

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE
MINAS GERAIS - *CAMPUS* BETIM
BACHARELADO EM ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO

GUSTAVO FERREIRA NUNES

**DESENVOLVIMENTO E IMPLEMENTAÇÃO DE UM SISTEMA DE
COLETA E ANÁLISE DE SINAIS DE VIBRAÇÃO**

Betim
2025

GUSTAVO FERREIRA NUNES

**DESENVOLVIMENTO E IMPLEMENTAÇÃO DE UM SISTEMA DE
COLETA E ANÁLISE DE SINAIS DE VIBRAÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à banca examinadora do curso de Engenharia de Controle e Automação do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais *Campus* Betim, como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Controle e Automação.

Orientador: Prof. Dr. Leandro Freitas de Abreu

Betim
2025

FICHA CATALOGRÁFICA

N972d Nunes, Gustavo Ferreira

Desenvolvimento e implementação de um sistema de coleta e Análise de sinais de vibrações / Gustavo Ferreira Nunes. – 2024.

51 f.: il.

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia de Controle e Automação) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais, Campus Betim, 2024.

Orientação: Prof. Dr. Leandro Freitas de Abreu

1. Análise de vibração. 2. Manutenção preditiva. 3. Processamento de sinais. 4. Identificação de falhas. 5. Engenharia de Controle e Automação. I. Nunes, Gustavo Ferreira. II. Título.

CDU: 621.391

GUSTAVO FERREIRA NUNES

**DESENVOLVIMENTO E IMPLEMENTAÇÃO DE UM SISTEMA DE
COLETA E ANÁLISE DE SINAIS DE VIBRAÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à banca examinadora do curso de Engenharia de Controle e Automação do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais *Campus* Betim, como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Controle e Automação.

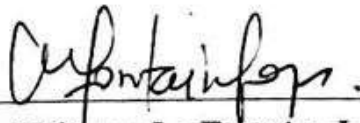
Aprovado em: 19 / 02 / 2025 pela banca examinadora:



Prof. Dr. Leandro Freitas (Orientador) - IFMG



Prof. Ms. Victor Alves Silva e Melo - IFMG



Prof. Ms. Welinton La Fontaine Lopes - IFMG

RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo principal demonstrar a relação entre o comportamento de máquinas rotativas e a análise de vibração, com ênfase na identificação de falhas a partir do espectro de sinal no domínio da frequência. A análise de vibração, uma técnica amplamente utilizada na manutenção preditiva, permite o monitoramento contínuo das condições operacionais dos equipamentos e a detecção precoce de problemas que possam comprometer o desempenho. Os métodos aplicados neste estudo incluem a coleta de dados de vibração em motores elétricos e geradores, seguida do processamento desses dados utilizando técnicas de análise espectral. O desenvolvimento de um código em Python foi essencial para a inserção e tratamento de sinais em tempo real, facilitando a visualização dos resultados e permitindo um diagnóstico mais preciso das condições das máquinas. A norma ISO 2372 foi considerada na determinação das frequências características associadas a diferentes tipos de falhas. As considerações finais destacam a importância da integração de métodos avançados de processamento de sinais com as técnicas tradicionais de análise de vibração. Essa combinação permite um monitoramento mais detalhado e eficaz das condições operacionais das máquinas, contribuindo para a redução de paradas não programadas e para a otimização dos processos de manutenção. O estudo também reforça a relevância da manutenção preditiva no contexto industrial atual, onde a confiabilidade dos equipamentos é crucial para a competitividade e sustentabilidade das operações.

Palavras-chave: Análise de vibração; Manutenção preditiva; Identificação de falhas; Confiabilidade dos equipamentos; Processamento de sinais.

ABSTRACT

The main objective of this study is to demonstrate the relationship between the behavior of rotating machines and vibration analysis, with an emphasis on fault identification based on the signal spectrum in the frequency domain. Vibration analysis, a technique widely used in predictive maintenance, enables continuous monitoring of equipment operating conditions and early detection of issues that may compromise performance. The methods applied in this study include the collection of vibration data from electric motors and generators, followed by processing these data using spectral analysis techniques. The development of a Python code was essential for real-time signal input and processing, facilitating result visualization and enabling a more accurate diagnosis of machine conditions. The ISO 2372 standard was considered in determining characteristic frequencies associated with different types of faults. The final considerations highlight the importance of integrating advanced signal processing methods with traditional vibration analysis techniques. This combination allows for more detailed and effective monitoring of machine operating conditions, contributing to the reduction of unplanned downtime and the optimization of maintenance processes. The study also reinforces the relevance of predictive maintenance in the current industrial context, where equipment reliability is crucial for operational competitiveness and sustainability.

Keywords: Vibration analysis; Predictive maintenance; Fault identification; Equipment reliability; Signal processing.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Componentes presentes em um Motor de Indução Trifásico, destacando partes rotativas, sendo as maiores fontes de vibração.	18
Figura 2 – Diagrama referencial quanto aos tipos de manutenções, evidenciando suas diferenças em relação ao momento e à finalidade das intervenções.	19
Figura 3 – Esquemático ilustrando do processo para medição de vibração de máquinas rotativas.....	20
Figura 4 – Pontos de medição lado do acionamento da máquina (LA) definidos de acordo com o item 4.2 da norma ABNT (NBR10082, 2001).	21
Figura 5 – Acelerômetro do tipo GY-61.....	22
Figura 6 – Ilustração de um sinal coletado no domínio do tempo.	22
Figura 7 – Correlação quanto ao tempo a ser analisado do sinal coletado, necessário realizar FFT.....	23
Figura 8 – Sinal processado para o domínio da frequência com harmônicos e ruídos espalhados no espectro.....	23
Figura 9 – Pontos de medição de vibração nas máquinas elétricas rotativas padronizadas.	25
Figura 10 – Desbalanceamento mecânico associado à frequência de rotação do eixo. (Comportamento espectral do domínio da frequência).....	27
Figura 11 – Desalinhamento que pode gerar componentes harmônicas específicas. (Comportamento espectral do domínio da frequência).....	27
Figura 12 – Problemas no estator ou rotor que aparecem em frequências de deslizamento ou em múltiplos da frequência da rede.....	27
Figura 13 – Esquemático do Circuito eletrônico para coleta de sinais de vibração.....	30
Figura 14 – <i>SoundCard Scope, software</i> para integração ao circuito para coleta de sinais de vibração.	30
Figura 15 – Protótipo construído para coleta de sinais de vibração. - Detalhamento do Circuito eletrônico confeccionado.	31
Figura 16 – Etapas para aquisição de sinais.	31
Figura 17 – Etapa para codificação do sinal.....	32
Figura 18 – Fluxograma aquisição da frequência de amostragem e os dados brutos do sinal coletado.....	33
Figura 19 – Fluxograma para recebimento dos dados brutos e Transformada de Fourier.....	34
Figura 20 – Motor de indução trifásico selecionado para análise, incluindo sua localização na área industrial, os componentes periféricos.	36
Figura 21 – Posição 1, direção radial horizontal para medir vibrações perpendiculares ao eixo do motor.....	36
Figura 22 – Representação do sinal com coletado referencial na posição no <i>software SoundCard Scope</i> - Posição 1, direção radial horizontal.....	37

Figura 23 – Sinal processado para o domínio do tempo. Essencial para futuro cálculo da FFT. (Posição 1, direção radial horizontal.).....	37
Figura 24 – Sinal processado para o domínio da frequência. Posição 1, direção radial horizontal.....	38
Figura 25 – Posicionamento do sensor para a Posição 2 direção radial vertical e Posição 3 Direção Axial.).....	38
Figura 26 – Sinal apresentado pelo <i>software SoundCard Scope</i> . Posição 2 direção radial vertical e Posição 3 Direção Axial.	39
Figura 27 – Sinal processado para o domínio do tempo. Essencial para futuro cálculo da FFT. Posição 2 direção radial vertical e Posição 3 Direção Axial.....	39
Figura 28 – Sinal processado para o domínio da frequência. Posição 2 direção radial vertical e Posição 3 Direção Axial.	39
Figura 29 – Amostragem do Sinal com a frequência correspondente em 1 x RPM. Posição 1 - Direção Radial Horizontal, Posição 2 - Direção Radial Vertical e Posição 3 - Direção Axial.	40
Figura 30 – Amostragem do Sinal com a frequência correspondente em 2 x RPM, 3 x RPM e 4 x RPM. Posição 1 - Direção Radial Horizontal, Posição 2 - Direção Radial Vertical e Posição 3 - Direção Axial.	42
Figura 31 – Posição do sensor lado não acoplado próximo a direção radial horizontal e axial.	43
Figura 32 – Sinal apresentado pelo <i>software SoundCard Scope</i> . Posição do sensor lado não acoplado próximo a direção radial horizontal e axial.	43
Figura 33 – Sinal processado para o domínio do tempo. Essencial para futuro cálculo da FFT. Posição do sensor lado não acoplado próximo à direção radial horizontal e axial.....	44
Figura 34 – Sinal processado para o domínio da frequência. Posição do sensor lado não acoplado próximo à direção radial horizontal e axial.	44
Figura 35 – Instrumento SKF para coleta de vibração.....	45
Figura 36 – Comparação dos sinais do instrumento SKF e coletor projetado (Lado Acoplado)	46
Figura 37 – Comparação dos sinais do instrumento SKF e coletor projetado (Lado Não Acoplado).....	46

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Tabela base para identificar cálculo da frequência fundamental a ser analisada.	26
Tabela 2 – Materiais utilizados para construção do coletor de sinal de vibração.	29
Tabela 3 – Dados de placa Motor WEG Modelo WMining, FAB: 29/04/2019.....	35

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Objetivos.....	14
1.2	Justificativa.....	15
1.3	Organização do Texto.....	15
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1	Aspecto Construtivo - Motor de Indução Trifásico	17
2.1.1	<i>Manutenção</i>	18
2.2	Técnica de Análise Preditiva - Análise de Vibração.....	19
2.2.1	<i>Coleta de Dados</i>	20
2.2.2	<i>Sensor de Vibração</i>	21
2.2.3	<i>Sinais do Domínio do Tempo para o Domínio da Frequência</i>	22
2.2.4	<i>Critério de Avaliação de Vibrações</i>	24
2.2.5	<i>Análise Espectral</i>	25
3	METODOLOGIA	28
3.1	<i>Materiais</i>	28
3.1.1	<i>Desenvolvimento do Sistema de aquisição de Sinais de Vibração e Monitoramento</i>	29
3.1.2	<i>Aquisição de Sinais</i>	31
3.1.3	<i>Codificação em Python para Processamento e Análise de Sinais</i>	32
4	RESULTADOS	35
4.1	<i>Coleta e Aquisição de Sinais</i>	35
4.2	<i>Análise - Espectro da Frequência</i>	40
4.2.1	<i>Validação de resultados - Coletas e dados obtidos com o Sensor SKF</i>	45
5	CONCLUSÃO	48
	REFERÊNCIAS	50
	APÊNDICE A – CÓDIGO PARA AQUISIÇÃO DA TAXA DE AMOSTRAGEM .	52
	APÊNDICE B – TRANSFORMADA DE FOURIER	53
	APÊNDICE C – CALCULANDO A FFT - TRANSFORMAÇÃO DO SINAL DO DOMÍNIO DO TEMPO PARA O DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA	54

1 INTRODUÇÃO

A manutenção eficiente e preditiva de máquinas rotativas, como motores elétricos e geradores, é fundamental para garantir a continuidade e a confiabilidade dos processos industriais. Falhas inesperadas nesses equipamentos podem resultar em paradas não planejadas, comprometendo a produção e gerando altos custos de reparo e substituição. De acordo com o (InfoQ, 2024), o Departamento de Energia dos EUA relata que a implementação de um programa de manutenção preditiva funcional pode resultar em um aumento de dez vezes no retorno sobre o investimento (ROI), redução de 25% a 30% nos custos de manutenção, diminuição de 70% a 75% nas paradas e redução de 35% a 45% no tempo de inatividade.

A análise de vibração é uma ferramenta consagrada na manutenção preditiva, permitindo a identificação precoce de falhas em componentes internos, como rolamentos, acoplamentos e eixos, por meio do monitoramento das características vibracionais das máquinas. No entanto, a interpretação dos dados de vibração, especialmente quando analisados no domínio da frequência, requer um entendimento profundo das dinâmicas envolvidas e das particularidades de cada tipo de máquina.

O objetivo é explorar a aplicação da análise de dados de vibração na manutenção de máquinas elétricas, destacando as principais metodologias e tecnologias disponíveis para a coleta, o processamento e a interpretação desses dados. Será abordados os princípios fundamentais da dinâmica de vibrações, as técnicas de monitoramento e diagnóstico amplamente utilizadas na indústria, além das ferramentas analíticas que suportam a tomada de decisões em programas de manutenção preditiva.

1.1 Objetivos

Projetar e construir um coletor de vibração para Motores de Indução Trifásico, que permite a realização de análise e identificação de anomalias e possíveis danos nessas máquinas rotativas.

Dentro dos objetivos específicos do trabalho destacam-se:

- Projetar e construir um coletor de sinal de vibração, através do sensor Acelerômetro.
- Projetar um *software* para processamento de dados coletados, no domínio do tempo e domínio da frequência.
- Validar protótipo antes de sua aplicação em tempo real.
- Coletar dados de um motor em operação e realizar as devidas comparações com o instrumento Sensor de Vibração SKF CMDT 391 K SL QuickCollect com análises e diagnósticos seguindo a norma NBR 10082 e ISO 10816-3.

1.2 Justificativa

A evolução tecnológica na indústria tem provocado mudanças significativas nos processos de manufatura e na automação das máquinas, que agora contam com painéis de controle sofisticados, similares a computadores. Como resultado a manutenção precisou se adaptar e atualizar suas práticas para acompanhar o funcionamento avançado desses equipamentos.

A principal função do motor elétrico é converter energia elétrica em energia mecânica. Para assegurar o funcionamento ideal é essencial uma manutenção eficiente, visto que a maioria dos processos produtivos depende do seu bom desempenho. Falhas podem ter um impacto direto nos custos do produto final. De acordo com (GONGORA, 2013), a maioria das falhas em motores elétricos, cerca de 69%, está relacionada ao desgaste dos rolamentos, enquanto 21% ocorrem no enrolamento do estator e apenas 7% no rotor. Diante da variedade de falhas potenciais, é fundamental a aplicação de técnicas eficazes para a detecção precoce dessas falhas, visando prolongar a vida útil dos motores, melhorar a produtividade e garantir a qualidade dos produtos.

