



UNIVERSIDADE FEDERAL DO OESTE DA BAHIA  
Centro Multidisciplinar de Bom Jesus da Lapa  
Colegiado do Curso de Engenharia Elétrica

LUCAS BARBOZA AMORIM

# **DETECÇÃO DE FALHAS EM MÁQUINAS DE INDUÇÃO TRIFÁSICAS USANDO ANÁLISE DE VIBRAÇÃO**

Bom Jesus da Lapa–BA  
Dezembro de 2025

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO OESTE DA BAHIA**  
Centro Multidisciplinar de Bom Jesus da Lapa  
Colegiado do Curso de Engenharia Elétrica

Lucas Barboza Amorim

**DETECÇÃO DE FALHAS EM MÁQUINAS DE INDUÇÃO  
TRIFÁSICAS USANDO ANÁLISE DE VIBRAÇÃO**

*Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Colegiado do Curso de Engenharia Elétrica do Centro Multidisciplinar de Bom Jesus da Lapa da Universidade Federal do Oeste da Bahia, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.*

Orientador: Prof. Dr. Manoel Messias Silva Júnior

Bom Jesus da Lapa-BA  
Dezembro de 2025

# **FOLHA DE APROVAÇÃO**

**LUCAS BARBOZA AMORIM**

## **DETECÇÃO DE FALHAS EM MÁQUINAS DE INDUÇÃO TRIFÁSICAS USANDO ANÁLISE DE VIBRAÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso foi aprovada como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica, aprovada em sua forma final pelo Colegiado do Curso de Engenharia Elétrica do Centro Multidisciplinar de Bom Jesus da Lapa da Universidade Federal do Oeste da Bahia.

Bom Jesus da Lapa, 17 de Dezembro de 2025

---

Prof. Dr. Manoel Messias Silva Júnior (UFOB)  
(Orientador)

---

Prof. Elias Guimarães Miranda Barbosa da Silva (UFOB)

---

Prof. Me. Anderson Damacena Santos (UFOB)

## FICHA CATALOGRÁFICA

---

A524

Amorim, Lucas Barboza

Detecção de falhas em máquinas de indução trifásicas usando análise de vibração. / Lucas Barboza Amorim. – 2025.

77f.: il.

Orientador: Prof. Dr. Manoel Messias Silva Junior

TCC - Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Oeste da Bahia. Centro Multidisciplinar de Bom Jesus da Lapa - BA, 2025.

1. Motores de indução trifásicos. 2. Engenharia Elétrica. I. Silva Junior, Manoel Messias. II. Universidade Federal do Oeste da Bahia – Centro Multidisciplinar de Bom Jesus da Lapa - BA. III. Título.

CDD 621.46

---

**Biblioteca Universitária de Bom Jesus da Lapa – UFOB**

---

# Agradecimentos

A realização deste trabalho e a conclusão de uma etapa da minha graduação em Engenharia Elétrica são frutos não apenas do meu esforço individual, mas também do apoio de pessoas que estiveram ao meu lado em cada etapa desta jornada.

Em primeiro lugar, aos meus pais, pelo amor, sacrifício e incentivo diário que sempre me proporcionaram. Sua confiança no meu potencial foi essencial permitindo que enfrente-se os desafios acadêmicos e pessoais ao longo desses anos. Se hoje chego a este grande momento, é porque vocês me ensinaram a persistir, mesmo quando os obstáculos pareciam que não fossem possível alcançá-los.

Aos meus amigos, companheiro de estudo e de vida, que por sua vez compartilharam comigo as noites em claros de estudo, os momentos de desânimo e as conquistas. Vocês foram minha rede de apoio nos períodos mais difíceis e tornaram essa trajetória mais leve e com valor significativo.

A todos os professores e orientadores, especialmente ao Prof. Dr. Manoel Messias Silva Júnior, pela orientação técnica, paciência e dedicação ao longo do desenvolvimento deste trabalho. Seus ensinamentos foram fundamentais para alcançar a minha formação profissional e acadêmica.

À Universidade Federal do Oeste da Bahia (UFOB) e ao Colegiado de Engenharia Elétrica, por proporcionarem toda a sua estrutura disponível e ao conhecimento que moldaram durante todo esse período de graduação.

Aos colegas de laboratório e pesquisa, que contribuíram com discussões enriquecedoras e colaboraram direta ou indiretamente para este projeto.

Por fim, a todos que de alguma forma, cruzaram meu caminho e me inspiraram a seguir em frente. Esta conquista não é só minha, mas de cada pessoa que acreditou em mim e me ajudou a chegar até aqui.

**MUITO OBRIGADO!**

---

## Resumo

Este trabalho propõe o desenvolvimento de um sistema de baixo custo para detecção de falhas em Motores de Indução Trifásicos (MITs) por meio de análise de vibração, visando aplicações de manutenção preditiva em ambientes industriais. O sistema integra a aquisição de dados com o sensor MPU-6050 (acelerômetro e giroscópio de 6 eixos), processamento de sinais via Transformada Rápida de Fourier (FFT) e uma interface gráfica web para monitoramento em tempo real. A metodologia incluiu a montagem experimental com um MIT de 1730 RPM, coleta de dados em condições normais e com falha simulada (falta de fase), e implementação de um protótipo baseado no microcontrolador Raspberry Pi Pico W, que atua como servidor HTTP. Os dados são armazenados em cartão SD no formato CSV e visualizados em um dashboard HTML acessível via navegador. Os resultados finais indicaram a capacidade do sistema em capturar assinaturas vibratórias distintas entre condições normal e defeituosa, com aumento significativo da amplitude no domínio do tempo e aparecimento de componentes espectrais características no domínio da frequência. Contudo, limitações relacionadas à aquisição e ruídos ambientais no posicionamento do sensor sugerem a necessidade de aprimoramentos metodológicos para consolidação do diagnóstico. Conclui-se que a abordagem é viável e economicamente acessível, podendo contribuir para a confiabilidade operacional de máquinas elétricas. Como trabalhos futuros, sugere-se a integração de protocolos de comunicação MQTT, melhoria no sistema de aquisição, expansão das condições de falha testadas e implementação de algoritmos de aprendizado de máquina para classificação automática de defeitos.

