANÁLISE DE VIBRAÇÃO EM MANCAIS ROTATIVOS PARA
MANUTENÇÃO PREDITIVA, UTILIZANDO
COLETOR/ANALISADOR DE VIBRAÇÕES**

2021	ANÁLISE DE VIBRAÇÃO EM MANCAIS ROTATIVOS PARA MANUTENÇÃO PREDITIVA, UTILIZANDO COLETOR/ANALISADOR DE VIBRAÇÕES.	FACEG
------	--	-------

LEOMAR PEREIRA DE OLIVEIRA

**ANÁLISE DE VIBRAÇÃO EM MANCAIS ROTATIVOS PARA MANUTENÇÃO
PREDITIVA, UTILIZANDO COLETOR/ANALISADOR DE VIBRAÇÕES**

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica, da Faculdade Evangélica de Goianésia - FACEG, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Goianésia, _____ de _____ de 2021.

BANCA EXAMINADORA

Profa. Dra. Marinés Chiquinquirá Carvajal Bravo Gomes - Orientadora
Faculdade Evangélica de Goianésia

Profa. Me. Ariane Martins Caponi Lima- Avaliadora
Faculdade Evangélica de Goianésia

Prof. Me. Rogério Rodrigues dos Santos - Avaliador
Faculdade Evangélica de Goianésia

LEOMAR PEREIRA DE OLIVEIRA

**ANÁLISE DE VIBRAÇÃO EM MANCAIS ROTATIVOS PARA MANUTENÇÃO
PREDITIVA, UTILIZANDO COLETOR/ANALISADOR DE VIBRAÇÕES**

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica, da Faculdade Evangélica de Goianésia - FACEG, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

FICHA CATALOGRÁFICA

O48e

Oliveira, Leomar Pereira de.

Análise de Vibração em Mancais Rotativos para Manutenção Preditiva, utilizando Coletor/Analisador de Vibrações/ Leomar Pereira de Oliveira – Goianésia: Faculdade Evangélica de Goianésia, 2021 – Faceg, 2021.

42 p.; il. p&b.

Orientador: Profa. Dra. Marinés Chínquiquirá Cavajal Bravo Gomes.

Monografia de Graduação – Faculdade Evangélica de Goianésia: FACEG, 2021.

1. Mancais Rotativos. 2. Sensor de vibração 3. Amplitude de vibração

I. Oliveira, Leomar Pereira de. II. Análise de Vibração em Mancais Rotativos para Manutenção Preditiva, utilizando Coletor/Analisador de Vibrações.

CDU 621

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

Oliveira, L. P. **Análise de Vibração em Mancais Rotativos para Manutenção Preditiva, utilizando Coletor/Analisador de Vibrações.** 2021. 48 p. Monografia - Curso de Engenharia Mecânica, Faculdade Evangélica de Goianésia, Goianésia, 2021.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Leomar Pereira de Oliveira

TÍTULO DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO: Análise de Vibração em Mancais Rotativos, utilizando Coletor/Analisador de Vibrações.

GRAU: Bacharel em Engenharia Mecânica

ANO: 2021

É concedida à Faculdade Evangélica de Goianésia permissão para reproduzir cópias desta Monografia de Graduação, única e exclusivamente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva para si os outros direitos autorais de publicação. Nenhuma parte desta Monografia pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor. Citações são estimuladas, desde que citada à fonte.



Nome: LEOMAR PEREIRA DE OLIVEIRA

CPF: 059.711.051-40

Endereço: GOIANÉSIA - GO

Email: leomarpereira33@gmail.com

“Se você quiser descobrir os segredos do Universo, pense em termos de energia, frequência e vibração”.

(Nikola Tesla).

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por estar sempre me dando forças para continuar, saúde e para que eu pudesse atingir os meus objetivos.

Aos meus pais, por estarem sempre ao meu lado me apoiando e me incentivando nos momentos mais felizes e tristes da minha vida.

As minhas irmãs, que sempre foram uma das minhas maiores motivações.

Aos meus amigos, Carlos Santos, Rogério Ramiro, Igor Bernardes, Ricardo de Jesus e em especial o Bruno Farias de Oliveira, pelos os incentivos e críticas construtivas.

A minha prezada orientadora Prof^a. Marinés Chiquiquira, pela dedicação, comprometimento e compreensão.

RESUMO

O principal objetivo da análise de vibração em elementos mecânicos é prever e evitar quebras, assim como prolongar a vida útil do equipamento ou sistema. Para atingir esse objetivo é necessário realizar acompanhamentos frequentes das condições reais de funcionamento, dessa forma é possível identificar defeitos que, em estágios evolutivos, podem ocasionar a falha. Um dos princípios da manutenção preditiva é analisar o equipamento em seu regime regular de trabalho, e esse fator é precisamente uma das grandes vantagens da aplicação da abordagem preditiva, visto que não atrapalha a produção. O emprego da técnica de análise de vibração em rolamentos proporciona resultados agudamente importantes, identificando quaisquer anomalias. Mancais rotativos, ao entrar em funcionamento, exercem alguns esforços dinâmicos que se propagam por toda carcaça, e alguns esforços podem ser considerados na elaboração dos projetos, entretanto, inúmeros fatores durante a montagem ou atividade em campo podem levar a reações indesejáveis, tais como desalinhamentos, desbalanceamentos, folgas, empenamentos de eixos, podendo assim trazer danos no sistema conjunto eixo/mancal ou até mesmo em outras partes dos componentes que estão interligados ao sistema. No presente trabalho foram analisados padrões de vibração em mancais rotativos novos e com desgaste, utilizando coletor/analizador de vibrações, avaliando as diferenças entre ambas as situações, com respeito aos parâmetros de amplitude de vibração.

Palavras chave: Mancais rotativos; Sensor de vibração; Amplitude de vibração.

ABSTRACT

The main objective of vibration analysis in mechanical elements is to predict and prevent breakdowns, as well as to prolong the life of the equipment or system. In order to achieve this objective, it is necessary to perform tasks specific to the real conditions that may work, in order to identify that they may occasionally occur, in order to identify that a failure may occur. One of the principles of predictive maintenance is analyzing the equipment in its regular working regime, and this factor is precisely one of the great advantages of applying the predictive approach, since it does not interfere with production. The use of vibration technique in bearings provides important acute results, identifying any anomalies. Rotary bearings, throughout drills, drills and drills, all drills can be performed for drills, drills and drills as drills can be run during the construction of the projects, drills and drills can be run during drills, drills or activities, exercises, exercises, exercises or training exercises, unbalances, clearances, warping of shafts, which can thus damage the joint shaft/bearing system or even other parts of the components that are interconnected to the system. In the work, movement patterns were designed in new rotating bearings and using vibration manipulators/analyzers, evaluating the differences between both situations, with respect to the parameters of vibration amplitude.

Keywords: Rotating bearings; Vibration sensor; Vibration amplitude.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Exemplo de um pêndulo.	21
Figura 2 - Função senoidal.	21
Figura 3 - Representação de critério de vibração.	22
Figura 4 - Gráfico representando a amplitude de vibração.	25
Figura 5 - Fluxograma para análise de vibração.....	25
Figura 6 - Desbalanceamento de massa.....	26
Figura 7 - Desalhiamentos em eixos.....	27
Figura 8 - Montagem de um macal bipartido.	28
Figura 9 - Amostra de Elemento apresentando marca de erosão..	29
Figura 10 - Defeito na pista externa.	29
Figura 11 - Defeito em elementos rolantes.....	30
Figura 12 - Defeito no elemento rolante do rolamento..	30
Figura 13 - Bancada didática.	32
Figura 14 - Microlog GX75 da SKF.....	33
Figura 15 - Frequência defeitos rolamento 31312.....	34
Figura 16 - Rolamento 31312 J2 com Desgaste Superficial..	34
Figura 17 - Tendência em aceleração no Rolamento sem Defeitos..	35
Figura 18 - Espectro de Vibração em Aceleração no Rolamento sem Defeitos.....	36
Figura 19 - Tendência em aceleração no Rolamento com Defeito.....	36
Figura 20 - Espectro de vibração em aceleração no Rolamento com Defeito.	37
Figura 21 - Tendência em velocidade (mm/s) no Rolamento com Defeito.....	38
Figura 22 - Espectro de Vibração em Velocidade (mm/s) no Rolamento com Defeito..	38
Figura 23 - Gráfico representando a variação de aceleração entre os rolamentos..	39

LISTA DE SIMBOLOS E ABREVIATURAS

A	Amplitude
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
BSF	Frequência de rotação da esfera
BPFI	Frequência da pista interna
BPFO	Frequência da pista externa
CPM	Ciclos Por Minuto
CPS	Oscilações por Segundos
CSA	Carlos Santos Alves
Dt	Taxa de variação média da velocidade em relação ao tempo
f	Frequência
gE	Envelope de aceleração
Hz	Hertz
ISO	Organização Internacional de Normalização
kHz	kilohertz
k	Constante elástica
KW	Quilowatt
m	Metros
MHS	Movimento harmônico simples
NBR	Normas Técnicas e abreviação de Norma Brasileira
rad	Radianos
RPM	Rotação por minuto
SI	Sistema internacional de medidas
t	Tempo
T	Período
ω	Velocidade angular
Φ	Ângulo de fase

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 Objetivo geral.....	14
1.2 Objetivos específicos.....	15
1.3 Justificativa	15
1.4 Problema de pesquisa.....	16
2 REFERENCIAL TEÓRICO.....	17
2.1 Manutenção mecânica.....	17
2.1.1 Manutenção corretiva	17
2.1.2 Manutenção preventiva.....	17
2.1.3 Manutenção preditiva	18
2.2 Vibração	19
2.2.1 Movimento harmônico simples.....	20
2.2.2 Critérios de vibração	21
2.2.3. Quantificação dos níveis de vibrações.....	24
2.2.4. Mensuração e análise de vibração	25
2.3 Principais Defeitos de Origem Mecânica	26
2.3.1 Desbalanceamento	26
2.3.2 Desalinhamento	26
2.3.3 Folgas	27
2.3.4 Defeitos em mancais de rolamentos	28
3 METODOLOGIA	32
3.1 Bancada Didática.....	32
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	35
5 CONCLUSÃO	40
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	41

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos as empresas têm intensificado suas buscas por alternativas para garantir a integridade e confiabilidade de seus produtos e equipamentos. A análise de vibração é uma técnica que faz o monitoramento de vibrações em máquinas indústrias e equipamentos mecânicos, identificando alterações na vibração associando-as ao acompanhamento de tendências (SOUZA, 2019).