A análise de vibração é uma técnica amplamente utilizada na manutenção preditiva para identificar falhas em motores de indução trifásicos, permitindo aumentar a confiabilidade e reduzir custos operacionais. No entanto, muitas das soluções disponíveis no mercado apresentam alto custo de implementação. Diante disso, este trabalho busca demonstrar a importância do monitoramento de vibração e evidenciar que é possível desenvolver alternativas viáveis e acessíveis para a coleta e análise de dados, utilizando metodologias eficientes e de menor custo. Dessa forma, pretende-se contribuir para a disseminação da manutenção preditiva em um cenário mais amplo, possibilitando a antecipação de falhas e a otimização dos processos industriais.

Além do custo elevado dos sistemas convencionais, a eficácia da análise de vibração pode ser potencializada por meio do processamento de sinais, que permite extrair informações relevantes a partir dos dados coletados. Neste contexto, este trabalho visa demonstrar que a união entre análise de vibração e processamento de sinais pode oferecer soluções acessíveis e eficazes para a manutenção preditiva, sem a necessidade de investimentos elevados. Assim, busca-se tornar mais viável para diferentes setores industriais, promovendo a redução de paradas não planejadas e aumentando a eficiência operacional das máquinas elétricas.

1.3 Organização do Texto

Este estudo está dividido em cinco capítulos, organizados de forma a garantir uma compreensão clara, gradual e aprofundada do tema abordado. No Capítulo 2, desenvolve-se a fundamentação teórica, abordando métodos de manutenção e os fundamentos da análise de vibração, destacando sua relevância para a detecção precoce de falhas. O Capítulo 3 explora os conceitos fundamentais relacionados ao método de análise de vibração, com ênfase na análise espectral, detalhando de como será o processo de coleta de dados, tratamento desses sinais. No Capítulo 4, são apresentados e discutidos os resultados obtidos, relacionando-os à metodologia

aplicada, com uma análise das implicações dos dados e devidas comparações para validação do projeto. Por fim, o Capítulo 5 conclui o estudo, sintetizando os principais achados, apontando as limitações e sugerindo direções para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A evolução dos métodos de manutenção industrial reflete a busca contínua por maior eficiência e confiabilidade nos processos produtivos. Entre as diversas abordagens, a manutenção preditiva destaca-se por sua capacidade de prever falhas antes que se tornem críticas, assegurando o funcionamento contínuo e seguro de máquinas rotativas, como os motores de indução trifásicos.

Neste contexto, a análise de vibração desempenha um papel fundamental como técnica preditiva, permitindo identificar anomalias como desalinhamento, desbalanceamento e desgastes nos rolamentos. Através do monitoramento do espectro de sinais no domínio da frequência, torna-se possível detectar problemas em estágio inicial, viabilizando intervenções mais precisas e eficientes.

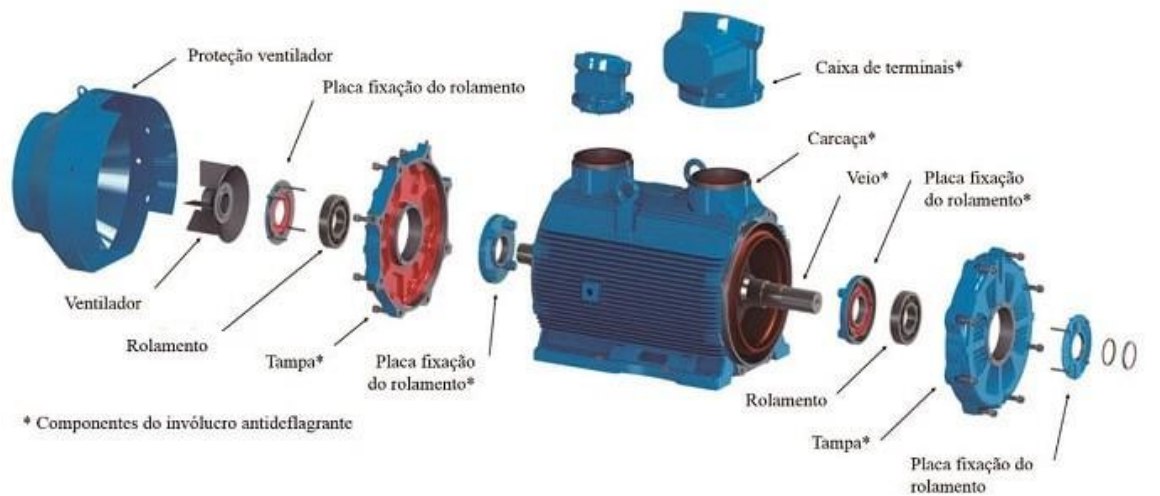
Este estudo propõe o desenvolvimento de um sistema dedicado para análise de vibração em motores de indução trifásicos, abrangendo a coleta, processamento e interpretação de dados de vibração. Essa abordagem busca não apenas reduzir custos operacionais e minimizar paradas inesperadas, mas também aprimorar a confiabilidade e a segurança dos processos industriais.

2.1 Aspecto Construtivo - Motor de Indução Trifásico

O motor de indução trifásico é composto por duas partes principais: o estator e o rotor. O estator é a parte fixa que contém enrolamentos trifásicos distribuídos em slots ao redor da circunferência interna. Esses enrolamentos, quando alimentados por uma corrente alternada trifásica, geram um campo magnético rotativo. O rotor, localizado dentro do estator, é geralmente do tipo gaiola de esquilo, composto por barras condutoras curtas conectadas nas extremidades por anéis. Quando o campo magnético rotativo do estator interage com o rotor, induz uma corrente elétrica nas barras do rotor, gerando um segundo campo magnético que, por sua vez, faz o rotor girar. Essa interação é responsável pela conversão da energia elétrica em energia mecânica, característica fundamental do motor de indução trifásico.

A Figura 2 apresenta uma visão detalhada das partes internas que compõem um motor de indução trifásico. Essa ilustração destaca os principais componentes, como o estator, rotor, núcleo de ferro, enrolamentos e mancais, fundamentais para o funcionamento eficiente do motor. O entendimento dessas estruturas é essencial para a análise de vibração, pois permite correlacionar possíveis falhas mecânicas ou elétricas com as características específicas de cada elemento interno.

Figura 1 – Componentes presentes em um Motor de Indução Trifásico, destacando partes rotativas, sendo as maiores fontes de vibração.



Fonte: WEG. 2021.

2.1.1 Manutenção

A manutenção consiste em um conjunto de ações técnicas e administrativas, incluindo supervisão, com o propósito de preservar ou restaurar um item às condições necessárias para o desempenho de sua função. Segundo a (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1994) a manutenção industrial pode ser classificada em três tipos principais: preventiva, corretiva e preditiva, cada uma desempenhando um papel fundamental na confiabilidade e disponibilidade dos equipamentos.

A **manutenção preventiva** consiste em intervenções programadas com base em análises estatísticas ou nas recomendações do fabricante. Seu principal objetivo é reduzir a probabilidade de falhas e evitar paradas inesperadas dos equipamentos, garantindo a continuidade operacional e aumentando a vida útil dos ativos. No entanto, apesar de minimizar falhas, esse tipo de manutenção pode resultar em substituições desnecessárias de componentes que ainda possuem vida útil remanescente.

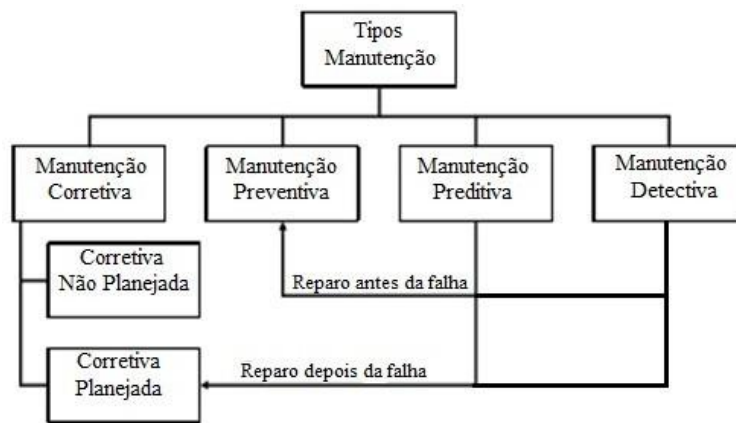
Quando a manutenção preventiva não é suficiente para evitar falhas ou quando não é economicamente viável aplicá-la, a **manutenção corretiva** se torna necessária. Esse tipo de intervenção é realizado após a ocorrência de uma avaria, com o propósito de restaurar o funcionamento do equipamento danificado. Embora seja essencial para restabelecer a operação, a manutenção corretiva pode gerar custos elevados e períodos de inatividade não planejados, impactando a produtividade e a segurança do sistema.

Para otimizar os processos de manutenção e reduzir a frequência de manutenções corretivas e preventivas desnecessárias, aplica-se a **manutenção preditiva**. Esse método baseia-se no monitoramento contínuo das condições operacionais dos equipamentos por meio de técnicas

analíticas, como a análise de vibração. Dessa forma, permite a identificação precoce de falhas potenciais, possibilitando intervenções mais precisas e eficientes.

A Figura 1 apresenta um esquema ilustrativo dos principais tipos de manutenção utilizados na indústria, destacando as abordagens corretiva, preventiva e preditiva. O diagrama evidencia as diferenças entre essas estratégias em relação ao momento e à finalidade das intervenções.

Figura 2 – Diagrama referencial quanto aos tipos de manutenções, evidenciando suas diferenças em relação ao momento e à finalidade das intervenções.



Fonte: SANTOS *et al.*, 2019.

2.2 Técnica de Análise Preditiva - Análise de Vibração

Através do conhecimento e da análise de dados adquiridos por equipamentos específicos que detectam variações excessivas de vibração, é possível indicar previamente qualquer defeito. Assim, diagnosticar e analisar as tendências como empeno e desalinhamento de eixos, massa desbalanceada, rolamentos desgastados, engrenagens danificadas, problemas em estruturas, falhas elétricas em motores, deficiência na lubrificação e folgas.

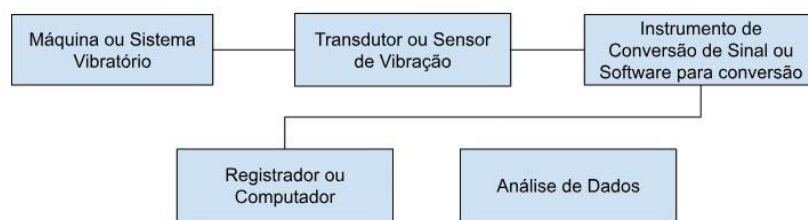
Os parâmetros de vibração, como deslocamento, velocidade e aceleração, são amplamente utilizados na análise de falhas em sistemas mecânicos. O deslocamento mede a magnitude do movimento de uma superfície, a velocidade relaciona-se à taxa de variação do deslocamento, e a aceleração indica a taxa de variação da velocidade. Esses parâmetros fornecem informações cruciais sobre o comportamento dinâmico de um sistema. Além disso, a frequência da vibração desempenha um papel fundamental na identificação da origem do defeito, uma vez que cada tipo de falha (como desalinhamento, desbalanceamento ou desgaste de rolamentos) gera um padrão de vibração característico, que pode ser correlacionado a frequências específicas. Conforme afirmado por (RANDALL, 2011) e (DINIZ *et al.*, 2016), a análise espectral, associada à identificação das frequências dominantes, permite localizar com precisão a origem da falha, facilitando a implementação de estratégias de manutenção preditiva.

Para o monitoramento de vibração são utilizados alguns tipos de sensores, sendo: eletromagnéticos e capacitivos, eletrodinâmicos de velocidades e acelerômetros. Sensores eletromagnéticos e capacitivos são sensores de proximidade instalados diretamente nas máquinas para detectar os movimentos. O primeiro sensor utilizado foi aqueles denominados eletrodinâmicos de velocidade para as medições de vibrações em alta frequência. Entretanto, os acelerômetros são mais utilizados devido sua precisão, fornecendo dados sobre a amplitude e a frequência. Além disso, responde rapidamente a variações, é fácil de instalar e pode ser usado em uma ampla gama de equipamentos.

2.2.1 Coleta de Dados

Para a aplicação da técnica de análise de vibração, é essencial reunir dados que permitam obter os sinais necessários para o diagnóstico de falhas. A Figura 3 apresenta um esquema básico que ilustra os passos a serem seguidos para a coleta de dados e posterior análise.

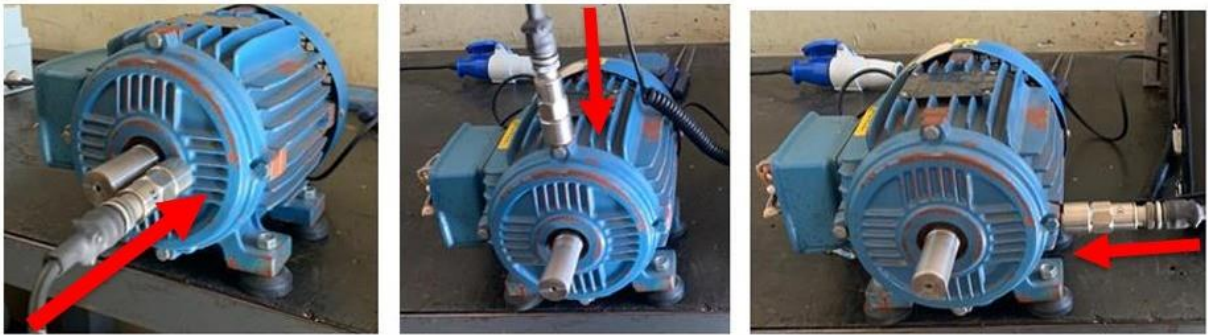
Figura 3 – Esquemático ilustrando do processo para medição de vibração de máquinas rotativas



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

A (NBR10082, 2001), estabelecida pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), desempenha um papel crucial na avaliação de vibrações em máquinas, fornecendo orientações detalhadas sobre os métodos de medição e os critérios de análise necessários para garantir o bom funcionamento e a durabilidade dos equipamentos. Além disso, a norma (ISO10816, 2009) trata da posição e instalação dos transdutores para medição de vibrações em máquinas com orientações sobre a localização adequada dos transdutores em relação aos pontos de medição, com o objetivo de garantir que as medições de vibração sejam precisas e representativas das condições operacionais reais da máquina, sendo que, uma vez que medições incorretas podem comprometer a precisão do diagnóstico.

Figura 4 – Pontos de medição lado do acionamento da máquina (LA) definidos de acordo com o item 4.2 da norma ABNT (NBR10082, 2001).



Fonte: FONTOURA, 2018.

A Figura 4 demonstra alguns pontos obrigatórios de medição, como o transdutor posicionado no lado de acionamento do motor (LA) nos sentidos axial, vertical e horizontal.