**Palavras-chave:** Motores de Indução Trifásicos (MIT), Análise de Vibração, Transformada Rápida de Fourier (FFT), Manutenção Preditiva, Monitoramento em Tempo Real, Raspberry Pi Pico W, Sensor MPU-6050, Detecção de Falhas, Interface Gráfica Web, Sistema Embarcado.

---

## Abstract

This work proposes the development of a low-cost system for fault detection in Three-Phase Induction Motors (TIMs) through vibration analysis, enabling predictive maintenance applications in industrial environments. The system integrates data acquisition with the MPU-6050 sensor (accelerometer and 6-axis gyroscope), signal processing via Fast Fourier Transform (FFT), and a web-based graphical interface for real-time monitoring. The methodology included experimental setup with a 1730 RPM TIM, data collection under normal conditions and with simulated fault (phase failure), and implementation of a prototype based on the Raspberry Pi Pico W microcontroller, which acts as an HTTP server. The data is stored on an SD card in CSV format and visualized on an HTML dashboard accessible via a browser. The final results indicated the system's ability to capture distinct vibrational signatures between normal and faulty conditions, with a significant increase in amplitude in the time domain and the appearance of characteristic spectral components in the frequency domain. However, limitations related to acquisition and environmental noise suggest the need for methodological improvements to consolidate the diagnosis. It is concluded that the approach is feasible and economically accessible, and can contribute to the operational reliability of electrical machines. As future work, the integration of MQTT communication protocols, expansion of the tested fault conditions, and improvement of machine learning algorithms for automatic fault classification are suggested.

**Keywords:** Three-Phase Induction Motors (TIM), Vibration Analysis, Fast Fourier Transform (FFT), Predictive Maintenance, Real-Time Monitoring, Raspberry Pi Pico W, MPU-6050 Sensor, Fault Detection, Web Graphical Interface, Embedded System..

---

---

## Lista de Figuras

1	Participação setorial do consumo de energia elétrica . . . . .	16
2	Diagrama das etapas procedimentais adotado neste trabalho . . . . .	18
3	Classificação de máquinas elétricas Corrente Alternada (CA) . . . . .	23
4	Esquemático de um rotor gaiola de esquilo . . . . .	24
5	Rotor bobinado de um motor de indução . . . . .	25
6	Estator de um motor de indução . . . . .	25
7	Vista explodida de um motor de indução . . . . .	26
8	Produção de conjugado induzido em um motor de indução . . . . .	27
9	Circuito equivalente do motor de indução . . . . .	29
10	Diagrama de fluxo de potência do motor de indução . . . . .	29
11	Classificação de falhas mais frequentes em <i>Motor de Indução Trifásico</i> (MIT)'s . . . . .	30
12	Ilustração dos parâmetros de vibração . . . . .	33
13	Diferentes amplitudes do sinal . . . . .	35
14	Aspectos construtivo do acelerômetro piezoelétrico . . . . .	35
15	Níveis de alerta e críticos de vibração - <i>International Organization for Stan-</i> <i>dardization</i> (ISO) 10816-3 . . . . .	37
16	Níveis de vibração . . . . .	37
17	Posições recomendadas para sensores de vibração em mancais, de acordo com a norma ISO 10816-1 . . . . .	38
18	Espectro típico de desbalanceamento de forças . . . . .	38
19	Espectro típico de desbalanceamento de acoplamento . . . . .	39
20	Espectro típico de desbalanceamento do rotor em balanço . . . . .	39
21	Espectro típico rotor excêntrico . . . . .	40
22	Espectro típico do eixo arqueado . . . . .	41
23	Espectro típico de desalinhamento angular . . . . .	41
24	Espectro típico de desalinhamento paralelo . . . . .	41