A maior parte dos equipamentos e aparelhos industriais é feita para trabalharem de forma regular, evitando vibrações. Nessas máquinas, as vibrações promovem problemas ou até mesmo a deterioração dos equipamentos. Se tais causas não forem corrigidas, a própria vibração pode trazer algum tipo de danificação (SOUZA, 2019).

Equipamentos diferentes têm modos potenciais de falha distintos, o que muda de acordo com a classificação: Máquinas Acionadoras (Motores elétricos, motores de combustão, turbinas), transmissões (Acoplamentos, Engrenagens, correias) e Máquinas Acionadas (Bombas, Compressores, Geradores, transportadores, entre outros) (ROSSDEUTSCHER, 2018).

Os rolamentos estão dentre os componentes mais importantes de uma máquina e um dos mais utilizados como elemento de ligação entre componentes relativos de rotação. Os mesmos estão presentes nos diversos tipos de aplicação, tamanho, rotação e ambiente. A sua deficiência, em geral, acarreta a parada do equipamento trazendo enormes prejuízos à operação.

De acordo com a evolução dos processadores de sinais digitais as técnicas de monitoramento, análise e diagnósticos tem apresentado grande aprimoramento dos profissionais envolvidos (REIS, 2018).

Á análise de vibração é caracterizada em dois fatos básicos: (1) todos os modos de falha comuns incluem componentes distintos de frequência de vibração que podem ser isolados e identificados, e (2) a amplitude de cada componente (HOLANDA, 2016).

O acompanhamento por análise de vibração tem como alvo principal:

- Aumentar a disponibilidade do equipamento;
- Redução de custos;

- Evitar desgastes prematuros de componentes;
- Evitar intervenções desnecessárias;
- Evitar riscos de acidentes.

Um dos indicadores de falhas na manutenção é a análise de vibração, método usado na manutenção preditiva. Esta é essencial para conhecer, melhorar, e garantir a qualidade do desempenho de equipamentos e máquinas industriais (OLIVEIRA, 2015).

Os equipamentos e máquinas emitem vibrações no qual a frequência se mantém constante, e quando ambos começam a ter algum problema estrutural, há uma mudança na distribuição de energia vibratória, sendo que este evento pode promover uma falha eventual (BATISTA, 2019).

Diante dos problemas encontrados, a análise de vibração pode identificar essas alterações, trazendo à tona as origens da irregularidade, e deste modo, é possível intervir no equipamento ou máquina de modo eficiente antes que possa ocorrer um problema maior. A variação de vibração pode causar (SALOMÃO, 2013).

- Desgaste prematuro de componentes;
- Quebras inesperadas (com paradas repentinas de produção);
- Aumento do custo de manutenção (consumo excessivo de peças de reposição);
- Perdas de energia;
- Fadiga estrutural;
- Desconexão de partes (instabilidade geométrica);
- Baixa qualidade dos produtos (acabamento ruim).

O objetivo deste trabalho era realizar uma análise de vibração em mancais rotativos, avaliando os dados obtidos com respeito aos parâmetros de vibração e identificar possíveis falhas através desses resultados.

1.1 Objetivo geral

Analisar vibrações em mancais rotativos utilizando coletor/analizador de vibrações.

1.2 Objetivos Específicos:

- Analisar as vibrações por meio do coletor/analisador de vibração em mancais de rolamento novos;
- Analisar as vibrações por meio do coletor/analisador de vibração em mancais de rolamento com desgaste;
- Avaliar os resultados encontrados pela análise de vibração e comparar ambas as situações.

1.3 Justificativa

Diante do cenário industrial é possível notar os problemas encontrados pelas vibrações em equipamentos e máquinas industriais, tendo percas de performasse e desgaste (por exemplo, reduzir a vida útil de rolamento) trazendo a danificação do equipamento.

Tais vibrações trazem também ruídos, provocam adversidades de segurança e conduzem à deterioração das condições de trabalho em uma fábrica. Além disso, aumentam o consumo de energia e afetam a qualidade do produto fabricado. Nas piores hipóteses, a vibração pode danificar equipamentos com gravidade, levando à sua inutilidade ou até mesmo a sua suspensão na produção da fábrica. Um aspecto positivo: é que se for medida e analisada corretamente, pode ser utilizada como elemento indicativo da condição da máquina, ajudando a guiar a manutenção e na tomada de medidas corretivas antes de uma falha maio (CARVALHO, 2017).

Devido à análise vibracional ser bastante empregada no ambiente de manutenção, e abranger vários ramos da engenharia, se faz necessário para o engenheiro mecânico ter conhecimentos sobre os efeitos da vibração em sistemas mecânicos. No qual este método pode ser um forte aliado na detecção de falhas garantido assim uma maior confiabilidade e durabilidade dos equipamentos e maquinas industrial, podendo também corrigir possíveis falhas ao longo do processo industrial evitando até mesmo perdas indesejadas.

1.4 Problema de pesquisa

Ao longo dos últimos tempos, o monitoramento tem sido tema de várias pesquisas, apesar de sua utilização como base para adoção de filosofias de manutenção no Brasil ainda ser nova. Se tratando de vibrações, as soluções por sua vez são caras, de tecnologias fechadas (processo no qual toda a cadeia de desenvolvimento de ideias e produtos não são compartilhadas) e seu uso geralmente se limita à comparação da condição do ativo monitorado com uma base referencial (amostragem da norma), e não aborda ainda conceitos relativos aos diagnósticos do problema.

O homem desde os tempos remotos tenta desenvolver equipamentos, situações, processos e procedimentos que visam melhorar a sua vida. As novas tecnologias disponíveis para a indústria estão sendo muito bem aproveitadas, principalmente na área de manutenção preditiva. Cada vez mais, empresas estão usando os avanços tecnológicos para melhorarem suas operações. Assim, o problema de pesquisa é apresentado na forma interrogativa:

Quais procedimentos e ferramentas (hardware software) são necessários para análises de vibrações em máquinas e equipamentos rotativos no ramo industrial?

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Manutenções mecânicas

O emprego da filosofia de manutenção surgiu durante a revolução industrial no final do século 19, devido à grande demanda em série. Até meados do ano de 1915 esse conceito não recebia a devida importância, assim como o reparo das máquinas. A partir dos acontecimentos durante a revolução industrial relacionados com a manutenção foram criadas e empregadas as primeiras manutenções corretivas (FREITAS, 2016).

Conforme o aumento de produção durante a Segunda Guerra Mundial surgiu à preocupação, não só de corrigir falhas, mas também da necessidade de evitar que elas ocorressem. À vista disso, surgiram às primeiras equipes especializadas em manutenção.

2.1.1 Manutenção Corretiva

Essa manutenção tem por objetivo restaurar as condições iniciais e ideais de operação de máquinas e equipamentos, eliminando as fontes de falhas que possam existir (ALVES REIS, 2021).

Dependendo do contexto, a manutenção corretiva pode ocorrer em duas situações distintas: o primeiro caso devido a uma anomalia inesperada e não planejada que tenha acontecido, como por exemplo, a quebra de um redutor ou, um segundo caso, devido ao relato de problema identificado através de um programa de monitoramento das condições do equipamento, como por exemplo, a intervenção após a detecção da alteração da vibração do motor (ALVES REIS, 2021).

Para controlar as paradas na manutenção visando lucro, é de suma importância que se tenha um plano de contingência, não prolongar as medidas corretivas e sempre manter um histórico das assistências realizadas. Esta é a manutenção mais simples de ser implantada a gestão de ativos.

2.1.2 Manutenção Preventiva

A definição de manutenção preventiva é: “Toda manutenção efetuada em intervalos predeterminados, ou de acordo com critérios prescritos, destinada a reduzir a probabilidade de falha ou a degradação do funcionamento de um item” (NBR, 1994).

O intuito da manutenção preventiva é elevar e promover os índices de acesso e disponibilidade de um equipamento. Essa manutenção tem ação de controle e monitoramento de áreas e máquinas respeitando uma periodicidade. Com isso aumenta a disponibilidade, e evita falhas ou interrupções no funcionamento dos aparelhos.

Ao planejar uma manutenção é fundamental conhecer as rotinas e recursos dos equipamentos e maquinários, definir uma equipe responsável e estabelecer o dia e hora para execução do trabalho (FREITAS, 2016).

Para que se tenha um bom plano de manutenção, são necessários que sejam questionados alguns itens:

- Quais serviços serão realizados?
- Quando os serviços serão realizados?
- Quem são os responsáveis pela execução do serviço?
- Que recursos serão utilizados para a atividade?
- Quanto tempo será gasto em cada atividade?
- Qual o custo do serviço?

2.1.3 Manutenção Preditiva

Este tipo de manutenção preditiva consiste na monitorização de medições regulares e colheita de dados, cujo objetivo é indicar o verdadeiro estado dos equipamentos e instalações. Durante o processo de rastreamento, é necessário medir regularmente as condições mecânicas, eletrônicas, pneumáticas, hidráulicas e elétricas dos equipamentos e dispositivos (FREITAS, 2016).

O objetivo é reduzir os intervalos de manutenção das máquinas em caso de avaria (correção) e correção do plano (prevenção), aumentando assim a disponibilidade dos equipamentos. Quando a manutenção é bem executada e suportada pelo software de gerenciamento de manutenção, ela gera uma série de dados.