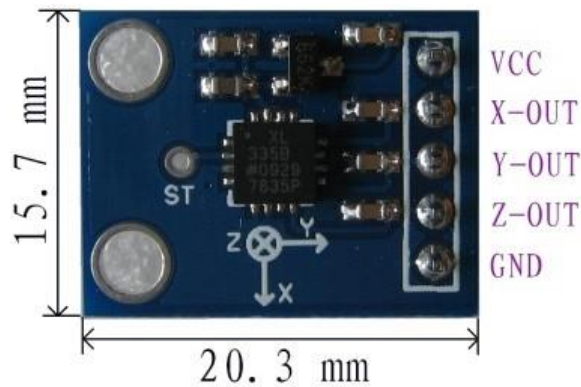
2.2.2 Sensor de Vibração

Na coleta de sinais, são utilizados diversos tipos de sensores de vibração, cada um com características específicas para diferentes aplicações. Entre os diversos tipos de sensores, o acelerômetro se destaca devido às suas características técnicas que atendem a uma variedade de requisitos industriais. Funcionam com base no princípio piezoelétrico, convertendo a aceleração de vibração em um sinal elétrico sendo altamente sensíveis e ideais para ampla faixa de frequências.

Em comparação com outros sensores, o acelerômetro GY-61, demonstrado na figura 5, é uma excelente escolha para a coleta de sinais de vibração devido à sua combinação de desempenho técnico pela facilidade de integração e baixo custo. Utiliza-se o sensor ADXL335, que é um dispositivo de 3 eixos capaz de medir a aceleração nas direções X, Y e Z, com um intervalo de medição que vai de $\pm 3g$ (aceleração de 3 vezes a gravidade) em uma direção positiva e negativa. Possuem uma precisão da ordem de 0,1% da leitura total adequado para medir pequenas variações em frequências de 0 a 10 kHz e uma sensibilidade que pode variar entre 10mV/g e 1000 mV/g, o sensor é capaz de detectar pequenas variações na aceleração

Sua resposta dinâmica é uma característica essencial para detectar variações rápidas nas vibrações, o que permite identificar falhas repentinas, como quebras ou impactos, de forma eficiente. Além disso, possuem dimensões reduzidas e pesam apenas alguns gramas, facilitando a instalação em locais de difícil acesso e em equipamentos de diferentes tamanhos sem interferir no funcionamento dos sistemas. Essa leveza e tamanho compacto tornam o sensor uma opção atraente para a coleta de dados em tempo real em ambientes industriais. A facilidade de integração do acelerômetro é garantida pelas interfaces padrão como sinais analógicos, permitindo uma conexão simples com sistemas de monitoramento e aquisição de dados.

Figura 5 – Acelerômetro do tipo GY-61.

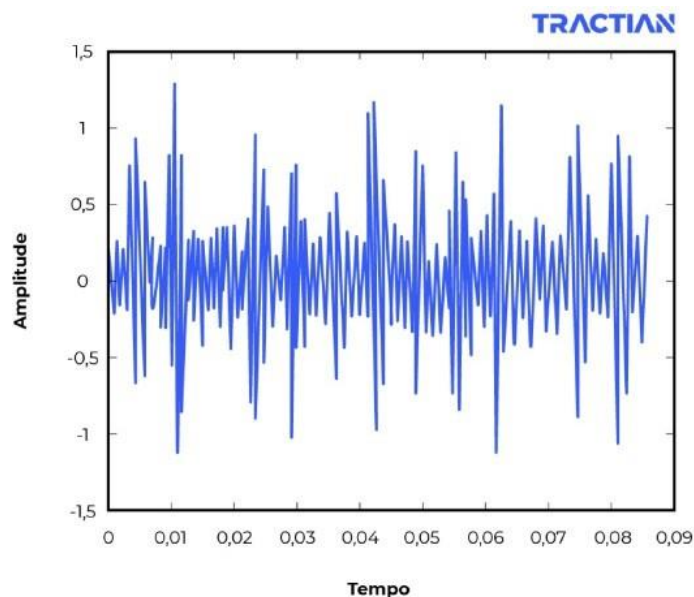


Fonte: WINGS, 2024

2.2.3 Sinais do Domínio do Tempo para o Domínio da Frequência

A análise no domínio do tempo é crucial na avaliação de sinais de vibração, pois fornece informações iniciais sobre a magnitude e a variação temporal das oscilações mecânicas, permitindo detectar padrões anômalos antes da conversão para o domínio da frequência (INMAN, 2014). Para uma análise mais detalhada e eficiente, é necessário converter o sinal do domínio do tempo para o domínio da frequência. Essa conversão é realizada por meio da Transformada Rápida de Fourier (FFT, do inglês *Fast Fourier Transform*). Se trata de um algoritmo que decompõe o sinal em suas componentes de espectrais, permitindo identificar quais frequências estão presentes e com qual intensidade (amplitude).

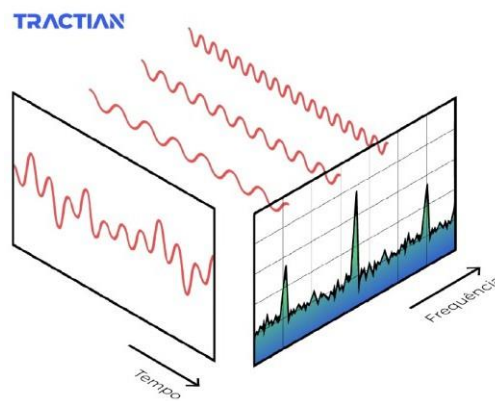
Figura 6 – Ilustração de um sinal coletado no domínio do tempo.



Fonte: PIOVESAN, 2022.

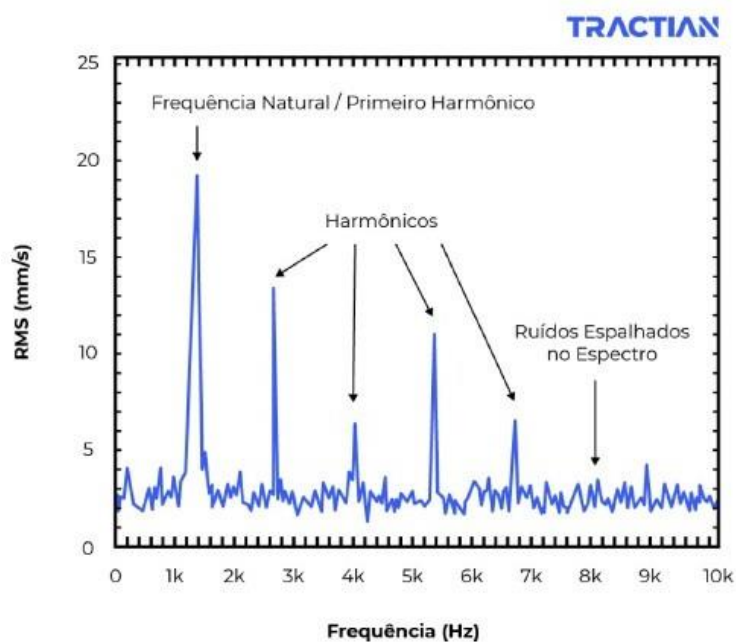
Muitos fenômenos dinâmicos não são facilmente interpretáveis apenas nesse domínio como mencionado na figura 6. Para uma identificação mais precisa, a transformação para o domínio da frequência permite decompor o sinal em seus componentes espectrais e associá-los a falhas específicas, como desalinhamento, desbalanceamento e defeitos em rolamentos. Estudos indicam que, enquanto oscilações no tempo podem sugerir um comportamento anômalo, apenas a análise espectral pode determinar com precisão a causa subjacente, uma vez que cada tipo de falha possui uma assinatura em frequências características (GÓNGORA, 2016).

Figura 7 – Correlação quanto ao tempo a ser analisado do sinal coletado, necessário realizar FFT.



Fonte: PIOVESAN, 2022.

Figura 8 – Sinal processado para o domínio da frequência com harmônicos e ruídos espalhados no espectro.



Fonte: PIOVESAN, 2022.

Depois de aplicar a FFT, é possível fazer análise espectral, como demonstrado na Figura 08. Contudo, cada tipo de máquina possui uma assinatura original, e é a partir dela que se identifica as características de vibração de cada componente individual. Assim, consegue monitorar sua condição e diagnosticar fatores mencionados anteriormente como desbalanceamento e desalinhamento.

2.2.4 Critério de Avaliação de Vibrações

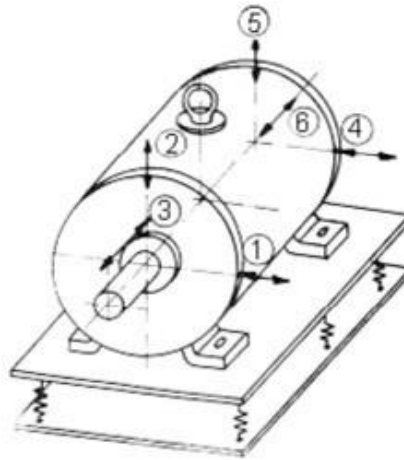
A (NBR10273, 2013) especifica os requisitos para instrumentos de medição da severidade de vibração de máquinas, incluindo aspectos como a faixa de frequência de operação, limites de erro admissíveis, características dos captadores de vibração (sensores) e requisitos para os indicadores que exibem os resultados das medições. É importante para profissionais que realizam análises de vibração, pois assegura a integridade dos dados coletados e contribui para a manutenção preditiva eficaz, prevenindo falhas e otimizando o desempenho dos equipamentos industriais.

Para compreender o espectro de frequências e identificar as causas de falhas por meio das vibrações, é essencial possuir um conhecimento prévio das especificações de cada máquina. Isso inclui considerar aspectos como as características geométricas e o comportamento operacional do equipamento, tais como o número de polos do motor, a velocidade de rotação, a quantidade de dentes nas engrenagens, entre outros fatores.

Como mencionado brevemente no seção 2.2.1 a localização das medições de vibração em motores elétricos é um aspecto que afeta diretamente a precisão e confiabilidade da análise, sendo orientada por normas e padrões técnicos reconhecidos internacionalmente. A norma (ISO10816, 2009), mais especificamente, a **ISO 10816-3** detalha sobre a instalação de sensores para diferentes tipos de máquinas e condições de operação, além disso, é amplamente utilizada para avaliação da condição das máquinas, considerando as vibrações como um indicador crítico de sua integridade.

Na carcaça do motor, conforme indicado na norma, as medições são fundamentais para avaliar o nível global de vibração e garantir que os valores registrados estejam dentro dos limites aceitáveis para operação segura. Nos mancais, que são pontos críticos para a análise de vibração, a ISO 10816-3 enfatiza a importância de monitorar esses locais, pois falhas como desalinhamento, desequilíbrio e problemas em rolamentos costumam se manifestar diretamente nessas regiões. A base ou fundação também é considerada na norma, pois vibrações excessivas nesses componentes podem indicar problemas estruturais, como ressonância ou folgas mecânicas, que podem amplificar as vibrações e comprometer a estabilidade do motor.

Figura 9 – Pontos de medição de vibração nas máquinas elétricas rotativas padronizadas.



Fonte: ISO10816, 2009.

Observa-se na Figura 09 uma orientação para o posicionamento do transdutor de vibração conforme as diretrizes da (ISO10816, 2009). Os pontos de medição 1, 2 e 3 devem ser posicionados o mais próximo possível do suporte frontal, sendo o ponto 1 na direção radial horizontal, o ponto 2 na direção radial vertical e o ponto 3 na direção axial. Já os pontos 4, 5 e 6 devem ser localizados o mais próximo possível do suporte traseiro, com o ponto 4 na direção radial horizontal, o ponto 5 na direção radial vertical e o ponto 6 na direção axial. *Se não for possível a fixação do sensor de vibração diretamente sobre o apoio, o ponto de medição deverá ser o mais próximo deste.*

2.2.5 Análise Espectral

A análise espectral é uma ferramenta interessante para identificação de falhas mecânicas e elétricas em máquinas rotativas, sua aplicação requer conhecimento técnico, ferramentas adequadas e a interpretação cuidadosa. Para identificar essas falhas deve-se correlacionar os picos no espectro de frequência com as frequências características do sistema, que podem ser calculadas com base nos parâmetros da máquina, como velocidade de rotação (RPM), número de polos do motor, frequência da rede elétrica e geometria de rolamentos (diâmetros, número de esferas, ângulo de contato).

Cada tipo de falha mecânica ou elétrica gera vibrações em frequências específicas, que podem ser detectadas e analisadas. A (NBR10082, 2001) estabelece critérios para a avaliação da vibração mecânica de máquinas operando entre 600 e 12.000 rpm. Ela define zonas de avaliação para classificar a severidade e orienta sobre os parâmetros de medição e faixas de frequência a serem analisadas. Essas faixas são calculadas através da **frequência fundamental** de rotação de um eixo ou motor. Essa frequência é expressa em hertz (Hz) e pode ser obtida pela seguinte fórmula:

$$f = \frac{RPM}{60} \quad (2.1)$$

Em que:

f = frequência em hertz (Hz).

RPM = rotações por minuto.

60 = fator de conversão de minutos para segundos.

Essa frequência é importante na análise de vibração porque indica a velocidade de rotação do motor e serve como referência para identificar harmônicos ($2 \times RPM$, $3 \times RPM$ etc.) e possíveis falhas como **desequilíbrio** que aparece na frequência de rotação ($1 \times RPM$) do motor e é caracterizado por um pico único e proeminente no espectro. Além do **desalinhamento**, que apresenta componentes harmônicas da frequência de rotação, como $1x$, $2x$, ou $3x$ RPM. Defeitos como **Folgas mecânicas** manifesta-se como múltiplos harmônicos da frequência de rotação e **falhas em rolamentos** que produzem frequências de defeito específicas, como frequência de passagem de elementos rolantes (BPFO, BPF1), de pista externa ou interna, e frequência de rotação do elemento rolante. No âmbito elétrico **defeitos no estator** que são associados a frequências múltiplas da frequência de linha (50 Hz ou 60 Hz). Por fim, os **defeitos no rotor** produzem bandas laterais próximas à frequência de rotação, conhecidas como frequências de deslizamento.

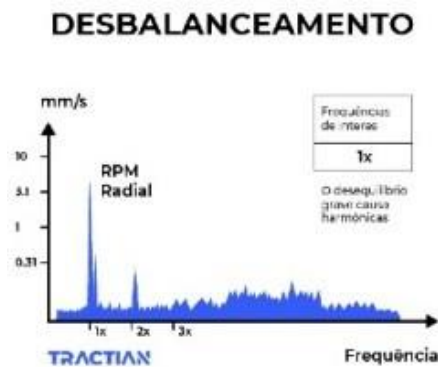
Tabela 1 – Tabela base para identificar cálculo da frequência fundamental a ser analisada.