25	Espectro típico do rolamento . . . . .	42
26	Espectro típico de ressonância . . . . .	43
27	Espectro típico de folga mecânica tipo A . . . . .	43
28	Espectro típico de folga mecânica tipo B . . . . .	44
29	Espectro típico de folga mecânica tipo C . . . . .	44
30	Espectro típico de roçamento do rotor . . . . .	45
31	Espectro típico de rolamento - estágio 1 . . . . .	45
32	Espectro típico de rolamento - estágio 2 . . . . .	46
33	Espectro típico de rolamento - estágio 3 . . . . .	46
34	Espectro típico de rolamento - estágio 3 . . . . .	47
35	Espectro típico de excentricidade do estator . . . . .	47
36	Espectro típico de problema de fase . . . . .	48
37	Representação de sinais tanto no domínio do tempo, quanto na frequência.	51
38	Espectro de um sinal de vibração no domínio da frequência. . . . .	51
39	Diagrama geral do sistema proposto. . . . .	54
40	Circuito de aquisição de sinais. . . . .	55
41	Placa de desenvolvimento Raspberry Pi Pico W. . . . .	55
42	Pinagem da placa <i>Raspberry Pi Pico W</i> . . . . .	56
43	Chip MPU-6050 . . . . .	57
44	Módulo GY-521 . . . . .	57
45	Pinagem do Acelerômetro e Giroscópio 3 Eixos MPU-6050 (GY-521) . . . .	58
46	Chip do microcontrolador RP2040 . . . . .	59
47	Módulo de cartão para SD . . . . .	60
48	Fluxograma do processo . . . . .	63
49	Representação no domínio do tempo do sinal de vibração - operação normal do MIT . . . . .	67
50	Espectro de frequência do sinal de vibração - operação normal do MIT . .	67
51	Representação no domínio do tempo do sinal de vibração com presença de falha no MIT . . . . .	68
52	Espectro de frequência do sinal de vibração - com presença de falha no MIT	68
53	Monitor de vibrações . . . . .	69

---

## Lista de Tabelas

1	Especificações técnicas do motor de indução trifásico . . . . .	53
---	---	----

---

## Lista de quadros

1	Vantagens e Desvantagens dos Sensores Acelerômetros Piezoelétricos . . . .	36
2	Especificações do Raspberry Pi Pico W . . . . .	56
3	Especificações do módulo MPU-6050 (GY-521) . . . . .	58
4	Principais especificações do microcontrolador RP2040 . . . . .	60
5	Comparativo entre plataformas de desenvolvimento para Raspberry Pi Pico W . . . . .	61
6	Parâmetros do sistema de aquisição de dados . . . . .	62
7	Classificação dos dados . . . . .	62
8	Comparativo entre STM32, Raspberry Pi Pico W e ESP32 - Parte 1/2 . .	66
9	Comparativo entre STM32, Raspberry Pi Pico W e ESP32 - Parte 2/2 . .	66

---

## Lista de abreviaturas, acrônimos e siglas

<b>AV</b>	Análise de Vibração
<b>BEN</b>	Balanco Energético Nacional
<b>CC</b>	Corrente Contínua
<b>CA</b>	Corrente Alternada
<b>CG</b>	Centro de gravidade
<b>CSV</b>	Comma-Separated Values
<b>DFT</b>	<i>Discrete Fourier Transform</i>
<b>FFT</b>	<i>Fast Fourier Transform</i>
<b>DOF</b>	<i>Degrees of Freedom</i>
<b>DHCP</b>	<i>Dynamic Host Configuration Protocol</i>
<b>FT</b>	Fourier Transform
<b>STFT</b>	Short-Time Fourier Transform
<b>GB</b>	Gigabytes
<b>Hz</b>	<i>Hertz</i>
<b>HTML</b>	<i>HyperText Markup Language</i>
<b>HTTP</b>	<i>Hypertext Transfer Protocol</i>
<b>IA</b>	<i>Artificial Inteligence</i>
<b>IoT</b>	<i>Internet of Things</i>
<b>IEEE</b>	<i>Institute of Electrical and Electronic Engineers</i>
<b>ISO</b>	<i>International Organization for Standardization</i>
<b>IB</b>	Inboard
<b>MIT</b>	<i>Motor de Indução Trifásico</i>
<b>MEMS</b>	<i>Micro-Electro-Mechanical</i>
<b>MATLAB</b>	<i>Matrix Laboratory</i>
<b>OB</b>	Outboard
<b>RNA</b>	<i>Artificial Neural Network</i>
<b>RMS</b>	<i>Root Mean Square</i>
<b>SI</b>	<i>Sistema Internacional de Unidades</i>

---

## Lista de Símbolos

$n_s$	Velocidade síncrona
$n_m$	Velocidade do motor
$e_{ind}$	Tensão induzida no rotor
$T_{ind}$	Conjugado induzido
$P$	Número de polos
$s$	Escorregamento do rotor
<b>ds</b>	Unidade diferencial de superfície
<b>E</b>	Campo elétrico
<b>B</b>	Densidade de fluxo magnético
$B_s$	Campo magnético girante
$B_R$	Campo magnético do rotor
$B_{lq}$	Campo magnético líquido
<b>da</b>	Unidade diferencial de área
$\phi_1$	Fase inicial da senoide
$j$	Unidade imaginária do plano complexo
$N$	Número de Amostras
$x(n)$	Variável de Entrada de um sistema no domínio discreto
$n$	n-ésimo valor do sinal discreto
$X(e^{j\omega})$	Espectro da Transformada de Fourier de Tempo Discreto (DTFT)
$X(k)$	Espectro da Transformada Discreta de Fourier (DFT)
$k$	k-ésimo Valor Coeficiente da Transformada
$T$	Intervalo de Tempo
$x(t)$	Variável em Função do Tempo

$dt$	Elemento de Tempo Infinitesimal
$\frac{d}{dt}$	Derivada em Relação ao tempo
$\frac{dx}{dt}$	Derivada do deslocamento em relação ao tempo
$\frac{dv}{dt}$	Derivada da velocidade em relação ao tempo
$ds$	Elemento de Comprimento do Caminho de Integração
$m/s^2$	Unidade de Medida para Aceleração
$m/s$	Unidade de Medida para Velocidade
$\mu m$	Unidade para Taxa de Mudança da Posição
$f_e$	Frequência elétrica de alimentação
$K_b$	Número Inteiro Positivo
$s$	Escorregamento
$f_r$	Velocidade de Frequência do Rotor
$P$	Par de Polos
$n_ws$	Categoria de Excentricidade
$R$	Barras do Rotor
$ms$	Milissegundo
$v$	Velocidade
$a$	Aceleração
$\omega$	frequência angular
$F_L$	Frequência da linha
$g$	Aceleração da gravidade