Ao analisar as informações, possíveis falhas e defeitos podem ser medidos e previstos antes que ocorram de fato. Depois que a equipe responsável analisa esses

resultados, dois procedimentos podem ser usados (ROSSDEUTSCHER, 2018):

- Diagnóstico: investigar a causa raiz e a gravidade da falha;
- Análise de tendência de falha;
- Prever danos ou defeitos, e providenciar reparos. Antecipados para evitar falhas.

A primeira etapa na execução de um plano de previsão é distinguir com precisão quais máquinas ou equipamentos devem ser analisados, em qual andar ou área eles estão localizados, os parâmetros de medição individuais de cada equipamento e a equipe técnica responsável pelo procedimento.

É de grande importância utilizar a plataforma de gerenciamento de manutenção, registrar o valor medido de cada item de inspeção, podendo também anexar imagens ou vídeos para fazer fotos das reais condições do equipamento.

2.2 Vibração

No campo da engenharia mecânica, a vibração é um item muito crítico, pois considerando o impacto da vibração, em alguns casos é catastrófico, isto devido a que o desgaste prematuro dos componentes mecânicos leva a falhas por fadiga do material e trincas causadas por cargas dinâmicas (CARVALHO, 2017).

Se a possibilidade de vibração não for completamente eliminada nessas condições, pelo menos se deve tomar cuidado para manter as inspeções e, com a ajuda de planos de manutenção e programação adequados, prever a substituição de peças mecânicas antes que a situação se complique.

Esse monitoramento deve começar na fase de projeto, quando os efeitos da vibração serão considerados no planejamento de máquinas, fundações, estruturas, motores, turbinas, sistemas de controle e outros componentes que possam ser afetados por tais efeitos. Muitos recursos são normalmente usados para melhorar equipamentos e máquinas, mancais industriais, redutores e bombas (CARVALHO, 2017).

O monitoramento preditivo de sistemas mecânicos, por meio de análise de vibração, é capaz de identificar problemas que podem ser fatais e altamente prejudiciais à eficiência da produção e à segurança dos profissionais que operam os equipamentos

(HOLANDA, 2016).

Os principais problemas encontrados na análise de vibração do motor são:

- Qualidade desequilibrada (desbalaceamento de massa);
- Desalinhamento e empenamento do eixo;
- Desgaste do rolamento;
- Desgaste de engrenagens;
- Questões estruturais;
- Má lubrificação;
- Problemas elétricos do motor.

Para entender os princípios básicos da análise de vibração, é necessário saber o que é vibração. A vibração é todo movimento que se repete, regular ou irregularmente, depois de um intervalo de tempo. O movimento de uma corda de violão e de um pêndulo são exemplos simples de vibrações reais. Na engenharia esses movimentos acontecem em elementos de máquinas e nas estruturas, quando esses são submetidos a ações dinâmicas (AGUIAR, 2014).

A análise de vibração é definida como um movimento em que a massa é reduzida ao ponto de força. A ação dessa força faz com que o ponto execute um movimento oscilante. Para o movimento oscilatório de um ponto que constitui uma vibração, ele deve seguir um caminho denominado trajetória completa ou período, denominado período de oscilação (BENEDETTI, 2002).

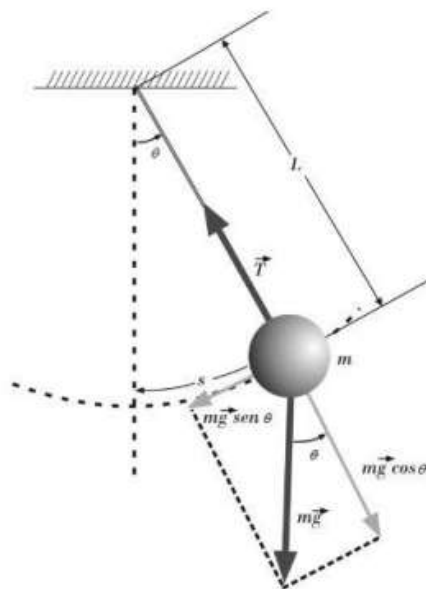
2.2.1 Movimento harmônico simples

Em termos físicos, o movimento harmônico simples (MHS) é um percurso que ocorre na oscilação em torno de uma posição de equilíbrio. Nesse modo particular de movimento, existe uma força que guia o corpo a um ponto de equilíbrio e sua energia é igual à distância alcançada quando o objeto se afasta do ponto de origem (BATISTA, 2019).

Um exemplo clássico de movimento harmônico simples é o movimento do pêndulo de um relógio, que vai da posição máxima do lado esquerdo à posição máxima

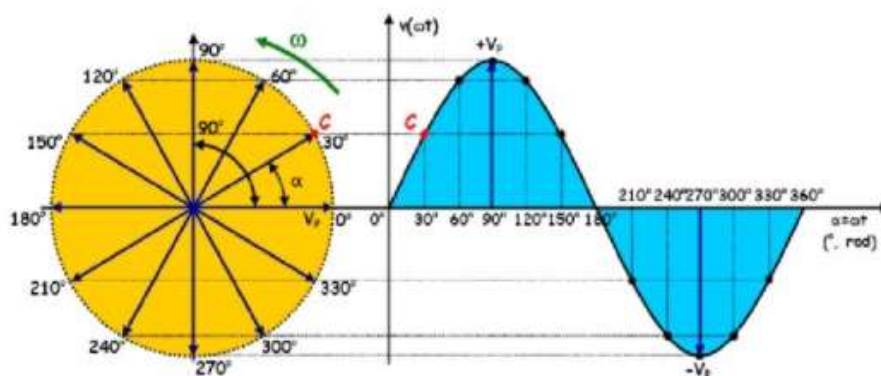
lado direito, sempre pelo o mesmo trajeto de equilíbrio, isto é (posição central), como mostrado na figura 1, e tendo como exibição o gráfico de uma senoide, de acordo com figura 2.

Figura 1 - Exemplo de um pêndulo.



Fonte: OLIVEIRA, 2020.

Figura 2 - Função senoidal.



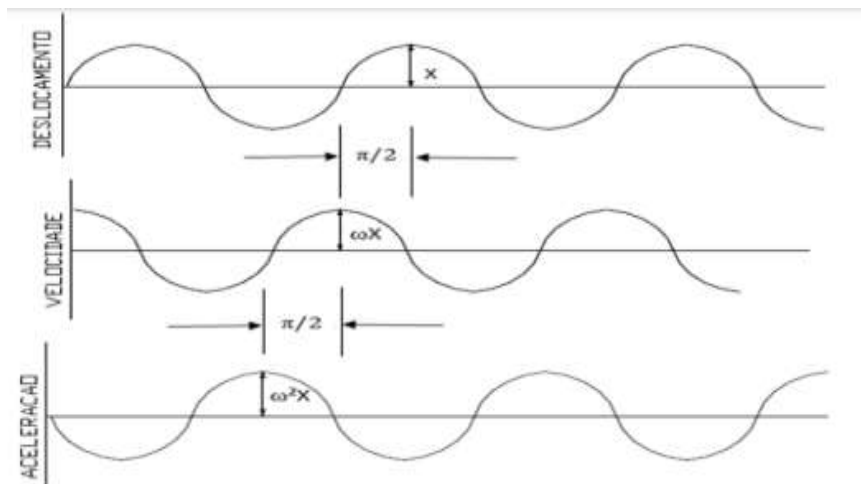
Fonte: FRITZEN, 2021.

2.2.2 Critérios de vibração

Os critérios para estimação dos níveis de vibração são usualmente expressos em

termos de deslocamento, velocidade e aceleração, cujas representações estão de acordo com as ilustrações da figura 3: (HOLANDA, 2016).

Figura 3 - Representação de critério de vibração.



Fonte: KUHN, 2019.

Os três critérios representam “o quanto” o equipamento está vibrando (ALVES, 2021). Os Parâmetros de medidas da vibração são quase universalmente medidos em unidades métricas de acordo com recomendações de normas como a ISO2372, atualmente substituída pela ISO10816, sendo:

- **Deslocamento** (x) medido em micrometros (μm). Pode ser medido pelo grau de distanciamento do ponto em relação à sua posição de repouso, sendo a unidade mais óbvia para se mensurar a vibração, pois é aquela que mais se aproxima da ideia de oscilação em torno de um ponto médio. O deslocamento realça componentes de baixa frequência, recomendado em medições abaixo de 10 Hz, sendo representado pela fórmula:

$$x = A \cos(\omega t + \phi_0) \text{ Equação (1)}$$

A posição (x), em metros, é dada por: Amplitude do movimento (A), em metros, Frequência angular ou velocidade angular (ω), em radianos por segundo, Tempo (t), em segundos e Fase inicial do MHS (ϕ_0), em radianos.

- **Velocidade** (v) medida em milímetro/segundo (mm/s). O deslocamento do ponto implica a existência de uma velocidade que poderá ser variável. Derivando uma vez a função deslocamento, obtêm-se a velocidade. Sendo o parâmetro menos representativo para componentes tanto de baixa como de alta frequência, o parâmetro normalmente escolhido para avaliação da severidade de vibração entre 10 Hz e 1000 Hz, sendo representado pela fórmula:

$$V = -\omega A \text{Sen}(\omega t + \phi_0) \text{ Equação (2)}$$

A velocidade de uma partícula (v), em metros por segundo, é dada por: Velocidade angular (ω), em radianos por segundo, Amplitude (A), em metros. Tempo (t), em segundos, e Fase inicial (ϕ_0), em radianos.

- **Aceleração** (a) medida em metro/segundo² (m/s²). Se a velocidade for variável, existirá certa aceleração no movimento. Derivando duas vezes a função deslocamento ou uma vez a função velocidade, representada pela fórmula:

$$\alpha = -\omega^2 A \text{cos}(\omega t + \phi_0) \text{ Ou } \alpha = -\omega^2 x \text{ Equação (3)}$$

A aceleração de uma partícula (A), em metros por segundo ao quadrado, depende de:

- Velocidade angular (ω), em radianos por segundo.
- Posição (x), em metros.