Causa	Frequência	Amplitude	Observação
Desbalanceamento	1 X RPM	Proporcional ao desbalanceamento, maior no sentido radial	Geralmente aparece no primeiro harmônico
Desalinhamento / Eixo torto	1/2/3/4 X RPM	Grande em direção axial	Desalinhamento entre mancais
Folga nos mancais	½ X RPM	Grande no sentido vertical	Como a frequência é menor que ½ RPM a fase pode ser variável
Falta de firmeza mecânica	2 X RPM	Instável	Geralmente afeta o alinhamento
Correias frouxas	1 X RPM	Instável	-
Engrenagens defeituosas	Alta (nº de dentes X RPM)	"blips"	Frequência entre 15.000 e 40.000 RPM
Rolamentos deteriorados	Alta	"blips"	Frequência entre 15.000 e 40.000 RPM
Lubrificação	Alta	-	A amplitude se modifica notadamente em função da lubrificação
Eixo torcido	1 X RPM	Grande valor no sentido axial	A amplitude pode se apresentar de forma pulsátil

Fonte: TRACTIAN, 2022.

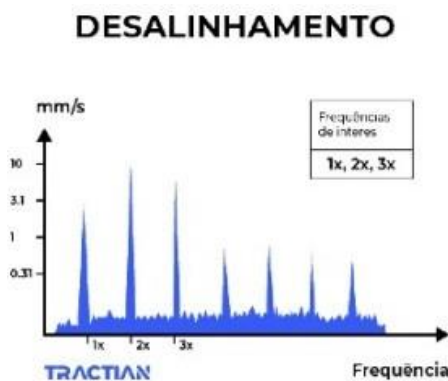
Abaixo estão representados exemplos nas Figuras 10, 11 e 12 de como se comporta o sinal espectral no domínio da frequência de uma máquina de indução trifásica com problemas de desbalanceamento mecânico no eixo, desalinhamento e falhas no estator e rotor.

Figura 10 – Desbalanceamento mecânico associado à frequência de rotação do eixo. (Comportamento espectral do domínio da frequência)



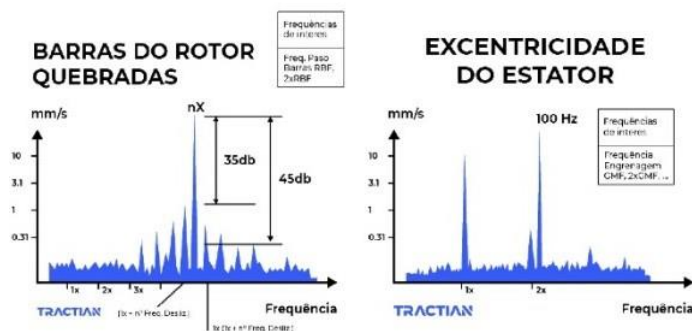
Fonte: PIOVESAN, 2022.

Figura 11 – Desalinhamento que pode gerar componentes harmônicas específicas. (Comportamento espectral do domínio da frequência)



Fonte: PIOVESAN, 2022.

Figura 12 – Problemas no estator ou rotor que aparecem em frequências de deslizamento ou em múltiplos da frequência da rede.



Fonte: PIOVESAN, 2022.

3 METODOLOGIA

Neste capítulo, será detalhado o processo de projeto e construção do coletor de sinais e como será integrado ao sistema de monitoramento de vibrações, garantindo a captura eficiente dos dados necessários para a análise. Além disso, será demonstrado o processamento desses sinais, incluindo as técnicas de filtragem, amplificação e conversão de sinais, visando a realização de uma análise precisa das vibrações e a detecção de falhas em máquinas rotativas.

3.1 *Materials*

Para a aplicação da técnica de análise vibração é necessário reunir dados que permitem obter sinais necessários para o diagnóstico de falhas. Para isso, foi utilizado um acelerômetro do tipo GY-61, apresentado na Figura 5. O acelerômetro GY-61 é uma escolha viável para monitoramento de vibrações em projetos de baixo custo, equilibrando desempenho técnico e acessibilidade financeira. Com faixa de medição de $\pm 3g$, sensibilidade de 300 mV/g e resposta dinâmica de até 2 kHz, ele oferece precisão suficiente para detectar variações mínimas de vibração. Sua interface simples facilita a integração com microcontroladores, reduzindo a complexidade do sistema. Além disso, seu custo inferior a R\$50,00 o torna uma alternativa acessível frente a sensores industriais, que podem ultrapassar R\$2.000,00. Apesar de não ser a opção mais precisa, atende adequadamente ao objetivo do projeto, proporcionando um monitoramento eficiente e econômico.

Assim, para realizar a coleta de sinais de vibração foi projetado e construído uma placa eletrônica dedicada que possibilita a captura. Para a construção foi necessário utilizar um conjunto de componentes listados na Tabela 2. O sistema foi desenvolvido com base nos seguintes elementos: transistor BC548, que atuará como amplificador e possibilitará o condicionamento do sinal de baixa amplitude do acelerômetro; o Circuito Integrado Oscilador e Temporizador NE555P, que permitirá a modulação do sinal ou ajustes temporais necessários ao circuito; três capacitores, essenciais para o acoplamento, desacoplamento e filtragem de ruídos; um potenciômetro de 10k, para ajuste de ganhos ou controle de sensibilidade; e um plug P3, que servirá como interface para a conexão do sinal de saída.

Tabela 2 – Materiais utilizados para construção do coletor de sinal de vibração.

**Materiais a serem utilizados para construção da placa eletrônica
para coleta de sinais de vibração**

Quant	Descrição do Componente	Custo Unitário
1	Acelerômetro GY-61	R\$ 35,00
1	Circuito Integrador Oscilador Temporizador NE555P	R\$ 17,00
1	Transistor BC548	R\$ 5,00
1	Potenciômetro de 10K ohms	R\$ 10,00
2	Trimpot 3386W	R\$ 15,00
2	Resistor 10K ohms 1/4W	R\$ 0,50
3	Resistor 470 ohms 1/4W	R\$ 0,50
1	Resistor 15K ohms 1/4W	R\$ 0,50
4	Capacitor 104 Z de 100nF	R\$ 1,20
1	Diodo Zener 1N4731A [4V3 / 1W]	R\$ 5,00
1	Resistor 220K ohms 1/4W	R\$ 0,50

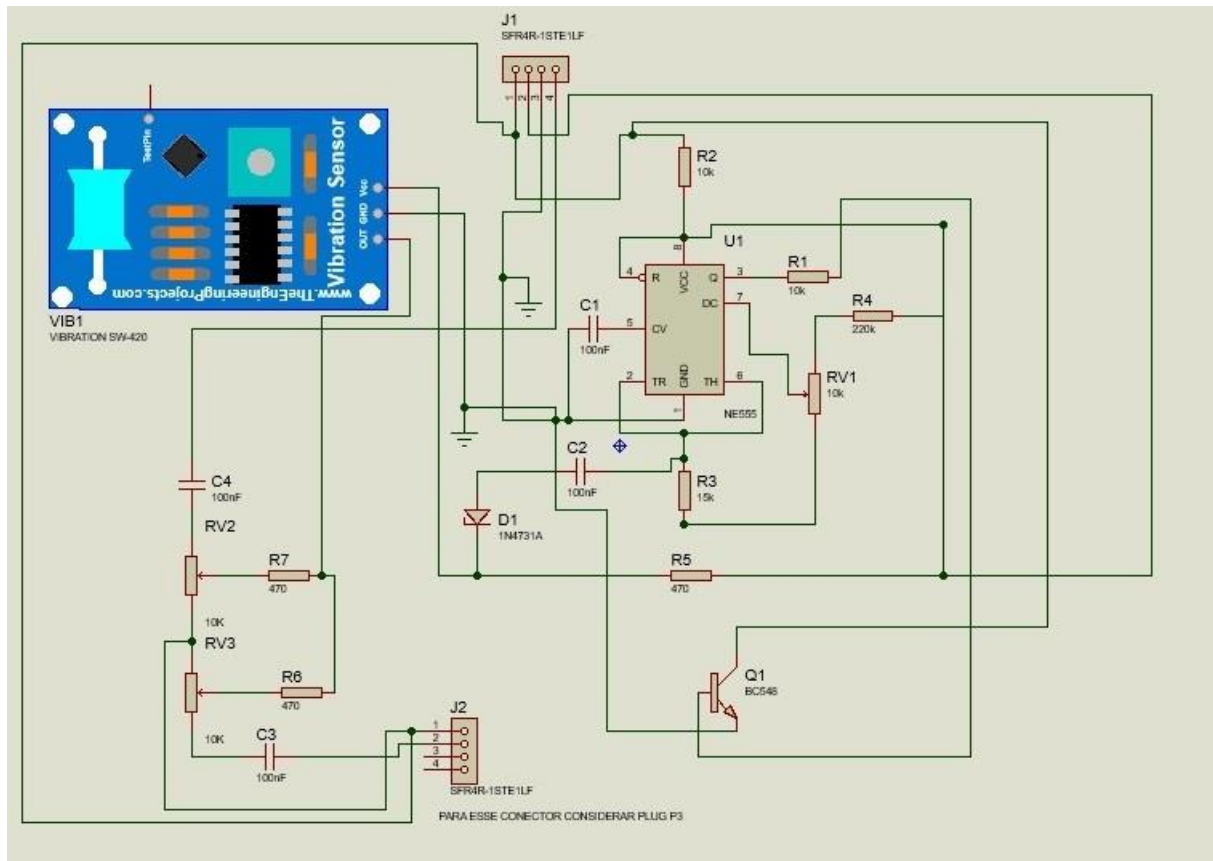
Fonte: Elaborado pelo autor, 2024

Custo informado acima foi feito no dia 20/10/2024.

3.1.1 *Desenvolvimento do Sistema de aquisição de Sinais de Vibração e Monitoramento*

Foi desenvolvido um circuito eletrônico, conforme apresentado na Figura 13, destacando o uso de componentes para seu funcionamento e integração com o sensor utilizado. O sensor GY-61 permite gerenciar a comunicação com o auxílio do *software SoundCard Scope*. Para a construção, foi empregado um transistor para amplificar o sinal proveniente do acelerômetro, assegurando que ele alcance níveis adequados para leitura pelo *software*. Além disso, um circuito integrado NE555P que gera e atua como disparador para capturar eventos de vibração específicos e evitar leituras falsas. Por fim, o plug P3 estabelece a interface física entre a placa eletrônica e o computador, viabilizando a utilização do *software* mencionado.

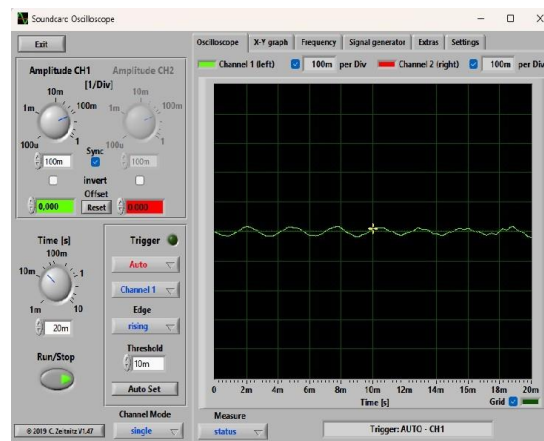
Figura 13 – Esquemático do Circuito eletrônico para coleta de sinais de vibração.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Com a construção da placa projetada é possível então condicionar o sinal de vibração captado pelo acelerômetro para que ele possa ser lido de maneira confiável. Esse processo serve para transformar as vibrações físicas em um sinal elétrico limpo, estável e compatível com o sistema de aquisição de áudio, garantindo precisão e qualidade na captura do sinal.

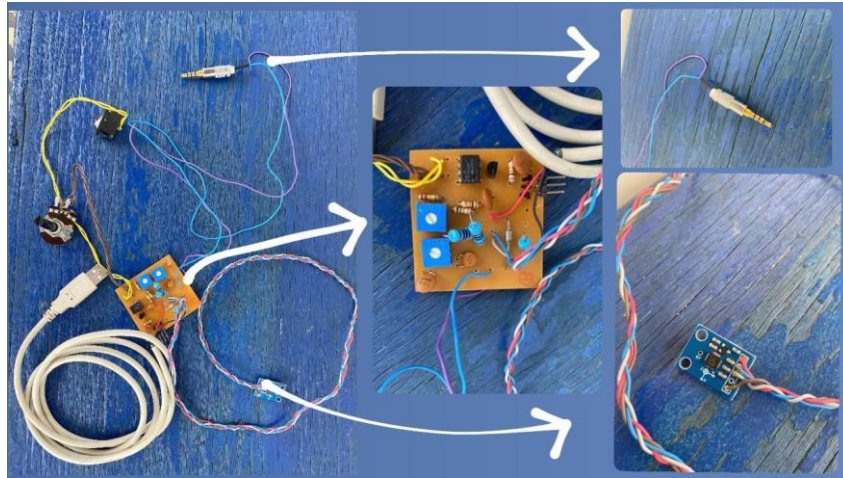
Figura 14 – *SoundCard Scope*, software para integração ao circuito para coleta de sinais de vibração.



Software Sound Card Scope que será utilizado como integração ao Circuito Eletrônico apresentado na Figura 14 para coleta dos sinais de vibração.

Fonte:Elaborado pelo autor, 2024.

Figura 15 – Protótipo construído para coleta de sinais de vibração. - Detalhamento do Circuito eletrônico confeccionado.



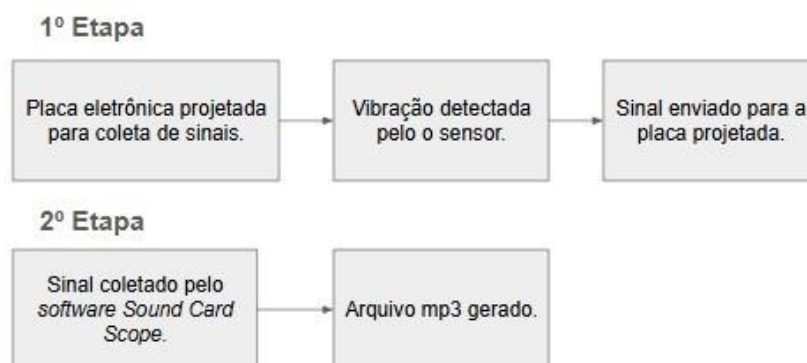
Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

3.1.2 Aquisição de Sinais

De acordo com (OPPENHEIM; SCHAFER, 2010), o teorema de amostragem de Nyquist estabelece que a taxa de amostragem deve ser superior ao dobro da frequência mais alta que se deseja analisar no sinal medido. Considerando que o acelerômetro ADXL335 suporta até 2000 Hz, será adotada uma taxa de amostragem de 2500 Hz.