---

---

# Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>15</b>
1.1	Objetivos . . . . .	17
1.1.1	Objetivos Específicos . . . . .	17
1.2	Metodologia de Desenvolvimento do Trabalho . . . . .	17
1.3	Organização do Texto . . . . .	18
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>19</b>
<b>3</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>23</b>
3.1	Máquinas de Indução Trifásicas MITs . . . . .	23
3.2	Princípios básicos de funcionamento do MIT . . . . .	26
3.3	Classificação de falhas em MIT's . . . . .	30
3.3.1	Métodos de análise preditivas . . . . .	31
3.3.2	Método da análise de vibração . . . . .	32
3.3.3	Sistemas de instrumentação para manutenção baseada em medida de vibração . . . . .	48
3.4	Protocolo de comunicação HTTP . . . . .	52
<b>4</b>	<b>METODOLOGIA</b>	<b>53</b>
4.1	Sistema Proposto . . . . .	53
4.1.1	Levantamento dos Materiais . . . . .	54
4.2	Plataformas de desenvolvimento . . . . .	61
4.2.1	Coleta de dados . . . . .	61
4.3	Interface gráfica . . . . .	63
<b>5</b>	<b>RESULTADOS EXPERIMENTAIS</b>	<b>65</b>
5.1	Comparativo entre dispositivos microcontroladores . . . . .	65
5.2	Avaliação das assinaturas medidas de vibração . . . . .	66

5.3 Avaliação da interface gráfica . . . . .	69
<b>6 CONCLUSÃO</b>	<b>70</b>
<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>75</b>

---

## INTRODUÇÃO

Os motores elétricos ocupam uma posição de destaque nas plantas industriais devido a seus altos rendimentos, caracterizado pela capacidade de transformar a energia elétrica recebida em trabalho útil de forma eficiente, com mínimas perdas possíveis. Embora existam diferentes classificações de motores elétricos, dois tipos principais se sobressaem, tal qual, motores de Corrente Contínua (CC) e motores de Corrente Alternada (CA).

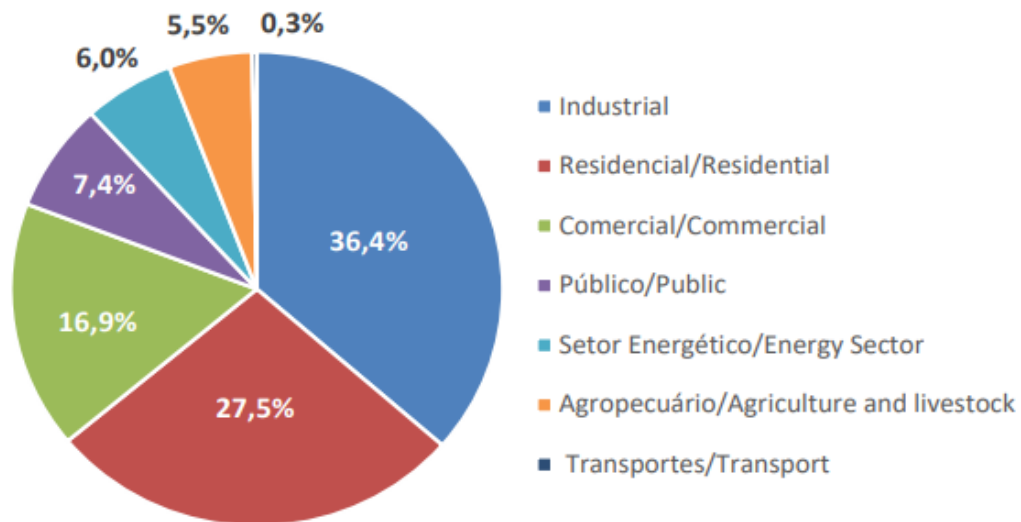
Os motores CC, apesar de seu alto custo e necessidade de fontes específicas, oferecem controle de velocidade com grande precisão e flexibilidade, sendo destinados a aplicações especiais que justificam o investimento elevado. Já os motores CA são predominantemente no mercado industrial, especialmente os motores assíncronos ou de indução, devido a sua simplicidade, durabilidade e custo acessível, além disso, possibilita o controle de velocidade por meio de inversores de frequência modernos. O motor síncrono opera com velocidade constante e é comumente usado em aplicações de alta potência (CHAPMAN, 2013).

Entre os diversos tipos disponíveis, o Motor de Indução Trifásico (MIT) é o mais utilizado em razão do seu baixo custo, construção robusta e versatilidade para diversas aplicações, como em transportes, bombeamento, ventilação e produção (WEG, 2023). Essas características permitem que eles desempenhem suas funções de forma eficiente, proporcionando a produtividade e a confiabilidade dos processos industriais.

Muitas dessas aplicações em suas empresas operam com sistemas de produção contínua, nos quais a falha de um motor pode interromper toda a linha de produção. Essa situação pode acarretar prejuízos financeiros significativos, até que o motor avariado seja reparado ou substituído, processo que, a depender do tipo de motor, pode envolver custos elevados.