A aceleração de vibração é o parâmetro que representa melhor os componentes de alta frequência, sua aplicação é recomendada na monitoração de rolamentos, engrenamentos, pulsação de pressão em compressores rotativos, e demais equipamentos que apresentem frequência de defeito entre 1.000 Hz e 10.000 Hz. Mais três variáveis são fundamentais para a análise de vibração (HOLANDA, 2016).

- **Amplitude (A):** Indica a severidade (grau de impacto) do evento, através da intensidade que ocorre. Medida em milímetro (mm). Ela corresponde à distância entre a posição de equilíbrio e a posição ocupada para afastar o corpo.
- **Período (T)** é o intervalo de tempo em que o evento de oscilação se complete k : constante elástica da mola (N/m) e m : massa do corpo, medido em quilograma (kg) Ele é calculado através da fórmula:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}} \text{ Equação (4)}$$

Outra maneira de expressar o período é relacionando-o com a frequência, que representa o número de oscilações realizadas por unidade de tempo.

$$T = \frac{1}{f} \text{ Equação (5)}$$

- **Frequência (f):** Indica “o que” está provocando a vibração. É a quantidade de vezes, por unidade de tempo, em que um fenômeno se repete, ou seja, a quantidade de ciclos executados na unidade de tempo. No sistema internacional de unidades (SI), a unidade de frequência recebe o nome de hertz (Hz), que equivale a um CPS. Dada pela a fórmula:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \text{ Ou } \omega = 2\pi f \text{ Equação (6)}$$

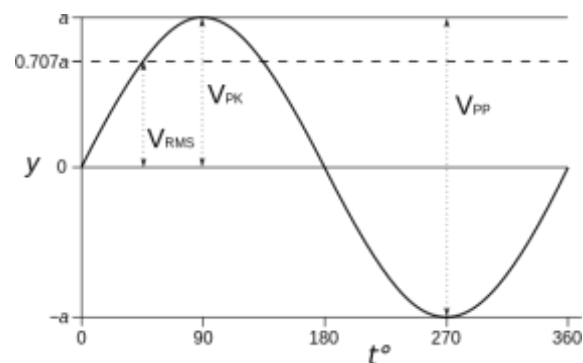
Obs.: note que ela também pode ser calculada relacionando-se com o período (T) ou com a frequência (f).

- **Fase (Φ):** É o ângulo inicial do argumento da função senoidal que descreve o movimento harmônico. Indica o avanço ou atraso de um sinal. A vibração é sempre atrasada em relação à oscilação. Grandeza medida em radiano (rad).

2.2.3 Quantificação dos níveis de vibrações

Os níveis de vibrações são caracterizados pela amplitude da vibração, que é a característica que descreve a sua serenidade, podendo ser medida de diversas maneiras. Na figura 4 pode-se observar a relação entre a Amplitude Pico-Pico, o Pico, a Média e o Nível Eficaz (RMS) (HOLANDA, 2016).

Figura 4 - Gráfico representando a amplitude de vibração.



Fonte: ALVES, 2021.

O valor Pico a Pico indica o percurso máximo da onda, é o maior ciclo, usado para identificar a falha no estágio prematuro e também para seu estágio avançado, não levando em consideração o histórico no tempo da onda.

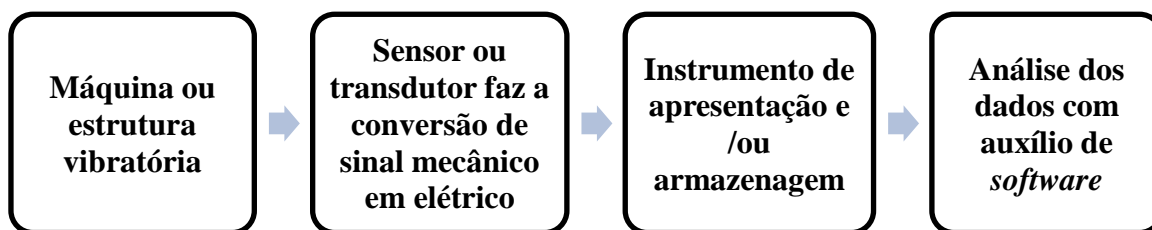
Para determiná-la a correlação de Pico a Pico entre os níveis de pico, para uma onda seno, ela é uma curva matemática que descreve uma oscilação repetitiva suave, sendo esta uma onda contínua. É nomeada após a função seno, apresentada em gráficos.

Ocorre frequentemente em matemática pura e aplicada, bem como física, engenharia, processamento de sinais e em muitos outros campos.

2.2.4 Mensuração e análise de vibração

O fluxograma abaixo demonstra como é feito o processo da análise de vibração em equipamentos industriais.

Figura 5 - Fluxograma para análise de vibração.



Fonte: Próprio autor.

Os sinais mecânicos da vibração são absorvidos pelo transdutor, conhecido também como “sensor de vibração”. Ele é um dispositivo que converte um sinal de entrada de natureza mecânica em sinais de saída de natureza elétrica. Sendo este sinal de saída transmitido através de cabos condutores até o instrumento apropriado que pode ser apenas um coletor e armazenador, como também um analisador (OLIVEIRA, 2015).

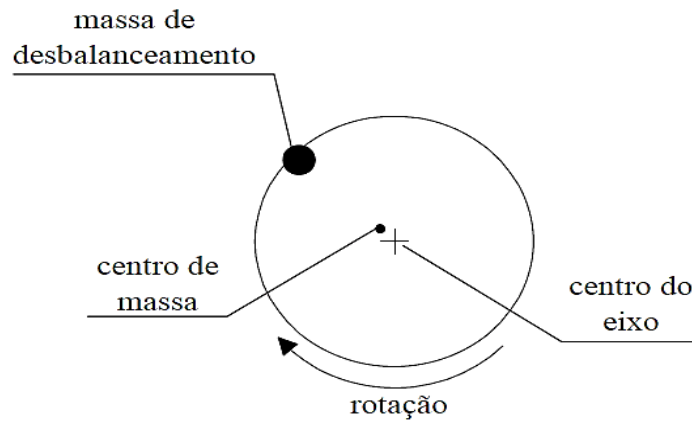
A partir do sinal elétrico emitido, o mesmo é interpretado por um programa computacional que passa a apresentá-lo na forma de sinal no tempo ou espectro de frequência, tornando a análise das condições do equipamento simplificada e prática.

2.3 Principais defeitos de origem mecânica

2.3.1 Desbalanceamento

O desequilíbrio é a maior causa de vibração em máquinas rotativas, fenômeno caracterizado pelo desequilíbrio de massa em relação ao eixo rotativo. Além de defeitos nas matérias-primas e na montagem, as inevitáveis assimetrias, tolerâncias e desvios de forma também podem causar desordem no centro da massa. Quando o sistema está desequilibrado, ele produzirá um mau comportamento, que pode causar diversos tipos de danos a outros dispositivos interconectados (OLIVEIRA, 2015).

Figura 6 - Desbalanceamento de Massa.



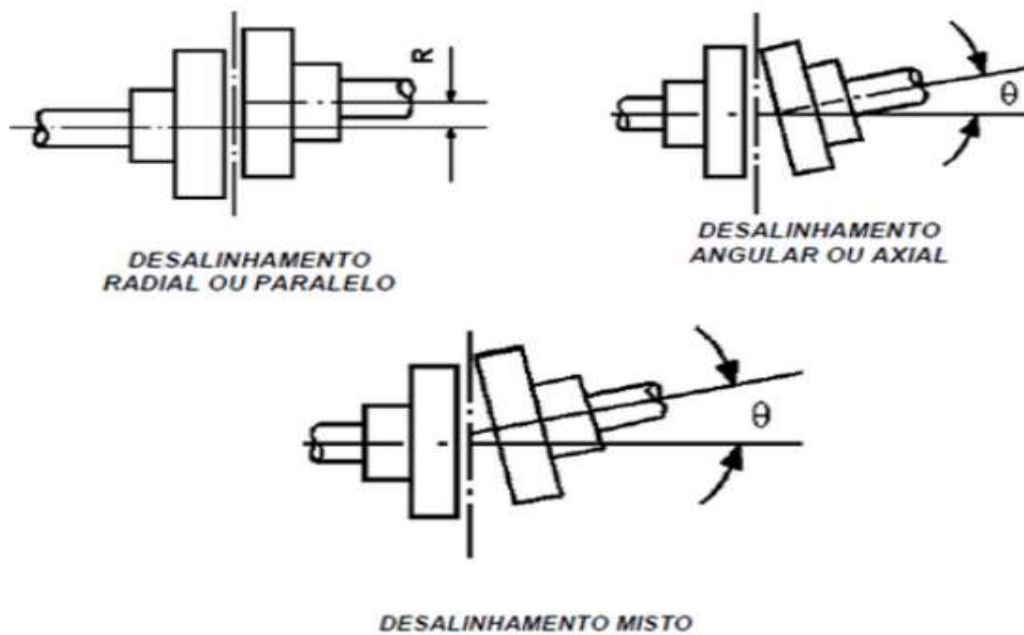
Fonte: SOUZA, 2019.

2.3.2 Desalinhamento

O desalinhamento é definido como a incompatibilidade entre os eixos de simetria de dois eixos colineares. Este tipo de defeito pode ocorrer quando o equipamento giratório entra em operação, devido a falhas de montagem, ou pode ocorrer devido a desequilíbrios de massa no equipamento. A seguir, na figura 7, mostram-se os três tipos de luxações que ocorrem (SOUZA, 2019).

- Desalinhamento paralelo: quando é formado um deslocamento paralelo entre os eixos;
- Desalinhamento angular: quando é formado um ângulo entre os eixos;
- Desalinhamento combinado: quando ocorrem ambos os desalinhamentos comentados acima.

Figura 7 - Desalhiamentos em Eixos.



Fonte: GORDINHO, 2017.