Essa frequência é suficiente para identificar falhas básicas, como desequilíbrios e desalinhamentos. No entanto, caso o foco da análise seja a detecção de falhas em rolamentos ou sinais de alta frequência, seria necessário utilizar um acelerômetro com maior largura de banda, preferencialmente de até 5 kHz.

Figura 16 – Etapas para aquisição de sinais.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Os sinais serão, comumente, representados por amplitude em função do tempo ou amplitude em função da frequência. Na prática, será comum encontrar vários componentes vibrando

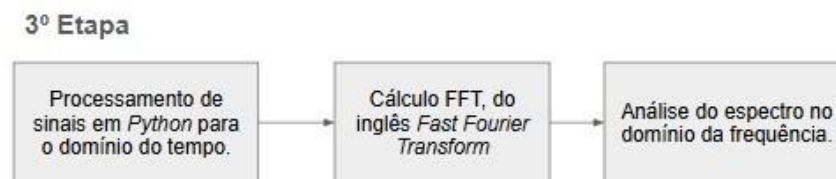
em frequências diferentes simultaneamente em equipamentos industriais. Essas vibrações se somarão e se subtrairão, formando uma senoide complexa, o que dificultará a interpretação e a identificação dos componentes presentes (SKF, 2004).

É imprescindível seguir as orientações estabelecidas na Seção 2.2.4 e 2.2.5, que detalha as diretrizes sobre a posição do transdutor utilizado. A correta localização do transdutor garante a precisão e a confiabilidade dos dados obtidos, pois a posição inadequada pode resultar em medições imprecisas ou não representativas do comportamento real das máquinas. Dessa forma, a observância dessas orientações contribui para a eficácia do projeto e no diagnóstico de possíveis falhas nos sistemas monitorados.

3.1.3 Codificação em Python para Processamento e Análise de Sinais.

Após realização das duas primeiras etapas apresentadas na Figura 16 é necessário tratar todas essas coletas realizadas, partindo para terceira etapa (figura 17). Foi escolhido a linguagem *python*, devido à sua simplicidade e à disponibilidade de bibliotecas para aplicações científicas e de engenharia, permitindo realizar desde operações básicas de manipulação de dados até análises complexas. Além disso, a linguagem oferece integração com ferramentas como MATLAB e bibliotecas como NumPy e SciPy, destacando-se pela acessibilidade e eficiência, o que possibilita realizar todo o processo de análise seja realizado de forma automatizada e confiável. Dessa forma, sua aplicação neste trabalho é crucial para alcançar os objetivos de análise preditiva e manutenção eficiente dos motores de indução.

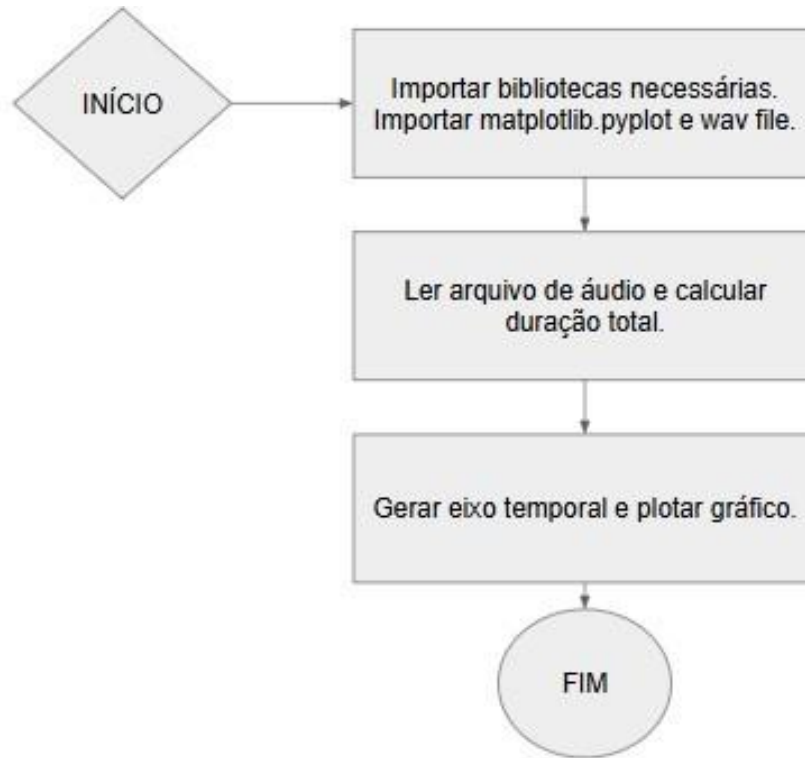
Figura 17 – Etapa para codificação do sinal.



Fonte:Elaborado pelo autor, 2024.

Para exibir o comportamento do sinal de vibração coletado no domínio do tempo. É necessário inicialmente importar as bibliotecas necessárias, incluindo o `matplotlib.pyplot` para plotar o gráfico, o `wavfile` para ler o arquivo de áudio gerado pelo software SoundCard Scope. Em seguida, o arquivo de áudio contendo o sinal de vibração é lido, obtendo-se a frequência de amostragem e os dados do sinal. A duração total do áudio é calculada, e um eixo temporal é gerado para representar o intervalo de tempo correspondente a cada amostra. Por fim, o gráfico é plotado, exibindo a amplitude do sinal em função do tempo, permitindo uma análise visual preliminar do comportamento do sinal coletado. Na figura 18 é demonstrado através de um fluxograma de como é feito a aquisição da frequência de amostragem.

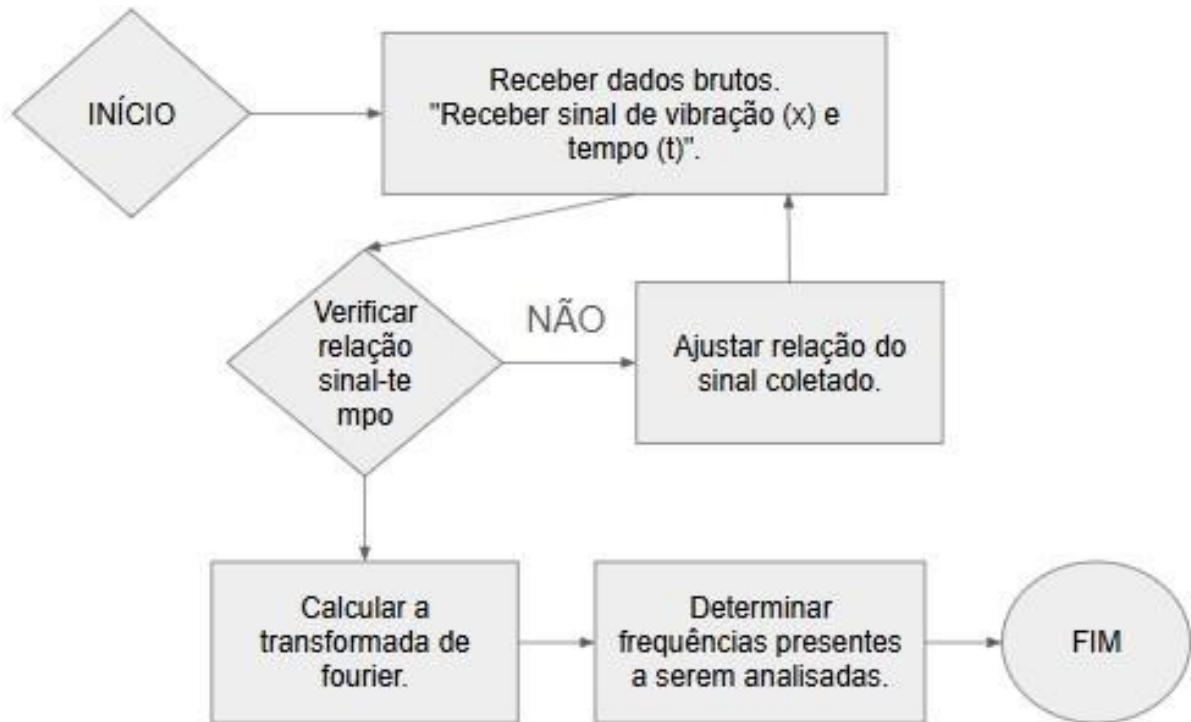
Figura 18 – Fluxograma aquisição da frequência de amostragem e os dados brutos do sinal coletado.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Após obter esses dados será necessário transformar essas informações no domínio do tempo para o domínio da frequência, demonstrado passos na figura 19. Observa-se no apêndice A que o código inicia sua execução a partir da recepção de dois conjuntos de dados principais: o sinal de vibração e o tempo correspondente. O sinal de vibração, representado pela variável x , é uma sequência de valores que descrevem a variação da vibração ao longo do tempo. Por sua vez, o vetor t contém os instantes precisos em que cada amostra do sinal foi registrada. Esse vetor fornece a base temporal para a análise, indicando, por exemplo, que as medições podem ter sido realizadas em intervalos regulares, como a cada 1 milissegundo. Essa relação entre o sinal de vibração e o tempo é fundamental para o cálculo da Transformada de Fourier, pois possibilita a determinação das frequências presentes no sistema, que são essenciais para a análise de vibração em equipamentos e máquinas rotativas.

Figura 19 – Fluxograma para recebimento dos dados brutos e Transformada de Fourier.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

O código desenvolvido para o processamento e análise dos sinais coletados pela placa projetada está detalhado nos Apêndices A, B e C. O Apêndice A descreve o processo inicial, onde o sinal de vibração, em formato MP3, é lido e convertido para o domínio do tempo, utilizando as bibliotecas apropriadas para essa tarefa. Já o Apêndice B e C trata da transformação do sinal de vibração para o domínio da frequência, aplicando a Transformada de Fourier.

4 RESULTADOS

Neste capítulo, são apresentados os resultados obtidos a partir da análise de dados de vibração coletados durante o desenvolvimento deste trabalho. Para isso, foi selecionado um motor de indução trifásico (MIT). Dados de sua placa incluem informações como potência nominal, tensão de operação, corrente nominal e frequência, essenciais para compreender o comportamento dinâmico do motor. Serão descritas as condições experimentais e os parâmetros utilizados na coleta dos sinais e em seguida, os dados processados serão exibidos, destacando as características relevantes observadas no domínio do tempo e da frequência. Por fim, serão discutidas as implicações dos resultados na identificação de falhas em motores de indução trifásicos, evidenciando a eficácia do método proposto e suas limitações.

4.1 Coleta e Aquisição de Sinais

Para análise foi escolhida uma bomba de polpa utilizada no processo de filtragem da usina de pelotização de Minas Gerais da Vale S.A. Esse equipamento foi selecionado devido à sua relevância operacional no processo industrial e à possibilidade de aplicação prática do monitoramento de vibração em seu motor elétrico.

O motor associado à bomba foi monitorado com base em seus dados técnicos, conforme especificado na placa de identificação. As imagens apresentadas na Figura 21 e Tabela 3 documentam o motor de indução trifásico selecionado para análise, incluindo sua localização na área industrial, os componentes periféricos e a placa de identificação. Fotos foram feitas em campo durante o levantamento inicial, com o objetivo de registrar as condições reais de instalação e operação do equipamento, servindo como base para as etapas subsequentes de monitoramento e análise de vibração.

Tabela 3 – Dados de placa Motor WEG Modelo WMining, FAB: 29/04/2019.

Dados de Placa Motor WEG Modelo WMining, FAB: 29/04/2019	
Poência Nominal	220 kW (300 HP)
Tipo de Motor	Indução, Gaiola de Esquilo
Tensão Nominal	440 V
Corrente Nominal	350 A
Frequência	60 Hz
Rotação Nominal	1.790 RPM
Fator de Serviço (FS)	1.15
Fator de Potência (FP)	0.86
Rendimento Nominal	95.2%
Temperatura Ambiente	40°C
Grau de Proteção	IPW56
Classe de Isolação	F
Peso	1.524 kg
Lubrificação	Mobil Polyrex EM
Norma Aplicável	NBR 17094-1

Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

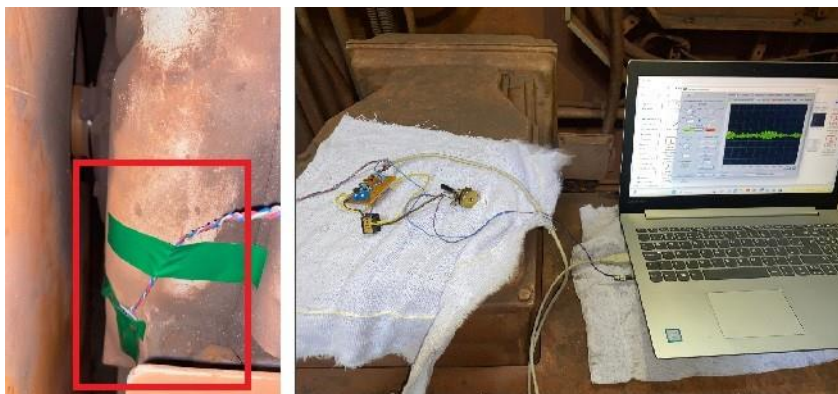
Figura 20 – Motor de indução trifásico selecionado para análise, incluindo sua localização na área industrial, os componentes periféricos.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

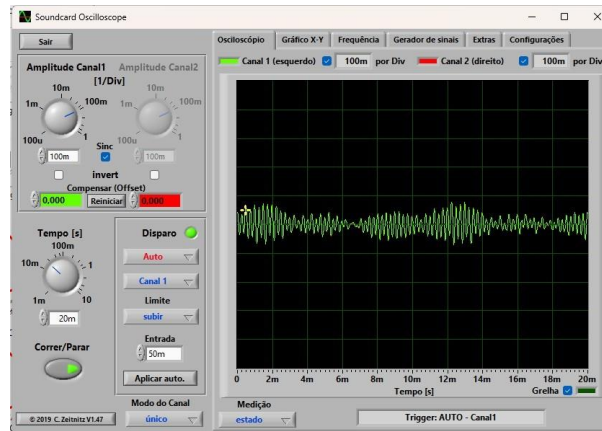
A norma (IEC60034-1, 2004) (Máquinas elétricas rotativas – Parte 1: Requisitos gerais), são especificados os métodos de medição de vibração, incluindo a orientação dos sensores de vibração em relação ao eixo do motor e os pontos de medição recomendados. Assim foi posicionado o acelerômetro na posição 1, na direção radial horizontal, para medir vibrações perpendiculares ao eixo do motor, frequentemente associadas a desbalanceamentos. Na posição 2, foi adotada a direção radial vertical, pois, quando o motor está montado em uma base fixa, medir nessa direção pode indicar problemas relacionados à fundação ou à montagem do motor. Por fim, na posição 3, a direção axial (longitudinal) foi escolhida para detectar vibrações ao longo do eixo do motor. (Posições descritas na Seção 2.2.4 e apresentada na Figura 09).