Com base nos dados do Balanço Energético Nacional (BEN), o setor industrial é responsável por um consumo significativo de energia elétrica, utilizando 36,4% do total gerado no país, conforme a Figura 1. Dentro desse contexto, os motores elétricos são particularmente relevantes, representando em média 70% do consumo energético industrial dentro de seus processos (CARTILHA, 2017).

**Figura 1** – Participação setorial do consumo de energia elétrica



Fonte: BEN(2024)

Ainda na Figura 1, evidencia a distribuição energética entre os diferentes setores econômicos, destacando a ascendência da indústria. Como os motores elétricos são os principais consumidores de energia dentro do setor, tornam-se elementos essenciais, cuja performance e manutenção impactam diretamente a produtividade e eficiência operacional das empresas (OLIVEIRA et al., 2020). Nesse sentido, a identificação de falhas e a correção adequada de problemas relacionados à manutenção com técnicas preditivas torna-se ações essenciais (BULGARELLI, 2006). Tais medidas não apenas aumentam os níveis de confiabilidade dos sistemas industriais, mas também contribuem para a redução de custos operacionais e ampliação dos lucros, reforçando a relevância de práticas eficazes de gestão e monitoramento automatizado dos motores elétricos em um contexto industrial altamente dependente de sua funcionalidade. Nessa perspectiva, a análise de vibração torna-se necessário para análise de qualquer equipamento rotativo, isto é, é essencial para detectar falhas mecânicas e entender a causa de outros defeitos capazes de parar a produção (PIOVESAN, 2025).

Esse trabalho tem como finalidade utilizar análises de vibrações emitidos pelo (MIT) com a utilização de sensores adequados para aquisição de dados para coleta dos sinais de vibração. Utilizar técnicas de processamento de sinal por meio da *Discrete*

*Fourier Transform* (DFT) e a implementação do algoritmo da *Fast Fourier Transform* (*Fast Fourier Transform* (FFT)) para tratar dados brutos e transformá-los em informações compreensíveis. Com essas informações é possível identificar padrões ou anomalias específicas, tais como, desalinhamento, desbalanceamento, falhas em rolamentos, folgas e problemas elétricos. Também será obtido uma interpretação dos resultados com base em diagnósticos possibilitando intervenções direcionadas e eficientes.

## 1.1 Objetivos

Desenvolver um sistema de aquisição de dados, processamento e diagnóstico de falhas em máquinas elétricas, que viabilize o monitoramento em setores industriais.

### 1.1.1 Objetivos Específicos

1. Realizar a aquisição do conjunto dos dados;
2. Desenvolver e implementar o algoritmo da Transformada Rápida de Fourier (FFT) para tratamento dos sinais de vibração;
3. Avaliar o espectro dos sinais obtidos;
4. Realizar o diagnóstico do estado do motor.

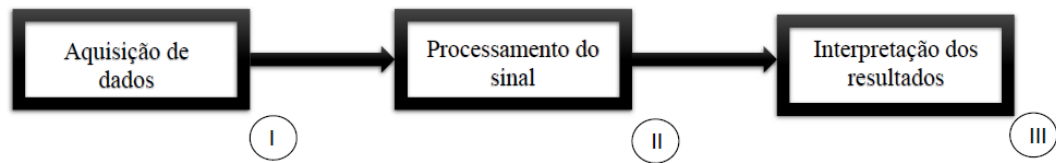
## 1.2 Metodologia de Desenvolvimento do Trabalho

Neste trabalho, será aplicado o algoritmo da Transformada Rápida de Fourier FFT com o objetivo de realizar o processamento e a análise dos sinais elétricos obtidos de um sistema especializado no monitoramento e coleta de dados referentes às vibrações do MIT's. Esse processo contribuirá para uma interpretação mais precisa das informações registradas, proporcionando a identificação de padrões ou anomalias no funcionamento da máquina. Diante do exposto, as etapas procedimentais, que detalham as ações ao longo do seu desenvolvimento, estão apresentadas na Figura 2. Essas etapas serão apresentadas e discutidas de forma sequencial, com o intuito de oferecer uma visão clara e objetiva do método adotado.

Conforme a Figura 2, o seu desenvolvimento é subdividido sequencialmente nas seguintes etapas:

- I. Nessa etapa inicial, será realizado a sistematização e o agrupamento das informações coletadas por meio de mecanismos de aquisição de dados. Isso assegurará que as

**Figura 2** – Diagrama das etapas procedimentais adotado neste trabalho



Fonte: Autoria própria

análises posteriores tornem-se mais fáceis e que todos os dados relevantes sejam devidamente integrados e preparados para as próximas etapas do trabalho;

- II. Na etapa seguinte, será efetuado o processamento de sinal fazendo o uso de aplicações do algoritmo da Transformada Rápida de Fourier (FFT) com o objetivo de analisar em detalhes os espectros dos sinais de vibrações. Este processamento permitirá a identificação e a caracterização das frequências presentes nos sinais, proporcionando uma visão clara sobre seus componentes espectrais e uma boa base para interpretações mais profundas;
- III. Na última etapa, é elaborado as interpretações dos resultados mediante diagnósticos obtidos das etapas anteriores.