2.3.3 Folgas

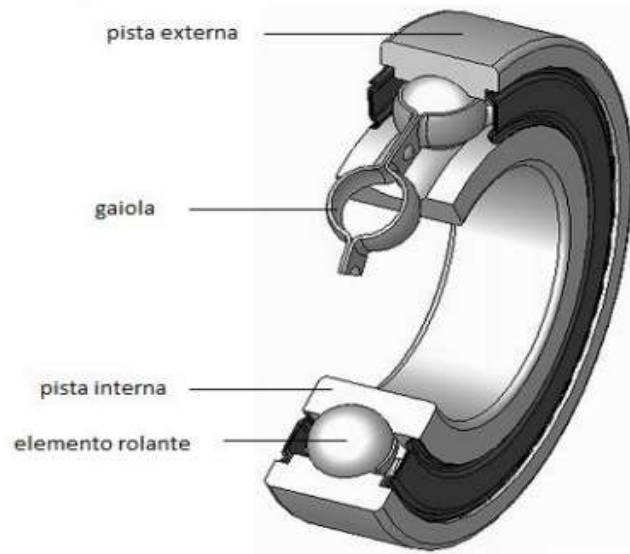
As folgas nas máquinas rotativas podem ocorrer tanto devido a falha na montagem do equipamento como também devido a outros problemas de vibração como um desbalanceamento, por exemplo. Estas folgas geram mais vibrações e podem ser detectadas nos espectros dos sinais onde podem variar na frequência fundamental (1x) em outros casos.

Podem ser múltiplos da rotação do eixo (0,5x, 1,5x, 2,5x, etc.). Desta forma percebe-se que sempre haverá harmônicos múltiplos neste tipo de problema.

As folgas podem ser do tipo vertical e horizontal, também se pode dizer que existem as folgas mecânicas onde está resulta um aumento na amplitude de vibração na sua frequência de rotação fundamental e gera uma ou mais harmônicas. Um dos exemplos mais comuns de folga mecânica são aquelas que ocorrem nos mancais. Isso normalmente ocorre devido a uma falha na montagem do mancal com o rolamento ou até mesmo erros de projeto no dimensionamento do equipamento (OLIVEIRA, 2015).

A figura abaixo mostra alguns componentes de um rolamento, os quais podem sofrer danos ao longo de seu funcionamento.

Figura 8 – Componentes de um Rolamento.



Fonte: BARILLI, 2013.

2.3.4 Defeitos em mancais de rolamentos

No caso dos rolamentos os defeitos podem ser causados durante o processo de fabricação e durante sua utilização. Estas falhas geram um mau funcionamento do equipamento, podendo assim comprometer a todo o sistema. A identificação das falhas somente é visualizada através do espectro, e geralmente ocorrem em frequências acima de 2 kHz (BATISTA, 2019).

De acordo com Holanda (2016), as frequências características de falhas de rolamentos são assíncronas à frequência de rotação, isto é, não é múltiplas inteiras da velocidade de rotação do eixo, uma característica importante a ser considerada durante análise.

Neste caso existem quatro frequências básicas geradas por defeitos em rolamentos definidas abaixo:

- Defeito BPFI - Frequência de passagem de elementos rolantes por um ponto da pista interna tem sua origem do inglês Ball Pass Frequency Inner Race, associada a defeitos na pista interna. (SOUZA, 2019). A figura abaixo demonstra um exemplo de falha por defeito BPFI.

Figura 9 – Amostra de Elemento apresentando marca de erosão.



Fonte: JÚNIOR, 2019.

- Defeito BPFO - Frequência de passagem de elementos rolantes por um ponto da pista externa tem sua origem do inglês Ball Pass Frequency Outer Race, associada a defeitos na pista externa. A figura abaixo demonstra um exemplo de falha por defeito BPFO.

Figura 10 - Defeito na pista externa.



Fonte: JÚNIOR, 2019.

- Defeito BSF - Frequência de giro dos elementos, tem sua origem do inglês Ball Spin Frequency, associada a defeitos nos elementos rolantes (rolos ou esferas). A figura abaixo demonstra um exemplo de falha por defeito BSF.

Figura 11 - Defeito em elementos rolantes.



Fonte: BARILLI, 2013.

- Defeito FTF - Frequência de giro da gaiola ou do conjunto de elementos rolantes tem sua origem do inglês Fundamental Train Frequency, associada a defeitos na gaiola e a defeitos em alguns dos elementos rolantes. A figura abaixo demonstra o que seria um defeito por FTF.

Figura 12 - Defeito no Elemento do Rolamento.



Fonte: PINTO RIBERA; VASCONCELOS, 2017.

Alguns defeitos também podem ser causados pela a “seleção incorreta, sobrecarga, defeitos de fabricação, estocagem inadequada, lubrificação inadequada, montagem incorreta e falha de veddação”. Emerson (2006) ainda destaca os principais sintomas deste tipo de falha:

a) Deve-se examinar cuidadosamente o espectro de frequência das vibrações radiais e axiais, procurando-se identificar picos harmonicamente relacionados, de frequências não síncronas com a de rotação;

b) Quando o defeito progride as amplitudes das harmônicas de menor ordem aumentam. Geralmente, se as frequências fundamentais são predominantes o defeito é severo e a vida remanescente é bastante curta;

c) o espectro de aceleração apresenta predominância de harmônicos de ordem ainda mais elevada e de frequências naturais dos componentes do rolamento, na faixa de 1.000 a 20.000 Hz, que podem ser mais facilmente detectados por filtragem e medição do valor de pico (HFD) ou por demodulação do sinal (envelope). Geralmente, esses métodos fornecem detecção bastante antecipada dos defeitos.

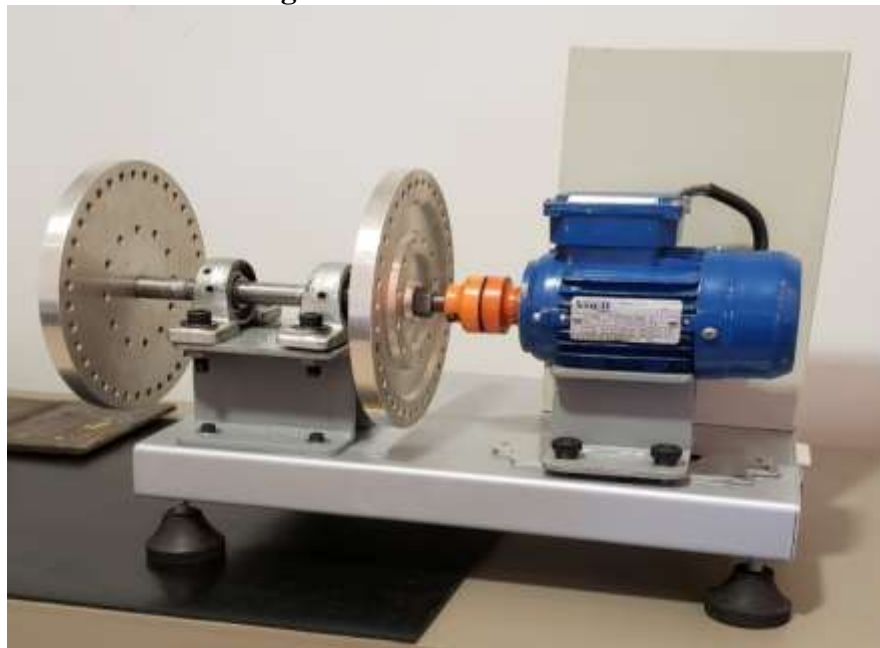
3 METODOLOGIA

Neste capítulo são mostradas as ferramentas utilizadas no trabalho, como a bancada de testes e mancais de rolamento, assim como também as técnicas aplicadas e simulação na bancada.

1.1 Bancada Didática

Neste trabalho foram realizadas análises experimentais em mancais rotativos utilizando uma bancada didática. A bancada mostrada na figura 13 é constituída por um motor elétrico trifásico com rotação de 1750 RPM, com potência de ½ cavalo, e dois mancais rotativos que suportam o eixo principal da bancada.

Figura 13 - Bancada Didática.



Fonte: ALVES, 2021.

Os acelerômetros são usados a fim de ter um padrão de semelhança dos resultados com os sensores piezoelétricos. A bancada de testes assim como as fixações é de aço, já os outros componentes são de alumínio, mais leves e maleáveis.

As análises consistiram em provocar desgaste em rolamentos e captar os sinais de vibrações geradas pela a bancada, com o auxílio do coletor de vibração Microlog GX75, mostrado na figura 14, juntamente com o sensor de vibração, tipo acelerômetro

piezoelétrico fixado na parte externa da estrutura metálica.

Figura 14 - Microlog GX75 da SKF.



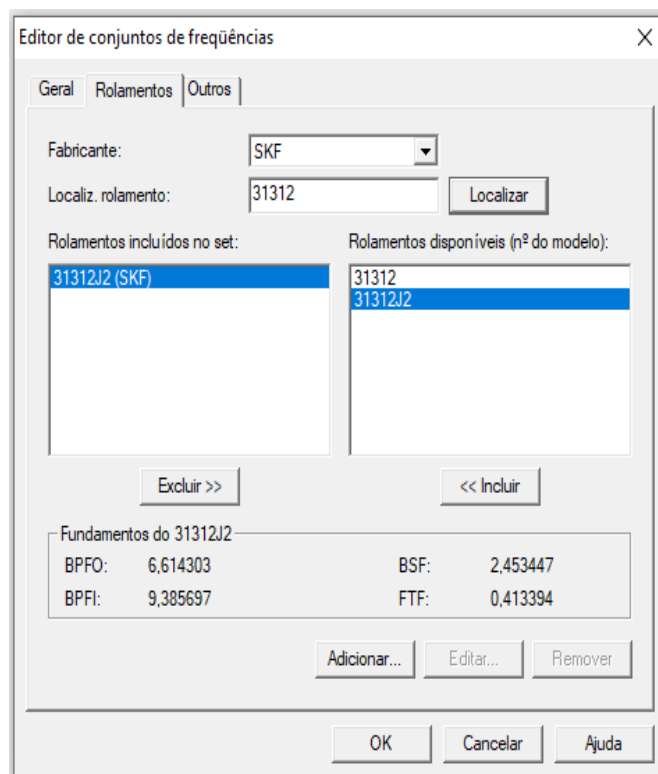
Fonte: ALVES, 2021.