Figura 21 – Posição 1, direção radial horizontal para medir vibrações perpendiculares ao eixo do motor.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

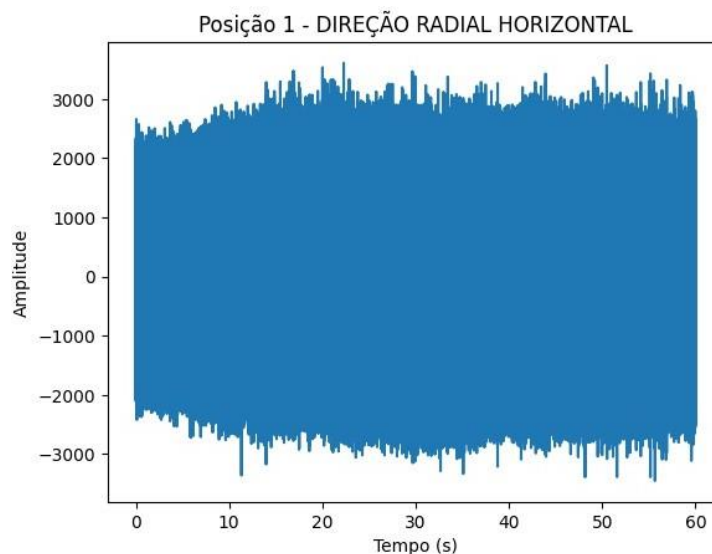
Figura 22 – Representação do sinal com coletado referencial na posição no *software SoundCard Scope* - Posição 1, direção radial horizontal.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Qualquer sinal gerado por sensores, como vibração, som ou corrente elétrica, varia com o tempo. Por exemplo, um acelerômetro mede a aceleração em função do tempo. A partir do sinal de vibração coletado, os dados foram registrados no formato WAV, o qual preserva a integridade e a qualidade do sinal durante a aquisição. Este formato permitiu que os dados fossem facilmente manipulados e analisados utilizando ferramentas de processamento de sinais. Este processamento de sinais é detalhado na Seção 3.1.3. O sinal no tempo é necessário para determinar as componentes de frequência, já que a FFT calcula como cada frequência (seno/cosseno) contribui para a forma do sinal. Assim o sinal foi processado para análise no domínio do tempo (Figura 24), possibilitando a observação e interpretação das variações temporais da vibração.

Figura 23 – Sinal processado para o domínio do tempo. Essencial para futuro cálculo da FFT. (Posição 1, direção radial horizontal.)

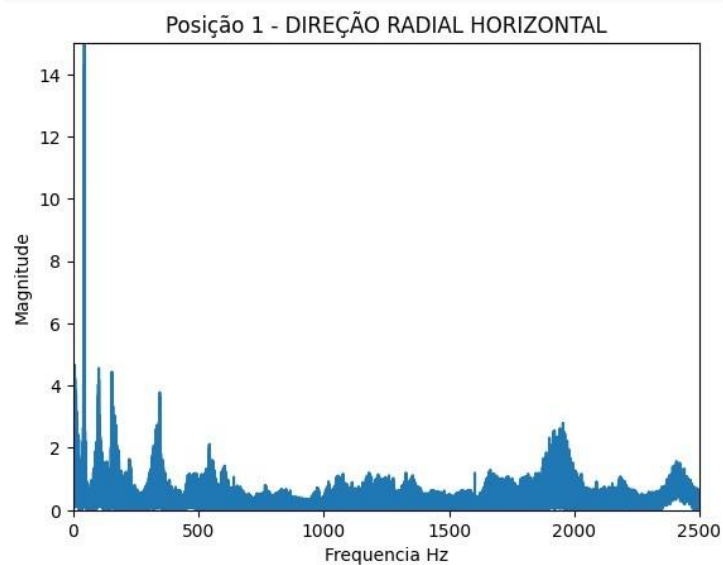


Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

O domínio do tempo permite definir a taxa de amostragem (f_s), que é crucial para garantir que a FFT obedeça ao teorema de Nyquist. Assim, para identificar padrões ou anomalias no comportamento da vibração, como picos de intensidade ou variações que podem estar relacionadas a falhas, como desbalanceamento ou problemas nos rolamentos, é necessário realizar a Transformada de Fourier.

Foi realizado o cálculo da FFT aplicada ao sinal bruto. Procedimento permite converter o sinal do domínio do tempo para o domínio da frequência, possibilitando uma análise espectral detalhada, representado na Figura 24. *Código referencial descrito no apêndice A e B.*

Figura 24 – Sinal processado para o domínio da frequência. Posição 1, direção radial horizontal.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

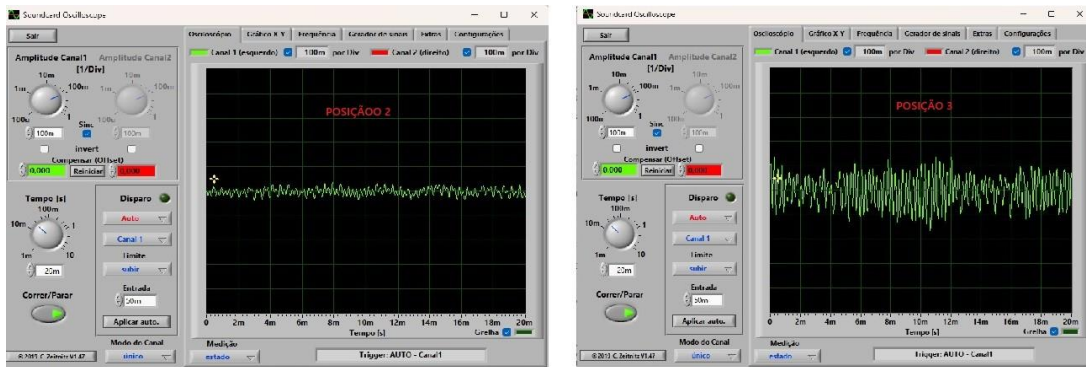
Realizado o processo de coleta e processamento do sinal para as posições 2 e 3.

Figura 25 – Posicionamento do sensor para a Posição 2 direção radial vertical e Posição 3 Direção Axial.)



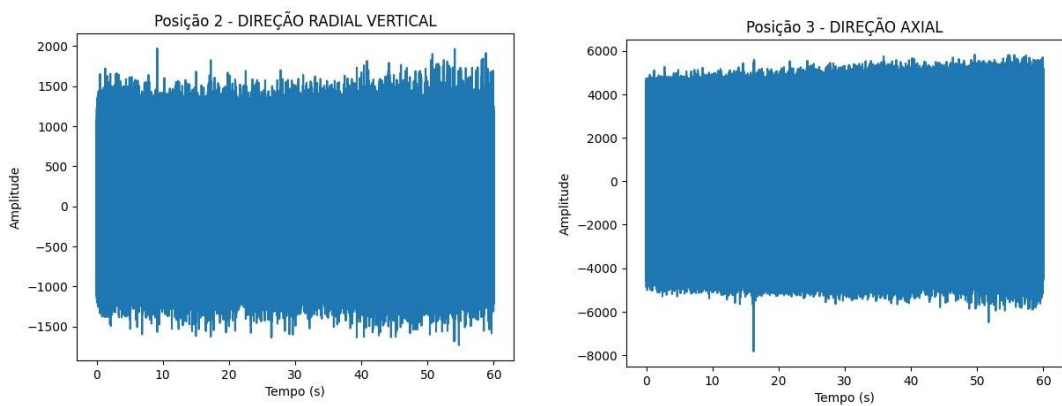
Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Figura 26 – Sinal apresentado pelo *software SoundCard Scope*. Posição 2 direção radial vertical e Posição 3 Direção Axial.



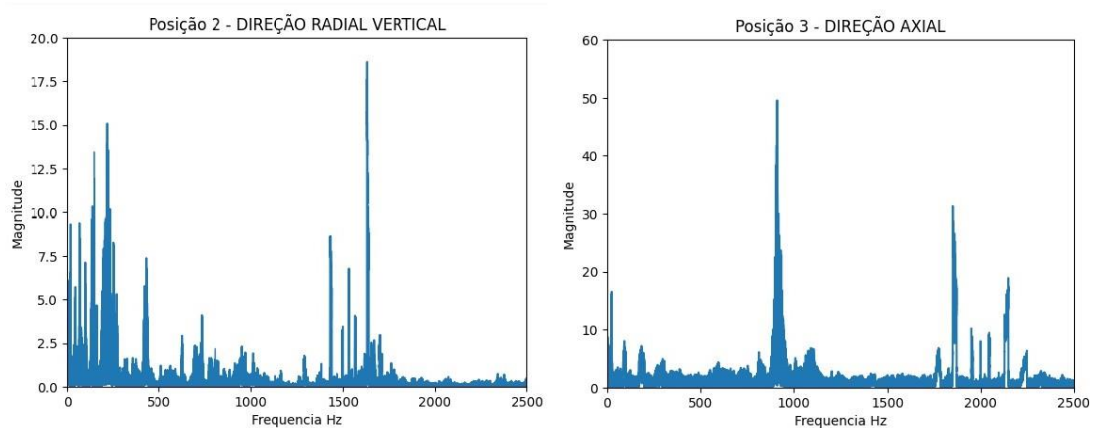
Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Figura 27 – Sinal processado para o domínio do tempo. Essencial para futuro cálculo da FFT. Posição 2 direção radial vertical e Posição 3 Direção Axial.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Figura 28 – Sinal processado para o domínio da frequência. Posição 2 direção radial vertical e Posição 3 Direção Axial.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

4.2 Análise - Espectro da Frequência

Como apresentado na Tabela 2, cada tipo de falha mecânica ou elétrica gera vibrações em frequências específicas podendo ser assim detectadas. Primeiramente será realizado a identificação do pico 1 x RPM. É a frequência fundamental associada à rotação do eixo da máquina e normalmente está relacionada ao balanceamento do rotor.

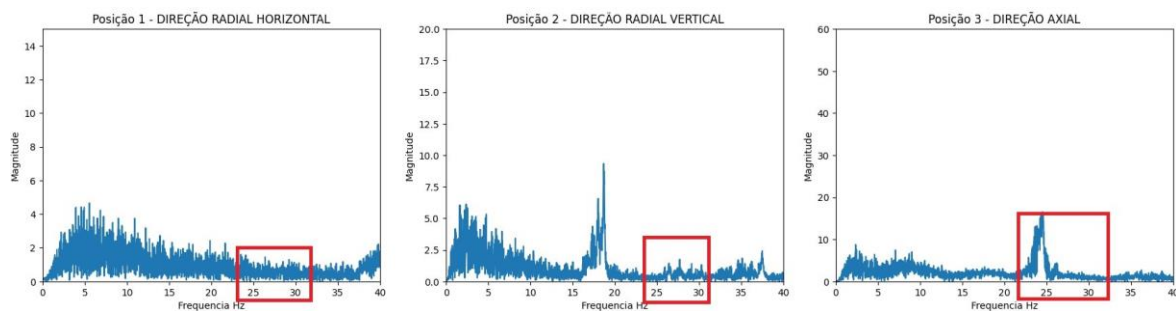
$$f = \frac{RPM}{60} \quad (4.1)$$

Consultando os dados da placa do motor na Tabela 3 e substituindo equação (4.1) é possível assim identificar a frequência correspondente a 1x RPM.

$$f = \frac{1790}{60} = 29,8Hz \quad (4.2)$$

Em torno dessa frequência calculada procurou-se por um pico no espectro considerando a resolução e a taxa de amostragem. A amplitude do pico em 1x RPM for muito pronunciado, pode indicar que a rotação da máquina está gerando vibrações mais fortes, possivelmente por desbalanceamento ou folgas. Esse pico corresponderá ao comportamento rotacional fundamental da máquina.

Figura 29 – Amostragem do Sinal com a frequência correspondente em 1 x RPM. Posição 1 - Direção Radial Horizontal, Posição 2 - Direção Radial Vertical e Posição 3 - Direção Axial.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Os três gráficos apresentam a magnitude de um sinal vibratório em um motor, medido em três direções diferentes: radial horizontal, radial vertical e axial. Cada pico no gráfico corresponde a uma frequência específica de vibração, e a altura do pico indica a intensidade dessa vibração. Por ser um motor de alta rotação (bomba de polpa) a análise de vibração exige uma atenção especial. A natureza do trabalho dessas máquinas, que frequentemente operam em condições adversas, pode gerar espectros de vibração mais complexos e com níveis de vibração base mais elevados.

Os gráficos mostram a magnitude da vibração em função da frequência (Hz) para três diferentes posições (direções). O destaque em vermelho indica picos de interesse, que podem estar relacionados a frequências específicas do sistema, como frequência de rotação (1x RPM) ou harmônicos.

Posição 1 - Direção Radial Horizontal, não há um pico significativo próximo à frequência de interesse (25-30 Hz). Isso pode indicar que a vibração nesta direção não está fortemente influenciada pela rotação principal ou está sendo mascarada por outros componentes de ruído. O espectro apresenta amplitude distribuída em baixas frequências, o que pode estar relacionado a desbalanceamento ou folgas mecânicas. Essas causas são referentes a vibração de fundo (baixo impacto da frequência rotacional) e interferências externas ou ruídos mecânicos na direção horizontal.

Posição 2 - Direção Radial Vertical, um pico claro em aproximadamente 20 Hz está presente, o que pode corresponder à frequência 1x RPM, considerando a rotação esperada do equipamento. Existe também atividade destacada na faixa de 25-30 Hz (em vermelho), que pode estar associada a um harmônico ou a outra fonte de vibração secundária.

Posição 3 - Direção Axial, há um pico muito evidente entre 25-30 Hz, que é muito mais pronunciado do que em outras direções. A direção axial tende a capturar vibrações relacionadas a desalinhamento, o que pode indicar que o pico destacado está relacionado a esse tipo de problema. Essas causas são referentes a desalinhamento do eixo ou componentes giratórios gerando vibrações axiais com interações axiais entre rolamentos e o eixo.