## 1.3 Organização do Texto

**Capítulo 2** - É apresentada uma revisão bibliográfica abordando o tema, destacando as principais referências utilizadas no desenvolvimento deste trabalho

**Capítulo 3** - É exibida a fundamentação teórica do trabalho, na qual são abordados os conceitos e definições dos motores de indução trifásicos, processamento de sinais, bem como os fundamentos da *Fast Fourier Transform* (FFT).

**Capítulo 4** - Neste capítulo, é abordada a metodologia que será aplicada no trabalho, apresentando as ferramentas e procedimentos utilizados para a implementação e verificação do projeto.

**Capítulo 5** - Expõe os resultados parciais obtidos.

**Capítulo 6** - Expõe as considerações finais do trabalho.

---

## REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os motores de indução são amplamente reconhecidos como componentes essenciais nos sistemas industriais, desempenhando funções cruciais na automação e na otimização de processos produtivos. Por conta dessa importância, faz-se necessário implementar estratégias que promovam maior confiabilidade e eficiência operacional dessas máquinas. Entre essas estratégias, alguns estudos destacam-se o monitoramento do espectro de frequência do sinal, que têm evoluído como umas das ferramentas mais eficazes para detecção de falhas. Este avanço foi impulsionado pelo desenvolvimento de técnicas mais sofisticadas e pela melhoria na instrumentação utilizada para análise espectral. Adiante, serão apresentadas algumas das principais revisões bibliográficas que embasaram o desenvolvimento deste trabalho.

No trabalho de Ciabattini et al. (2017), apresentaram uma análise espectral estatística que garante diagnósticos robustos em diferentes condições. As amplitudes dos sinais de vibração são classificadas e transformadas em imagens espectrais estatísticas, utilizando a função de distribuição cumulativa empírica para informações precisas da amplitude. Métricas estatísticas simples permitem diagnósticos eficazes sem necessidade de treinamento de classificadores, reduzindo custos e tempo. Testes realizados com benchmarks de dados de vibração evidenciaram resultados promissores em comparação com métodos modernos de diagnósticos de falhas.

Em consonância com Kumar et al. (2018), componentes mecânicos rotativos, como rolamentos, engrenagens e correias de transmissão, são essenciais em máquinas industriais, e suas falhas podem gerar paralisações e perdas econômicas significativas. Sendo assim, a análise de vibração se destaca como ferramenta para manutenção preditiva, permitindo detectar mudanças nos sinais e avaliar a condição da máquina. Métodos de processamento de sinais para diagnósticos de falhas foram explorados neste artigo, além de discutir o uso

---

de *Artificial Intelligence* (IA), como *Artificial Neural Network* (RNA) e conjuntos fuzzy, para aprimorar a detecção e prever falhas de forma eficiente.

Já no trabalho de Alexakos et al. (2021), apresentaram que falhas em mancais de rolamento são comuns em máquinas elétricas rotativas, exigindo diagnósticos eficazes. Este estudo propôs o uso da Short-Time Fourier Transform (STFT) para pré-processar dados e gerar imagens de vibração em condições variadas. Um transformador de classificação de imagens é utilizado para diagnosticar e classificar as imagens de vibração (processamento de linguagem natural), adaptado como alternativa às Redes Neurais Convolucionais, mostrou alta eficácia, com 98,3% de precisão em testes benchmark, utilizando menos recursos computacionais.

O estudo feito por Shabbir et al. (2021), expôs que em sistemas de energia moderna, a predominância de cargas indutivas resulta em baixo fatores de potência, afetando a capacidade dos sistema e os níveis de tensão. Desta forma, esse artigo apresentou uma solução híbrida combinando a Fourier Transform (FT) e Transformada Wavelet, para diagnosticar falhas de motores em sistemas de ventilação alimentados por conversores de frequência. Após a remoção de ruídos com a Transformada Wavelet, a FT analisa componentes fundamentais, harmônicos e ruídos suprimidos. Tal análise revela que ruídos gerados pelos circuitos de comutação rápida do conversor de frequência são responsáveis por falhas no motor.

Segundo Ghazali e Rahiman (2021), a análise de vibração se consolidou como uma ferramenta eficaz para monitorar a condição e o desempenho das máquinas, permitindo identificar a fonte e a gravidade das falhas, além de fornecer alertas para manutenção programada. O manuscrito apresentou uma revisão sistemática sobre análise de vibração para monitoramento e diagnóstico de máquinas, abordando aquisição de dados, extração de características e técnicas de reconhecimento falhas baseadas em IA. Avanços futuros incluem a aplicação de aprendizado profundo para extração automática de características de falhas e a integração de sensores em máquinas inteligentes, que trazem novos desafios para o diagnóstico de vibrações.

Um protótipo *Internet of Things* (IoT) proposto por Martins et al. (2021), foram projetados para identificar e prever falhas combinadas em máquinas rotativas de forma não invasiva, possui um sistema embarcado que é capaz de classificar quatro condições operacionais: normal, desbalanceada, desbalanceada com desalinhamento horizontal e desbalanceada com desalinhamento vertical. Sua metodologia combina uma bancada de simulações e medições controladas, com a aplicação de aprendizado de máquina para classificação, utilizando máquinas de vetores suporte, k-vizinhos mais próximos e florestas aleatórias.

Conforme Kafeel et al. (2021), a detecção precoce de falhas é essencial na manu-

tenção preventiva industrial, prevenindo paradas inesperadas, garantindo a segurança e a confiabilidade dos equipamentos. Para as máquinas rotativas, o espectro de vibração é uma fonte chave de informações. Este estudo propôs um sistema baseado na análise de sinais tridimensionais de vibração representando o estado de condições operacionais dos motores de indução utilizando a decomposição de modo empírico para redução de ruídos e extração de características temporais e espectrais.