Foi realizada a aquisição dos sinais de vibração por meio de acelerômetros e efetivada a análise através do software @ptitude Analyst, o qual consiste em uma forma base de uma abordagem completamente integrada para acompanhamento de condições, aprovando armazenamento, manipulação e restauração de enormes quantidades de informações sobre equipamentos e fábricas, de maneira eficaz e certa.

O procedimento de medição consiste em coletar a vibração nas direções vertical, horizontal e axial. Para o teste em específico, foram coletados apenas na horizontal, no segundo mancal, denominado 4H.

Conhecido o tipo de rolamento e a rotação de teste, foi cadastrado o rolamento no software @ptitude Analyst, para posteriormente plotar as frequências de defeito nos espectros de vibração.

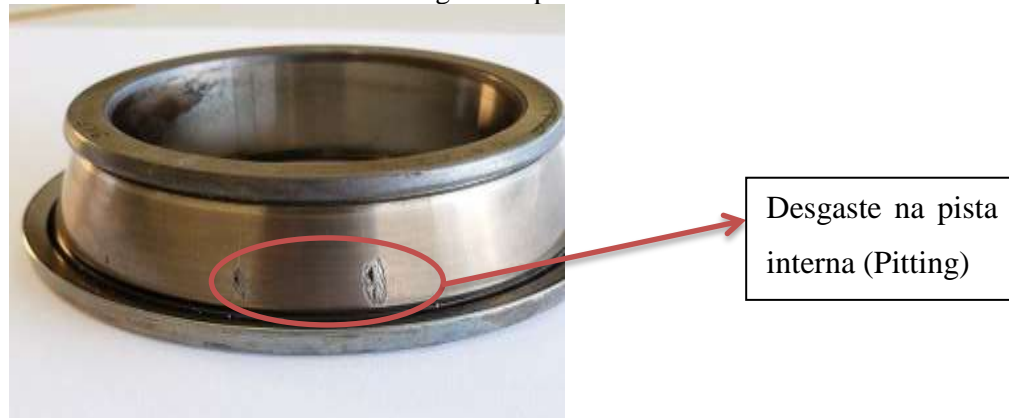
No editor de frequências do software, têm-se todas as frequências de defeito do rolamento, conforme Figura 15.

Figura 15 – Frequência de Defeitos no Rolamento 31312.

Fonte: Próprio autor.

Os defeitos nos elementos rolantes e pistas são responsáveis por pulsos de vibração em alta frequência que podem ser medidos através de um processo de demodulação do sinal, chamado envelope.

Foi selecionado o rolamento 31312 J2, conforme Figura 16, onde foi induzida uma falha na pista interna. A falha foi inserida utilizando um maçarico, logo depois foram feitas as coletas de dados pelo o sensor de sinais, o qual foi descrito neste tópico e então transferidos os sinais para o computador.

Figura 16 - Rolamento 31312 J2 com Desgaste Superficial.

Fonte: Próprio auto.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

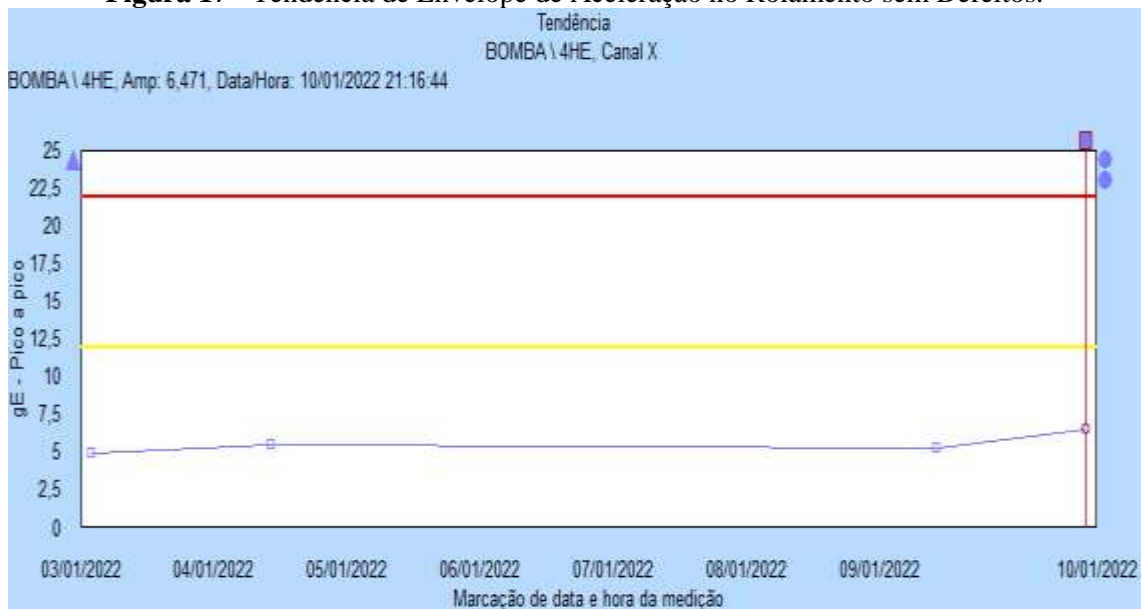
De acordo com que foi abordado na fundamentação teórica deste trabalho, dentre as variáveis que podem ser monitoradas de forma intrusiva nas indústrias, a que compreende o maior volume de informação é a assinatura de vibração.

Através do monitoramento preditivo dessa ferramenta, podem-se identificar possíveis problemas como: empenamentos de eixos, folgas, desbalanceamentos, desalinhamento, defeitos de mancais de rolamentos, entre outros.

Os testes foram realizados em duas etapas, sendo a primeira etapa com rolamento novo, sem defeito, e na segunda etapa foi realizado com o rolamento já com uma falha inserida.

Primeiramente, foi realizada a medição com o rolamento sem defeitos, o qual foi testado durante 6 dias, e manteve-se estável. A linha azul da figura 17 representa a do rolamento em operação, a linha amarela indica a faixa aceitável de vibração, e a vermelha aponta o valor máximo de amplitude. Conforme a Figura 17 nota-se que a aceleração foi de 5 gE no início do teste, e teve um leve aumento para 6,471 gE no último dia do teste, no entanto, de forma geral os valores de aceleração para o rolamento sem defeito mantiveram-se estáveis e dentro dos limites de segurança.

Figura 17 - Tendência de Envelope de Aceleração no Rolamento sem Defeitos.

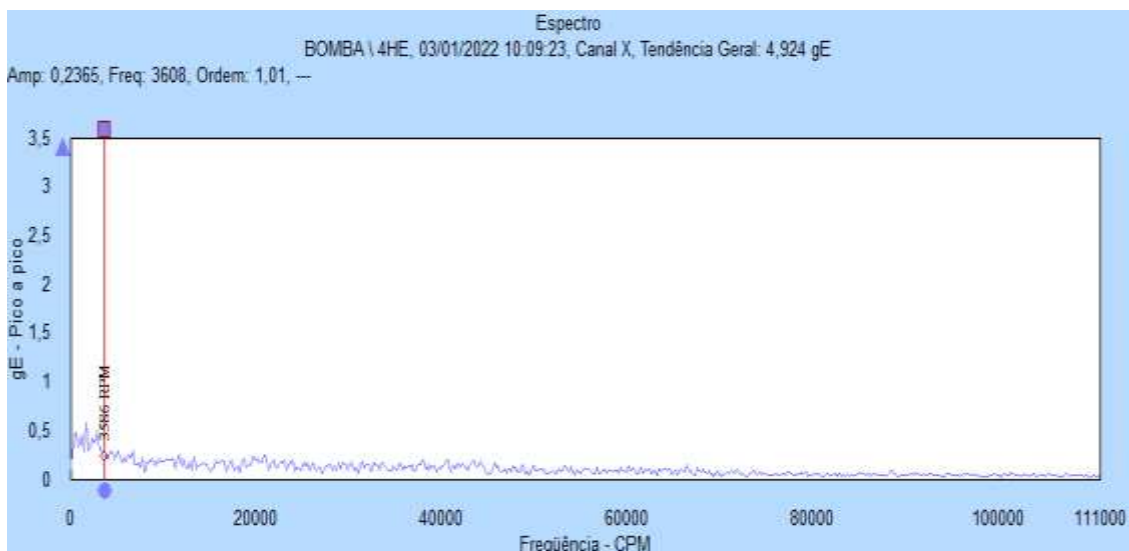


Fonte: Próprio autor.

Analisando o espectro de vibração em aceleração, medido com o rolamento sem defeito, conforme a Figura 18, não há frequências de defeito no rolamento, indicado

pele valor de amplitude próximo a zero. A pequena variação que aparece no início do gráfico é referente à rotação da partida do motor.

Figura 18 - Espectro de Vibração em Aceleração no Rolamento sem Defeitos.



Fonte: Próprio autor.

Na segunda etapa dos testes, o mesmo rolamento foi submetido a um desgaste superficial, propositalmente, a fim de provocar um pitting (erosão) na pista.

Após inserir o defeito no rolamento, iniciou-se a análise, e os resultados são mostrados no gráfico de tendência apresentado na Figura 19. Observando o gráfico, verifica-se que houve um aumento dos níveis no envelope de aceleração do mancal a partir do oitavo dia do teste, evoluindo de um valor de 5 gE para 25 gE, ultrapassando a linha vermelha que representa o limite seguro desse parâmetro.

Figura 19 - Tendência de Envelope de Aceleração no Rolamento com Defeito.