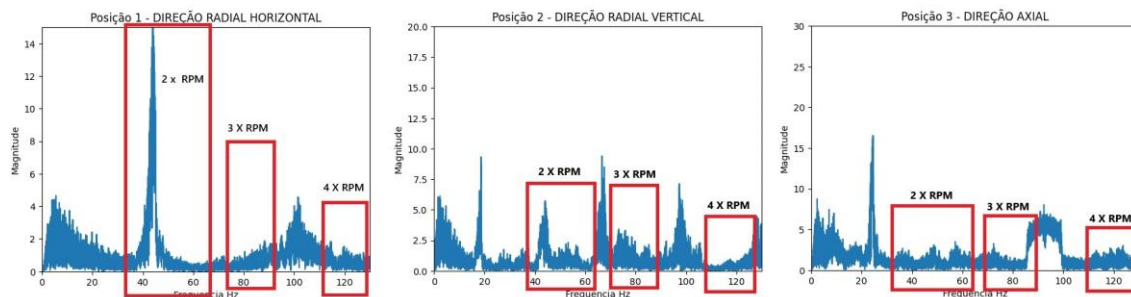
Assim, com o intuito de confirmar harmônicas e outras frequências foi realizado análise em 2x RPM, 3x RPM e 4x RPM. Além disso, quando o equipamento em análise é uma bomba de polpa, e há possibilidade de que o instrumento de medição tenha captado ruídos externos ou interferências, a análise precisa ser feita com algumas considerações adicionais. Vibrações em 2x RPM ou múltiplas harmônicas podem ser normais, dependendo do tipo de operação, devido à interação do rotor com o fluido. Necessário verificar se os picos em 2x RPM, 3x RPM e 4x RPM são consistentes com a operação hidráulica da bomba. Portanto, a análise básica permanece a mesma, mas com um cuidado extra para identificar e isolar possíveis interferências.

$$2xRPM = 29,8 \times 2 = 59,6Hz \quad (4.3)$$

$$3xRPM = 29,8 \times 3 = 89,4Hz \quad (4.4)$$

$$4xRPM = 29,8 \times 4 = 119,2Hz \quad (4.5)$$

Figura 30 – Amostragem do Sinal com a frequência correspondente em 2 x RPM, 3 x RPM e 4 x RPM. Posição 1 - Direção Radial Horizontal, Posição 2 - Direção Radial Vertical e Posição 3 - Direção Axial.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Posição 1 - Direção Radial Horizontal, 2x RPM um pico significativo de amplitude está presente sugerindo vibrações relacionadas a fenômenos cíclicos que ocorrem duas vezes por rotação, causas incluem desalinhamento angular no acoplamento, rigidez desigual no sistema de montagem do motor ou acoplamento e vibrações de desequilíbrio dinâmico agravadas por uma condição estrutural. Em 3x RPM apresenta-se um pico menor com harmônicas geradas por falhas progressivas no rolamento e vibração estrutural que está amplificando as múltiplas frequências. Em 4x RPM a uma presença de um pico indicando defeitos complexos em rolamentos, como falhas nos elementos rolantes ou pista interna/externa.

Posição 2 - Direção Radial Vertical, 2x RPM um pico presente nesta frequência confirma vibrações cíclicas. Na direção vertical, isso pode ser exacerbado por desbalanceamento dinâmico do rotor devido à gravidade e desgaste do suporte estrutural na direção vertical. 3x RPM e 4x RPM com picos observados indicam que múltiplas frequências harmônicas estão presentes. Isso é comum em interações complexas entre desalinhamento e vibrações estruturais.

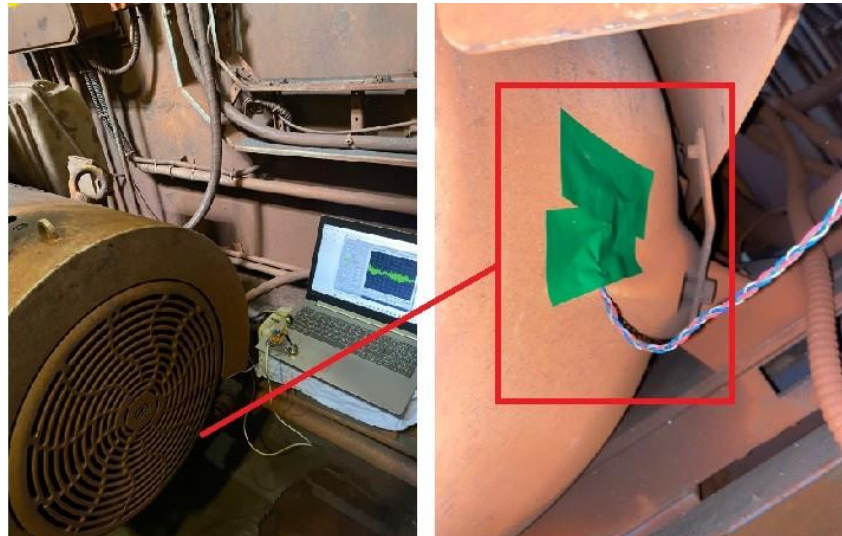
Posição 3 - Direção Axial, 2x RPM pico observado na direção axial é típico de vibrações associadas a desalinhamento angular e flexional do eixo, além disso, forças axiais geradas por falhas em rolamentos ou condições de lubrificação inadequadas. Em 3x RPM e 4x RPM as frequências harmônicas na direção axial reforçam a hipótese de desalinhamento significativo no sistema acoplado, que afeta a distribuição de forças ao longo do eixo.

Durante a análise de vibração em motores de indução trifásicos, a coleta de sinais de vibração é comumente realizada no lado acoplado, onde o motor está diretamente conectado à carga. No entanto, neste estudo, também foi coletado um sinal no lado não acoplado do motor. Essa abordagem é essencial para proporcionar uma visão mais abrangente das condições operacionais e da saúde do equipamento. A coleta de dados no lado não acoplado permite a identificação de falhas que podem não ser detectáveis no lado acoplado, como desalinhamento interno, desbalanceamento e problemas específicos em mancais.

Ao considerar ambas as extremidades do motor, é possível obter uma análise mais

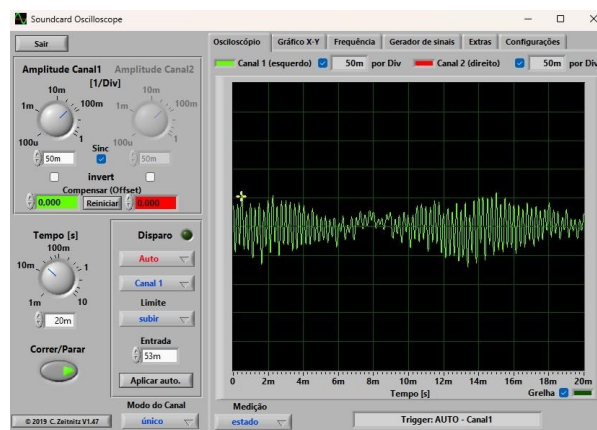
completa, capaz de diferenciar as vibrações transmitidas pela carga das vibrações intrínsecas do motor. Esse procedimento aumenta a precisão no diagnóstico e contribui para a implementação de estratégias eficazes de manutenção preditiva, garantindo maior confiabilidade operacional e redução de custos associados a falhas inesperadas. Para a coleta do sinal não acoplado foi posicionado o sensor na posição próxima a direção radial horizontal e axial, como demonstrado abaixo.

Figura 31 – Posição do sensor lado não acoplado próximo a direção radial horizontal e axial.



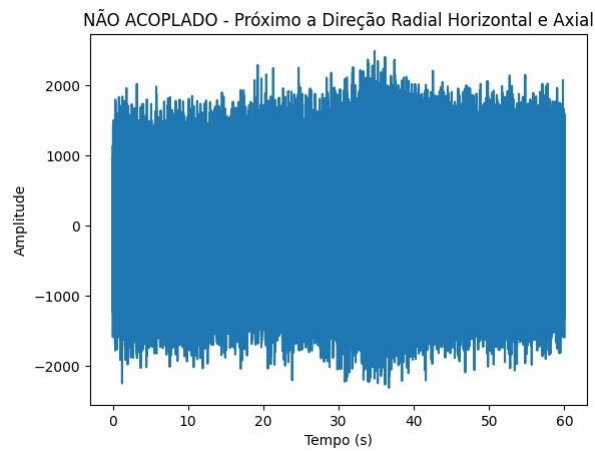
Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Figura 32 – Sinal apresentado pelo *software SoundCard Scope*. Posição do sensor lado não acoplado próximo a direção radial horizontal e axial.



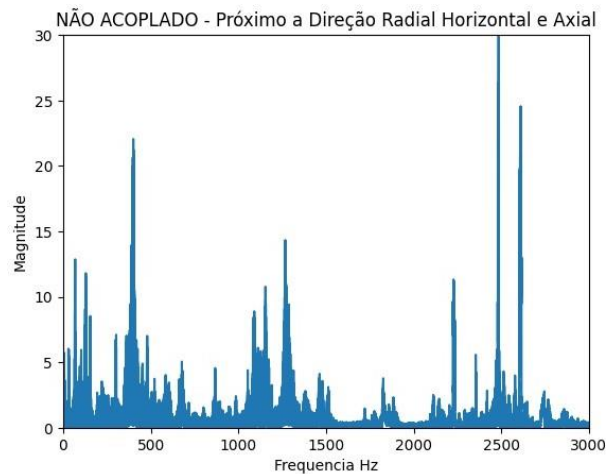
Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Figura 33 – Sinal processado para o domínio do tempo. Essencial para futuro cálculo da FFT. Posição do sensor lado não acoplado próximo à direção radial horizontal e axial.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Figura 34 – Sinal processado para o domínio da frequência. Posição do sensor lado não acoplado próximo à direção radial horizontal e axial.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

O espectro de vibração coletado próximo à posição de direção axial do lado não acoplado do motor apresenta características que permitem inferir possíveis falhas no sistema. Em frequências baixas, abaixo de 100 Hz, observa-se a presença de componentes significativas, o que pode indicar desbalanceamento no rotor, caracterizado por amplitudes elevadas na frequência fundamental da rotação. Além disso, essas frequências baixas também podem estar associadas a folgas mecânicas, que geram harmônicas de baixa frequência no espectro.

Na faixa de frequências médias, entre 500 Hz e 1000 Hz, é possível identificar vibrações que podem estar relacionadas ao desgaste ou folga nos mancais, problemas comuns em motores onde o lado não acoplado é mais suscetível a esses tipos de falha. Essas vibrações podem ser

causadas por desalinhamento interno ou lubrificação inadequada, que, por sua vez, produzem harmônicas mecânicas evidentes no espectro.

Em frequências elevadas, acima de 2000 Hz, destaca-se um pico significativo próximo a 2500 Hz. Esse comportamento sugere a presença de possíveis defeitos em rolamentos, uma vez que essas falhas geralmente se manifestam em frequências características específicas, como as frequências de passagem dos elementos do rolamento. Além disso, esse pico elevado pode estar associado a ressonâncias estruturais locais, onde componentes mecânicos amplificam vibrações em determinadas frequências.

De maneira geral, a amplitude máxima registrada no espectro, próxima a 30, indica que o motor apresenta vibrações significativas que demandam atenção. Esse comportamento reforça a necessidade de uma análise mais detalhada para identificar a origem dessas vibrações, avaliar os níveis normativos aceitáveis e propor ações corretivas, visando preservar a integridade do equipamento e garantir a confiabilidade operacional.

4.2.1 *Validação de resultados - Coletas e dados obtidos com o Sensor SKF.*

Para melhor retratação dos resultados por comparação de valores, foi coletados a partir do instrumento da SKF, utilizado pelos inspetores em campo na mesma máquina monitorada, a fim de validar os resultados.

Figura 35 – Instrumento SKF para coleta de vibração.

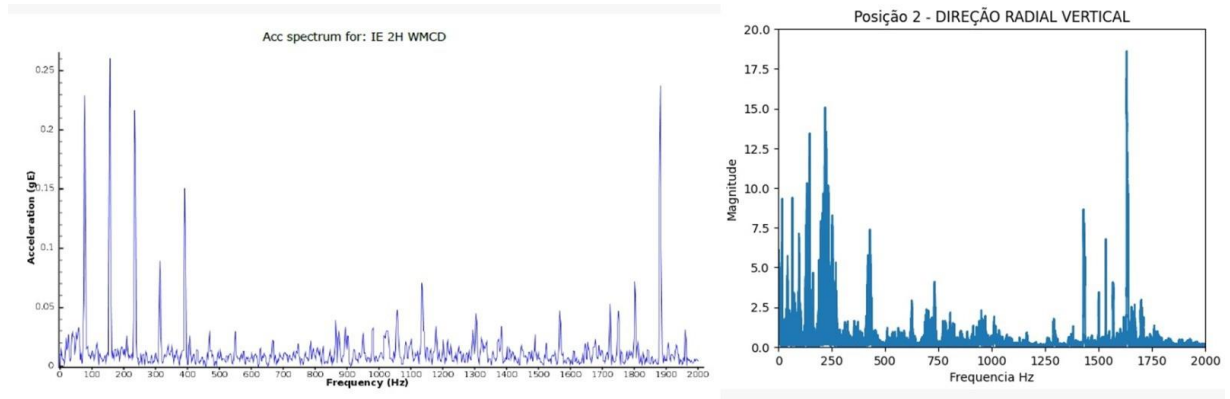


Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

A partir do sinal coletado pelo instrumento evidenciado na Figura 36, também da máquina em estudo, foi realizada a mesma análise. Esse processo teve como objetivo comparar

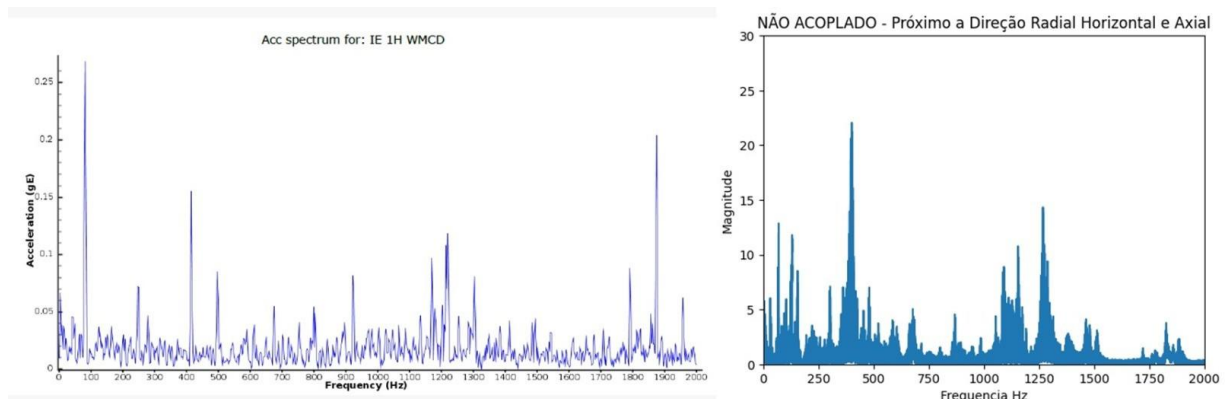
as características espectrais e validar a consistência dos dados obtidos por diferentes métodos, reforçando a confiabilidade das medições realizadas.