Zwanenburg et al. (2021) exibiu um método econômico e eficiente para detecção de falhas em motores de indução, combinando aprendizado de máquina com FFT. Os sinais brutos são convertidos para o domínio da frequência, em que os coeficientes de energia são usados como recursos para aprendizado de máquina. Validado com dados reais, o método atingiu 99,7% de precisão na detecção de falhas e 100% na classificação, permitindo otimizar riscos e custos de manutenção.

De acordo com Altaf et al. (2022), na abordagem de manutenção baseada em condições, diversas técnicas avançadas de processamento de sinais são implementadas com o objetivo de identificar falhas por meio de sinais de vibração e emissão acústica captadas do maquinário. Essas técnicas abrangem análises nos domínios do tempo, frequência e tempo-frequência, permitindo uma avaliação detalhada dos sinais coletados. Neste estudo, as características estatísticas dos sinais de vibração no domínio do tempo e da frequência foram explorados para aprimorar a detecção e localização de falhas específicas em rolamentos de rolos.

Já no estudo do artigo Wang et al. (2022), produziram um integrador digital com *Fast Fourier Transform* (FFT) e filtragem, para obter sinais de velocidade e deslocamento. Técnicas como espectro de envoltória, frequência instantânea e Cepstrum (é o valor absoluto da transformada inversa de Fourier do logaritmo da magnitude da transformada de Fourier de uma sequência) são usadas para análises avançadas. Assim, um algoritmo de prognóstico de falhas foi implementado em um sistema embarcado Raspberry Pi, visualizando sinais em tempo real e estatísticas. Este trabalho foi validado em uma empresa de água, o sistema demonstrou eficácia em diagnóstico e monitoramento.

No artigo de Chu et al. (2024), apresentaram uma aplicação promissora que é a detecção de falhas utilizando a Análise de Vibração (AV) em bombas submersíveis elétricas, especialmente vulneráveis no fundo do poço. Estudos mostram que a AV pode prever problemas e identificar causas precocemente, embora desafios como limitações de modelos de dados ainda existam. O avanço na aplicação da AV podem otimizar operações na indústria petrolífera.

Com base no que foi fundamentado nas revisões bibliográficas, fica evidente destacar a relevância da análise espectral na identificação e diagnóstico de falhas no âmbito industrial, pois ela permite detectar padrões anômalos de frequência nos MIT's. Essa

abordagem possibilita a identificação precisa de problemas mecânicos, elétricos e de desgastes físicos, tornando-se um recurso fundamental para estratégias de manutenção preditiva.

Assim, este trabalho tem como objetivo o desenvolvimento e a implementação do algoritmo da FFT, que será utilizado para o processamento e análise dos sinais elétricos e dos dados de vibração provenientes de um sistema de monitoramento dos MIT's.

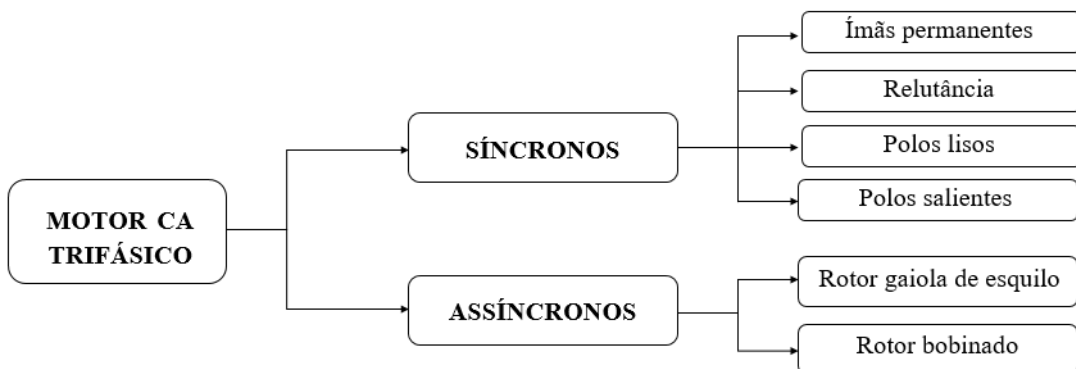
---

## FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 3.1 Máquinas de Indução Trifásicas MITs

As MIT's de CA são classificadas em duas categorias principais: Máquinas síncronas e máquinas assíncronas, também conhecidas como máquinas de indução.

**Figura 3** – Classificação de máquinas elétricas CA



Fonte: Adaptada de (WEG, 2019)

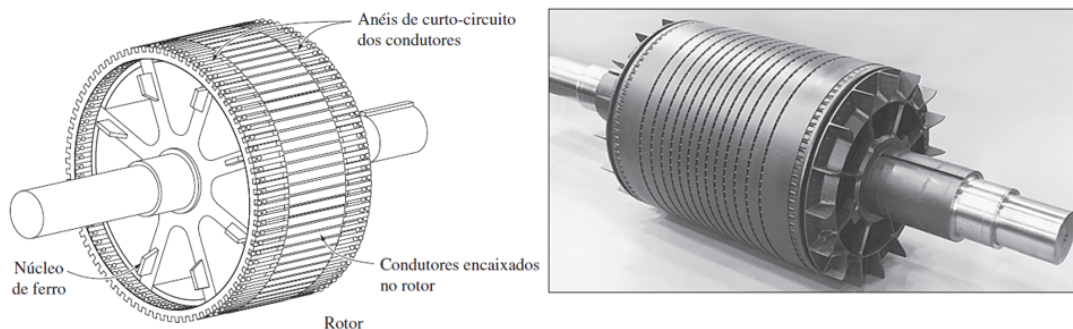
As máquinas síncronas podem operar como geradores ou motores e possuem um sistema de excitação específico, em que a corrente de campo é suprida por uma fonte externa CC independente. Essa característica permite que a velocidade de operação seja rigidamente sincronizada com a frequência da rede elétrica, tornando-se essencial em aplicações que demandam estabilidade e controle de velocidade, como em usinas de geração de energia e sistemas industriais de alta performance.