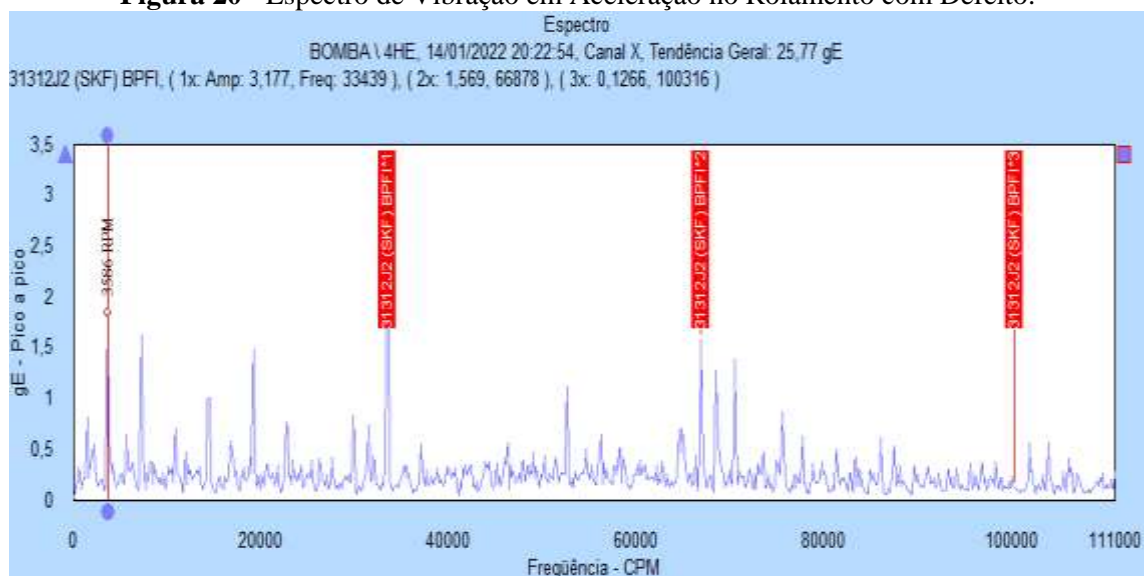


Fonte: Próprio autor.

Como as frequências de falha dos elementos do rolamento são conhecidas e encontradas na literatura, foram cadastradas no software de análise @ptitude Analyst e se sobrepos estes marcadores de frequência sobre o espectro de aceleração do mancal com defeito. Os defeitos cadastrados foram; BPFO, BPFI, BSF, FTF.

No espectro de aceleração do rolamento com defeito, na Figura 20, é possível verificar a existência do desgaste na pista interna do tipo BPFI, o qual foi cadastrado no software @ptitude Analyst. Esse defeito foi encontrado em três picos específicos do gráfico, os quais se encontraram nos seguintes espectros das frequências: 33439, (66878, 100316 Ciclos por Minutos). Devido à alta amplitude, pode-se afirmar que já há desgaste avançado no rolamento (ALVES, 2021).

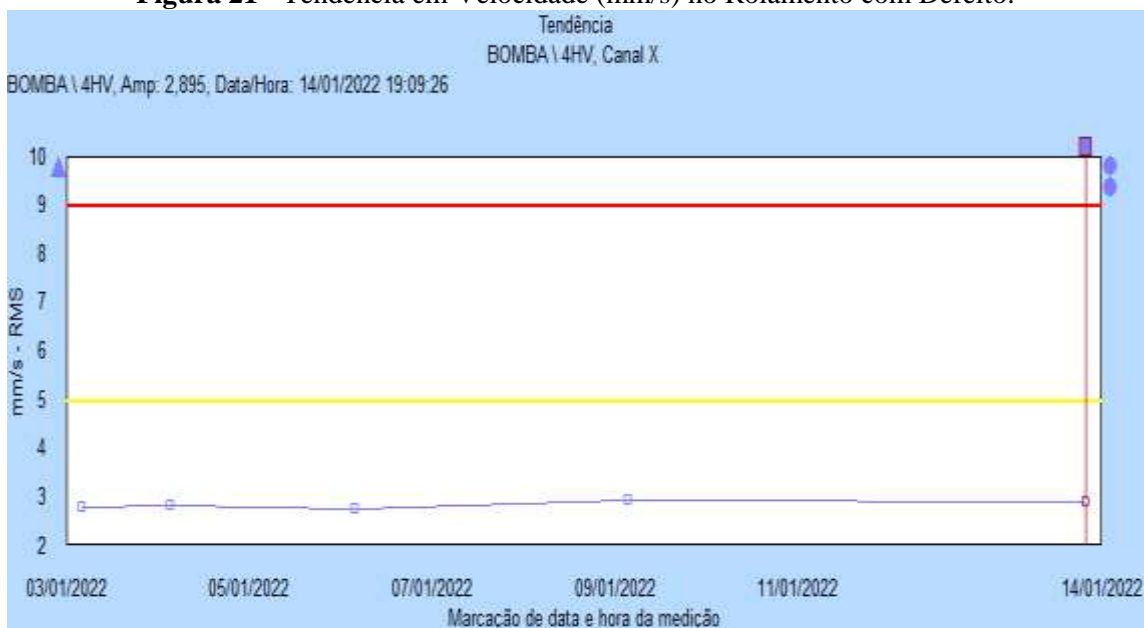
Figura 20 - Espectro de Vibração em Aceleração no Rolamento com Defeito.



Fonte: Próprio autor.

Nos testes no rolamento com defeito na pista, também foram realizadas medições de vibração em velocidade (RMS), sem alterações nos valores. Durante as análises foi possível entender que avaliar rolamentos no parâmetro velocidade (RMS) é pouco eficiente, devido a que rolamentos gerarem altas frequências que não são detectadas, e isto é evidenciado no gráfico da Figura 21.

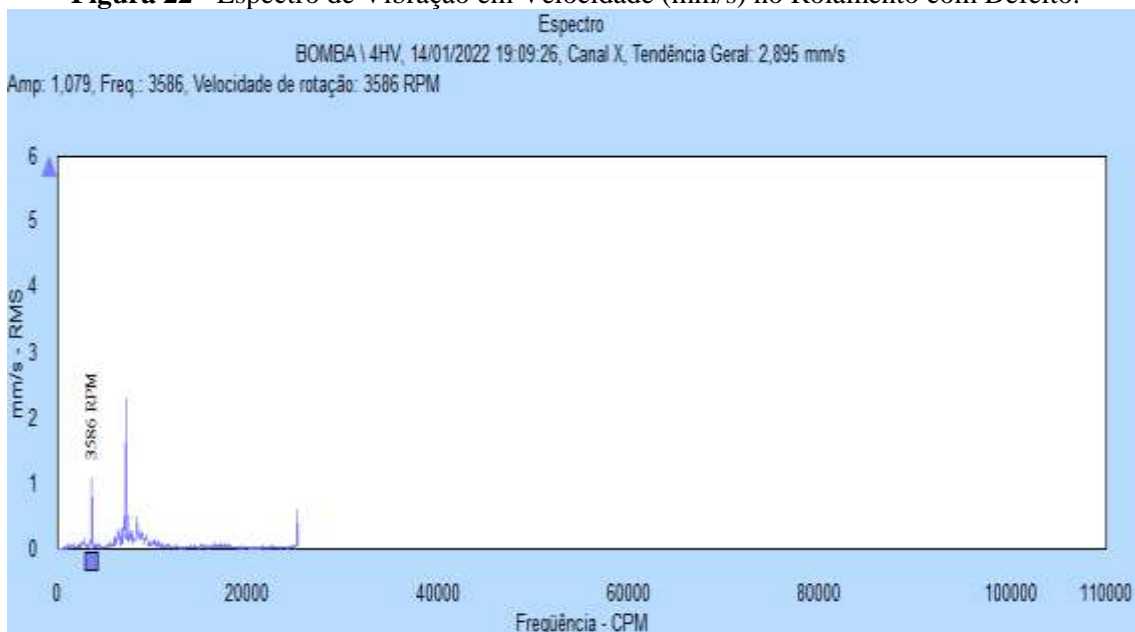
Figura 21 - Tendência em Velocidade (mm/s) no Rolamento com Defeito.



Fonte: Próprio autor.

Na Figura 22, o espectro de vibração em velocidade no rolamento com defeito também não apresenta as frequências de defeito do rolamento, visto que a velocidade é mais indicada para analisar as frequências baixas e médias do espectro, enquanto a aceleração é mais sensível às frequências altas. O pequeno valor mostrado no gráfico representa a velocidade inicial de rotação, no qual não interfere na análise.

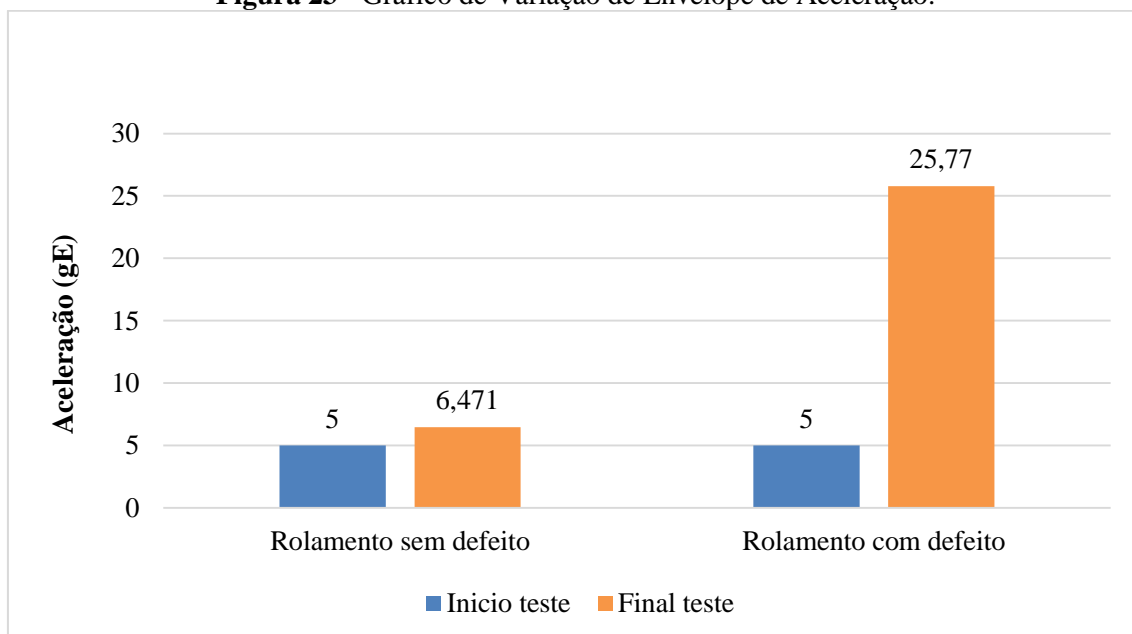
Figura 22 - Espectro de Vibração em Velocidade (mm/s) no Rolamento com Defeito.