Figura 36 – Comparação dos sinais do instrumento SKF e coletor projetado (Lado Acoplado)



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Figura 37 – Comparação dos sinais do instrumento SKF e coletor projetado (Lado Não Acoplado)



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Na região de baixas frequências, não há sinais evidentes de componentes significativas no espectro. Isso sugere que fatores como desbalanceamento ou folgas mecânicas, que geralmente aparecem como picos em frequências muito baixas (próximas à frequência de rotação), não são predominantes nesse sinal. Os picos mais marcantes estão em torno de 100 Hz e seus múltiplos (200 Hz, 300 Hz, etc.). Esses harmônicos são típicos de vibrações relacionadas a forças periódicas, como aquelas geradas por elementos rotativos ou pulsação mecânica repetitiva. Esses sinais podem ser indicativos de desalinhamento com vibração frequente em múltiplos da frequência de rotação e problemas estruturais ou ressonâncias que podem amplificar vibrações regulares nessa faixa.

Na faixa média (500 a 1500 Hz), o espectro apresenta picos mais distribuídos e de menor amplitude, o que pode estar relacionado a vibrações transmitidas por componentes internos

do sistema, como engrenagens ou elementos do mancal. É necessário verificar se esses picos coincidem com frequências características de falhas internas, como aquelas associadas aos rolamentos.

Um pico significativo em torno de 1900 Hz sugere a presença de uma vibração localizada ou de uma ressonância estrutural específica do sistema. Frequências nessa região são frequentemente associadas a defeitos nos rolamentos, incluindo desgastes ou impactos causados por irregularidades na superfície dos elementos rolantes.

Com base nos dados apresentados, podemos concluir que o instrumento de análise de vibração utilizado demonstrou sua eficácia na identificação de problemas em equipamentos rotativos. A detecção de uma alta velocidade de vibração, classificada como "perigo", e a presença de diversos picos no espectro de frequência indicam que o instrumento está captando e processando os sinais de vibração de forma precisa. A correlação entre os dados de vibração e as possíveis causas de falhas (desbalanceamento, problemas nos rolamentos, etc.) demonstra a capacidade do instrumento de fornecer informações relevantes para a manutenção preditiva.

No entanto, é importante ressaltar que a análise apresentada é baseada em um único ponto de medição e em um único espectro de frequência. Para uma melhor conclusão, seria necessário realizar medições em outros pontos do equipamento, coletar dados em diferentes condições operacionais e analisar o histórico de vibração. Além disso, a interpretação dos resultados da análise de vibração requer conhecimento técnico e experiência. A análise de um espectro de frequência pode ser complexa e envolver a consideração de diversos fatores, como as características do equipamento, as condições operacionais e os tipos de falhas mais comuns.

Em resumo, os dados apresentados fornecem fortes evidências de que o instrumento de análise de vibração utilizado é capaz de detectar e diagnosticar problemas em equipamentos rotativos. No entanto, para garantir a confiabilidade dos resultados, é fundamental realizar uma análise completa e considerar todos os fatores que podem influenciar a vibração do equipamento.

5 CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como objetivo aplicar técnicas de análise de vibração para a manutenção preditiva de motores de indução trifásicos, utilizando a Transformada Rápida de Fourier como ferramenta para análise no domínio da frequência, através do desenvolvimento de um coletor de sinais de vibração e do processamento dos dados coletados. O sistema de monitoramento desenvolvido permitiu um acompanhamento contínuo das condições operacionais dos motores, promovendo diagnósticos mais rápidos e precisos, capazes de antecipar falhas potenciais com maior assertividade. A combinação do processamento automatizado dos sinais e a análise preditiva baseada em vibração proporcionaram um grande benefício no aumento da confiabilidade dos equipamentos e na redução de custos com paradas não programadas, além de contribuir para a segurança no ambiente de trabalho, ao evitar falhas catastróficas.

A metodologia empregada consistiu na coleta de sinais de vibração utilizando o sensor GY-61, integrado a uma placa eletrônica que condicionou o sinal para garantir a fidelidade dos dados. O *software SoundCard Scope* foi utilizado para gerenciar a comunicação entre o sensor e o sistema de aquisição, proporcionando uma captura estável e de alta qualidade. A escolha da linguagem Python, com bibliotecas como NumPy e SciPy, foi fundamental para processar e analisar os dados de forma eficiente.

A análise espectral realizada foi capaz de identificar falhas típicas em motores de indução trifásicos, como desbalanceamento, desalinhamento e falhas nos mancais, conforme as diretrizes fornecidas pelas normas ISO 2372, NBR 10082 e ISO 10816. A ISO 2372 forneceu as frequências características associadas a falhas mecânicas em máquinas rotativas, servindo como um padrão para a comparação dos espectros obtidos. A NBR 10082 foi essencial ao estabelecer os limites de vibração aceitáveis para equipamentos em operação, sendo aplicada na validação dos resultados obtidos durante o monitoramento das condições dos motores. Já a ISO 10816, com sua abordagem para avaliação das vibrações em máquinas rotativas, forneceu critérios adicionais para posicionamento do transdutor, permitindo classificar os níveis de vibração e identificar a gravidade das falhas detectadas.

Por exemplo, a detecção de um pico na frequência de 1x RPM foi um indicativo de desbalanceamento, enquanto picos em frequências múltiplas, como 2x e 3x RPM, sugeriram problemas como desalinhamento ou desgaste nos mancais. Essas identificações foram feitas com base nos limites estabelecidos pelas normas, corroborando a importância do uso dessas diretrizes para a análise das condições dos equipamentos e para a determinação da necessidade de intervenções preventivas. A utilização dessas normas foi fundamental para validar os resultados e garantir que as falhas fossem corretamente diagnosticadas e classificadas dentro dos parâmetros técnicos adequados.

Em termos de eficiência, a abordagem adotada demonstrou que é possível realizar a monitorização em tempo real e com baixo custo, permitindo a ampliação dessa técnica para outras máquinas rotativas presentes em ambientes industriais. A integração com plataformas

como Python e MATLAB se mostrou não apenas eficiente, mas também escalável, podendo ser adaptada para sistemas mais complexos.

Portanto, os resultados deste estudo validam a eficácia da análise de vibração para a manutenção preditiva, corroborando sua aplicação em larga escala na indústria, especialmente em motores elétricos. As normas ISO 2372, NBR 10082 e ISO 10816 foram fundamentais para garantir que os limites de vibração estabelecidos para o diagnóstico de falhas estivessem dentro dos parâmetros técnicos adequados. Este trabalho não só reforça a importância de práticas de manutenção preditiva no contexto industrial, mas também demonstra como a combinação de ferramentas de processamento de sinais avançadas pode aumentar a eficiência operacional e reduzir os custos com manutenções corretivas. A evolução contínua dessas tecnologias tende a proporcionar um futuro de manutenção mais inteligente, segura e econômica nas indústrias.

REFERÊNCIAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 5462: Confiabilidade e Manutenibilidade**. Rio de Janeiro, 1994. Disponível em: <<https://www.abntcatalogo.com.br/>>. Acesso em: 30 jan. 2025.
- DINIZ, D. A. *et al.* Monitoramento de vibração para diagnóstico de falhas em máquinas rotativas. **Revista Brasileira de Engenharia de Produção**, v. 36, n. 2, p. 199–210, 2016.
- FONTOURA, F. **Sistemas de detecção de falhas em motores elétricos baseados em análises de vibração: estudo de um motor de indução trifásico**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2018. Acesso em: 31 jan. 2025. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/249184>>.
- GONGORA, W. S. **Uma abordagem neural no diagnóstico de falhas em rolamentos de motores de indução trifásicos**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2013. Disponível em: <<https://riut.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/782>>. Acesso em: 30 jan. 2025.
- GÓNGORA, L. A. Fault detection of induction motors based on stator current analysis for industrial applications. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 63, n. 10, p. 6205–6214, 2016.
- IEC60034-1. **Rotating electrical machines – Part 1: General requirements**. 3rd. ed. Geneva, 2004.
- InfoQ. **As recompensas e os desafios da manutenção preditiva**. 2024. Acesso em: 29 jan. 2025. Disponível em: <<https://www.infoq.com/br/articles/predictive-maintenance-industrial-iot/>>.
- INMAN, D. J. **Engineering Vibration**. 4th. ed. [S.l.]: Pearson, 2014. ISBN 978-0-13-340319-7.
- ISO10816. **ISO 10816: Mechanical vibration – Evaluation of machine vibration by measurements on non-rotating parts**. 2009. Accessed: 2025-01-30. Disponível em: <<https://www.iso.org/standard/41018.html>>.
- NBR10082. **NBR 10082: Vibração mecânica de máquinas – Procedimentos de medição e avaliação de vibração**. 2001. Disponível em: <<https://www.targetnormas.com.br/>>. Acesso em: 30 jan. 2025.
- NBR10273. **NBR 10273:2013 – Análise de Vibrações Mecânicas**. Rio de Janeiro, Brasil: ABNT, 2013. Disponível em: <<https://www.abntcatalogo.com.br/>>.
- OPPENHEIM, A. V.; SCHAFER, R. W. **Discrete-Time Signal Processing**. 3. ed. [S.l.]: Pearson, 2010.
- PIOVESAN, P. **Desmistificando análise de vibração em máquinas**. 2022. <<https://tractian.com/blog/desmistificando-analise-de-vibracao-em-maquinas>>. Acesso em: 31 jan. 2025.
- RANDALL, R. B. **Vibration-based Condition Monitoring: Industrial, Aerospace and Automotive Applications**. Hoboken: John Wiley & Sons, 2011.

- SANTOS, L. M. A. *et al.* A importância da manutenção industrial e seus indicadores. **Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento**, v. 4, n. 11, p. 108–128, 2019. Acesso em: 31 jan. 2025. Disponível em: <<https://www.nucleodoconhecimento.com.br/engenharia-de-producao/manutencao-industrial>>.
- SKF. **Apostila de Curso de Análise de Vibração**. [S.l.], 2004. Disponível em: <<https://www.docsity.com/pt/docs/apostila-de-curso-de-analise-de-vibracao-skf/5122105>>. Acesso em: [coloque a data de acesso].
- TRACTIAN. **Monitoramento e Análise de Vibração**. 2022. <<https://tractian-webpage.s3.amazonaws.com/ebooks/ebook-monitoramento-e-analise-de-vibracao-v-horizontal.pdf>>. Acesso em: 31 jan. 2025.
- WEG. **Guia de Especificação de Motores Elétricos**. 2021. <<https://www.weg.net/institutional/BR/pt/solutions/motors/technical-information>>. Acesso em: 31 jan. 2025.
- WINGS, E. **Foto do módulo acelerômetro GY-61 ADXL335**. 2024. Acesso em: 30 jan. 2025. Disponível em: <<https://www.electronicwings.com>>.

APÊNDICE A – CÓDIGO PARA AQUISIÇÃO DA TAXA DE AMOSTRAGEM

```
#IMPORTANDO BIBLIOTECAS
import matplotlib.pyplot as plt
from scipy.io import wavfile # get the api
import numpy as np

#EXECUTANDO O CODIGO
fs, data = wavfile.read('/content/SINAL 1 (PROXIMO AO EIXO).wav');
length = data.shape[0]/fs
time = np.linspace(0., length, len(data))
plt.title("Posição 3 - DIREÇÃO AXIAL"); #Definindo título
plt.xlabel("Tempo (s)"); #Nome eixo x
plt.ylabel("Amplitude"); #Nome eixo y
plt.plot(time, data[:, 1]); #Plotando grafico
```

APÊNDICE B – TRANSFORMADA DE FOURIER

```

from scipy.fft import fft #fast Fourier Transform
## funcao de fourrier com os paramentos
def fourier(x, t, Hz=False, dB=False, deg=False, Nfft=None):

    if Nfft == None:      ## define o número de pontos caso não seja especificado
        Nfft = len(x)    ##obtem o tamanho do sinal passado para a função

    T = t[1] - t[0]     ## Calcula o periodo

    X_f = fft(x, n=Nfft) ## Calcula a FFT
    X_f = X_f/len(x)    ## corrige amplitude do sinal
    X_f = X_f[:Nfft//2] ## suprime os espelhamentos do sinal na freq
    X_f[1:] = 2*X_f[1:] ## dobra a amplitude das freqs diferente de zero

    if Hz == True:## Define se será em Hz ou rad/s
        f0 = 1/(Nfft*T) ##freq em Hz
        fHz = np.arange(Nfft)*f0 ##freq em Hz
        f = fHz[:Nfft//2]
    else:
        w0 = 2*np.pi/(Nfft*T) ##freq em rad/s
        wRad = np.arange(Nfft)*w0 ##freq em rad/s
        f = wRad[:Nfft//2]

    if dB == True:## Define se será em dB
        mag = 20*np.log10(np.abs(X_f))
    else:
        mag = np.abs(X_f)

    if deg == True:## Define se será em graus ou radianos
        pha = np.angle(X_f, deg=1)
    else:
        pha = np.angle(X_f, deg=0)

    return mag, pha, f

```

APÊNDICE C – CALCULANDO A FFT - TRANSFORMAÇÃO DO SINAL DO DOMÍNIO DO TEMPO PARA O DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA

```
#Calculando a FFT

mag1, pha1, f1 = fourier(data[:, 1], time, Hz=True, dB=False, deg=False, Nfft=None);
mag2, pha2, f2 = fourier(data1[:, 1], time1, Hz=True, dB=False, deg=False, Nfft=None);
mag3, pha3, f3 = fourier(data2[:, 1], time2, Hz=True, dB=False, deg=False, Nfft=None);
mag4, pha4, f4 = fourier(data3[:, 1], time3, Hz=True, dB=False, deg=False, Nfft=None);
mag5, pha5, f5 = fourier(data4[:, 1], time4, Hz=True, dB=False, deg=False, Nfft=None);
mag6, pha6, f6 = fourier(data5[:, 1], time5, Hz=True, dB=False, deg=False, Nfft=None);

plt.figure()
plt.plot(f1, mag1)
plt.title("Posição 3 - DIREÇÃO AXIAL") #Definindo título
plt.xlabel("Frequencia Hz") #Nome eixo x
plt.ylabel("Magnitude") #Nome eixo y
plt.xlim(0, 130)
plt.ylim(0, 30)
```