Fonte: Autor.

O gráfico da Figura 23 mostra a diferença do envelope de aceleração entre ambos os rolamentos (com e sem defeito). Nota-se que o rolamento sem defeito teve um aumento no envelope de aceleração de apenas 1,471 gE, por outro lado, o rolamento com defeito teve um aumento significativo 20,77 gE.

Figura 23 - Gráfico de Variação de Envelope de Aceleração.



Fonte: Próprio autor.

5 CONCLUSÕES

A realização da presente análise possibilitou, dentre as diferentes abordagens de manutenção industrial, salientar a manutenção preditiva. Os objetivos iniciais deste trabalho foram alcançados, os quais eram baseados em analisar as vibrações por meio de coletor/analizador em mancais de rolamento com e sem desgaste, a fim de avaliar os resultados de ambas as situações.

Com os testes práticos abordados neste trabalho, torna-se visível a grande importância do emprego das técnicas de manutenção preditiva, especialmente a análise de vibração. A aplicação da técnica de análise de vibração em rolamentos identifica defeitos em fase inicial, sendo possível identificar qual elemento está com falha e realizar a intervenção no tempo certo, prolongando a vida útil do rolamento e de outros componentes que funcionam em conjunto com ele.

Os objetivos dessa abordagem consistem no apoio periódico das atividades rotineiras dos mancais de rolamentos em tempo real de operação, trazendo diversos benefícios, como exemplo, evitar a queda de desempenho, as substituições de peças desnecessárias e especialmente eliminar as quebras, além de procurar entender o tempo de vida dos elementos de uma máquina ou sistema.

Os rolamentos estão fortemente dentro dos mais variados segmentos das indústrias, são responsáveis por diminuição da fricção entre as peças móveis do equipamento ou máquina e suportar a carga exercida sobre eles. Devido à sua importância, é necessário utilizar, entre outras, a técnica de análise de vibração, responsável por identificar irregularidades ocultas eventualmente presentes nos rolamentos.

Foi possível notar a diferença entre os rolamentos com e sem defeito, principalmente na variação do envelope de aceleração. O rolamento sem defeito apresentou um aumento do envelope de aceleração de 29% aproximadamente, enquanto o rolamento com defeito mostrou um aumento significativo de 83%.

Entendendo e aplicando a técnica de análise de vibração, consegue-se prever quando será necessária a realização da manutenção no equipamento, o que aumenta a eficiência do processo, reduzindo as quebras inesperadas e prolongando a vida útil dos ativos. Com a diminuição das falhas, diminui-se também o tempo de parada e reposição dos equipamentos e os danos de tempos e recursos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUIAR, E. **Alinhamento em máquinas rotativas com eixo.** Monografia apresentada ao Curso de Aperfeiçoamento para Oficiais de Máquinas do Centro de Instrução Almirante Graça Aranha como parte dos requisitos para obtenção de Certificado de Competência Regra III/2 de acordo com a Convenção STCW 78 Emendada. Orientador: Prof. MSc. Luiz Otavio Ribeiro Carneiro. Rio de Janeiro, 2014.

Alves Reis, I. **Revisão de um plano de manutenção preventiva para minimização de intervenções corretivas emergenciais no setor de utilidades de uma siderúrgica de grande porte.** Trabalho de Conclusão de curso apresentado à Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para obtenção do Título de Engenheiro de Produção pelo Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas da Universidade Federal de Ouro Preto. Orientador: Profa. Dra. Clarissa Barros da Cruz. João monlevade, MG 2021.

ALVES, C. D. S. **Projeto de Bancada Didática para Estudos de Balanceamentos em Laboratório e em Campo.** Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica, da Faculdade Evangélica de Goianésia – FACEG, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Graduação em Engenharia Mecânica. Goianésia-GO, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5462: Informação e Documentação: Referências.** Rio de Janeiro, 1994.

BARILLI, R. J. D. C. **Análise de Falhas em Mancais de Rolamento Utilizando a Técnica do Envelope.** Projeto submetido ao corpo docente do departamento de engenharia naval e oceânica da escola politécnica da universidade federal do rio de janeiro como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de engenharia naval e oceânica. Rio de Janeiro, 2013.

BATISTA, P. **Sistema de análise de dados de vibração com aprendizado de máquina para manutenção preditiva de máquinas elétricas.** Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecatrônica. Orientador: Prof. Dr. Roberto Alexandre Dias. Florianópolis, 2019.

BENEDETTI, J. A. **Manutenção Centrada em Confiabilidade e Análise de Vibração.** Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2002.

CARVALHO, B; MELLO, G. **Estudo teórico do comportamento dinâmico de máquinas rotativas.** Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso, do Curso Superior de Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR. Orientador: Prof. Dr. Adriano Silva Borges. Cornélio Procópio, 2017.

EMERSON, Process Management. **Análise de Vibrações Nível I.** Apostila do Curso de Análise de Vibrações da CSI means Reliability. 2006.

FREITAS, L. **Elaboração de um plano de manutenção em uma pequena empresa do setor metal mecânico de juiz de fora com base nos conceitos da manutenção preventiva e preditiva.** Trabalho de Conclusão de Curso apresentado a Faculdade de Engenharia da Universidade Federal de Juiz de Fora, como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheira Mecânica. Orientador: Prof. Dr. Luiz Henrique Dias Alves. Juiz de fora, 2016.

FRITZEN, P. **Propriedades das Senoides**. Circuitos elétricos a propriedade das senoides universidade tecnológica federal do Paraná - departamento acadêmico de eletrotécnica curso de engenharia industrial elétrica - ênfase em eletrotécnica. Paraná, 2021.

GORDINHO, A. M. **Projeto de uma Bancada Didática com Sistema Motor-eixo-mancal para Integração dos Conteúdos Realizados no Curso de Engenharia Mecânica**. Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Centro Universitário UNIRV – (Universidade de Rio Verde) como parte dos requisitos para a obtenção do título de Engenheiro Mecânico, Rio Verde – GO, 2017.

HOLANDA, S, M, S. **Aplicação da manutenção preditiva por análise de vibrações em equipamentos de trens urbanos com plano de manutenção proposto**. Dissertação submetida ao PPGEM com parte dos requisitos para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica área de Materiais e Fabricação do Departamento de Engenharia Mecânica da UFPE. Recife, 2016.

JÚNIOR, J. A. D. L. **Análise de Falha em Rolamentos de Motores de Indução Irifásico Através do Som utilizando Densidade de Máximos**. Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica do Centro de Tecnologia da Universidade Federal da Paraíba, em cumprimento às exigências para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Mecânica – área de concentração: Dinâmica e Controle de Sistemas Mecânicos. João Pessoa – Paraíba, 2019.

KUHN, L, E. **Estudo Dirigido ao Balanceamento de Sistemas Através da Análise de Sinais Vibratórios: Emprego de um Software e de Uma Bancada Experimental**. Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica do Departamento Acadêmico de Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2019.

OLIVEIRA, E.F.D. **Estudo do Período do Pêndulo Simples Dependente da Amplitude de Oscilação**. Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Pontifícia Universidade Católica de Goiás como pré-requisito necessário para a obtenção da aprovação na disciplina MAF1319, TCC II, bem como para a conclusão do curso de Licenciatura Plena em Física. Monografia realizada sob a orientação do professor Dr. Clóves Gonçalves Rodrigues. GOIÂNIA – GO, 2020.

OLIVERA, I. **Projeto de uma bancada experimental para análise de vibrações veiculares**. Monografia submetida ao curso de graduação em (Engenharia Automotiva) da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em (Engenharia Automotiva), Orientador: Prof. Dr.: Henrique Gomes de Moura, UnB/FGA . Brasília – DF, 2015.

PINTO RIBERA; VASCONCELOS, M; N. **Técnicas de Análise de Defeitos em Rolamentos, Técnica Tradicional, Nova Tecnologia e Pespectivas de Uso na Açominas**. Diagnóstico de falha em rolamentos. 2017.

REIS, F, J. **Proposta de melhoria na eficiência da manutenção em viaturas militares da escola de sargentos das armas**. Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Mecânica do Centro Universitário do Sul de Minas – UNIS/MG como pré-requisito para a obtenção do grau de Engenheiro Mecânico, sob a orientação do Prof. MSc. João Mário Mendes de Freitas. Varginha – MG, 2018.

ROSSDEUTSCHER JUNIOR, J. L. **Análise de vibração em Rolamentos Industriais**. Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Centro Universitário UNIFACVEST como parte dos requisitos para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Mecânica. LAGES, 2018.

SALOMÃO, L. F. **Manutenção por Análise de Vibrações: Uma Valiosa Ferramenta para Gestão de Ativos.** Projeto de Graduação apresentado ao Curso de Engenharia Naval e Oceânica da Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção de título de Engenheiro Naval e Oceânico. Orientador: Severino Fonseca da Silva Neto. Rio de Janeiro, 2013.

SOUSA, R. **Detecção de Falhas em Rolamentos de Máquinas Rotativas Utilizando Técnicas de Processamentos de Sinais.** Orientador: Prof. Dr. Mauro Hugo Mathias: Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica na linha de pesquisa de Gestão e Otimização de Guaratinguetá-SP, 2019.

SOUZA, E, D, R, D. **Desenvolvimento Experimental de uma Bancada para Estudo da Dinâmica de Sistemas Rotativos.** Trabalho de Conclusão do curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal Rural do SemiÁrido – UFERSA, como requisito para obtenção do título de Engenheiro Mecânico Caraúbas/RN 2019.