Por outro lado, as máquinas assíncronas ou de indução também podem ser utili-

zadas como motores ou geradores, mas possuem um princípio de funcionamento distinto das demais. Nelas, a corrente de campo não é fornecida por uma fonte externa, mas sim gerada por indução magnética por meio do fenômeno de ação do transformador nos seus enrolamentos de campo, a partir de uma corrente CA fornecida diretamente ao estator (UMANS, 2014). Isso significa que essas máquinas operam com uma velocidade ligeiramente inferior à frequência da rede elétrica, característica conhecida como escorregamento, tornando-as amplamente utilizadas em aplicações industriais e comerciais devido à sua simplicidade construtiva, robustez e baixo custo de manutenção.

O rotor de um MIT pode ser classificado em dois tipos principais, cada um com características distintas de construção e funcionamento. A Figura 4 consiste em um rotor gaiola de esquilo, em que barras condutoras são embutidas em ranhuras na superfície do rotor, conectadas em curto-circuito por grandes anéis condutores posicionados nas extremidades. Esse tipo de enrolamento é mais utilizado, pois essa configuração elimina a necessidade de componentes como anéis deslizantes e escovas, transformando o motor mais durável e de baixa manutenção (CHAPMAN, 2013).

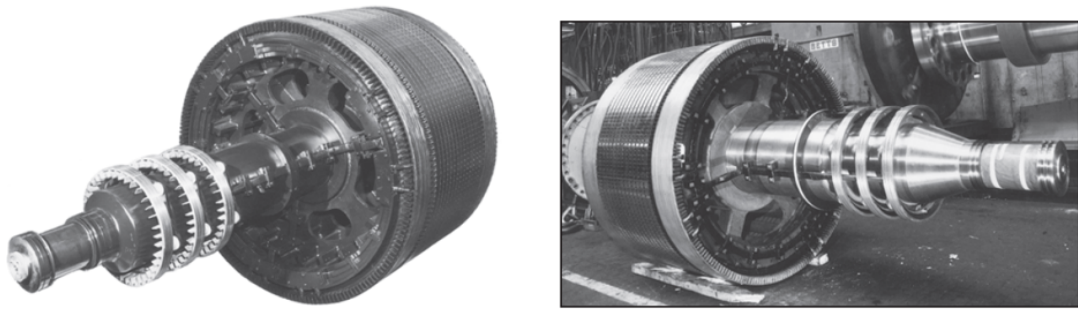
**Figura 4** – Esquemático de um rotor gaiola de esquilo



Fonte: Adaptada de (UMANS, 2014)

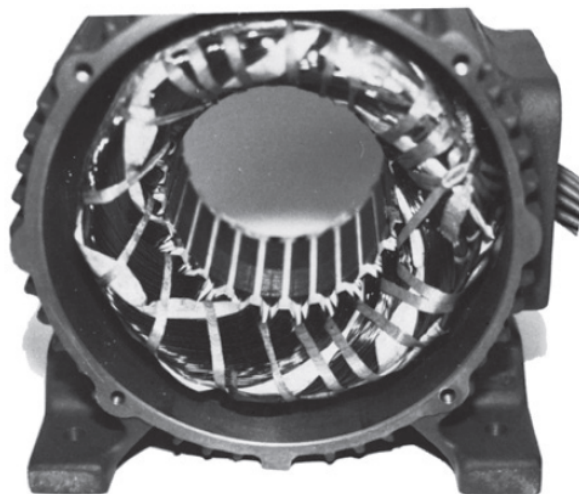
De outro modo, a Figura 5 equivale ao rotor bobinado que em seus aspectos construtivos possui um enrolamento trifásico completo (também chamados de enrolamentos de campo), semelhante ao enrolamento do estator, garantindo melhor controle sobre as características elétricas do motor. Geralmente esses enrolamentos são conectados na configuração em estrela(Y), e suas terminações estão ligadas a anéis deslizantes montados no eixo do rotor. Seus enrolamentos do rotor são colocados em curto-circuito por meio de escovas que se apoiam nos anéis deslizantes. Isso possibilita que as correntes podem ser acessadas por meio das escovas, e conseqüentemente, serem examinadas, assim como viabiliza inserir resistências extras no circuito do rotor possibilitando que sejam feitas ajustes específicos na relação entre conjugado e velocidade do motor (CHAPMAN, 2013).

Os MIT's de rotor bobinado são de custo maiores do que os de gaiola de esquilo, porque exigem mais manutenções devido aos desgastes das suas escovas e anéis deslizantes.

**Figura 5** – Rotor bobinado de um motor de indução

Fonte: Adaptada de (UMANS, 2014)

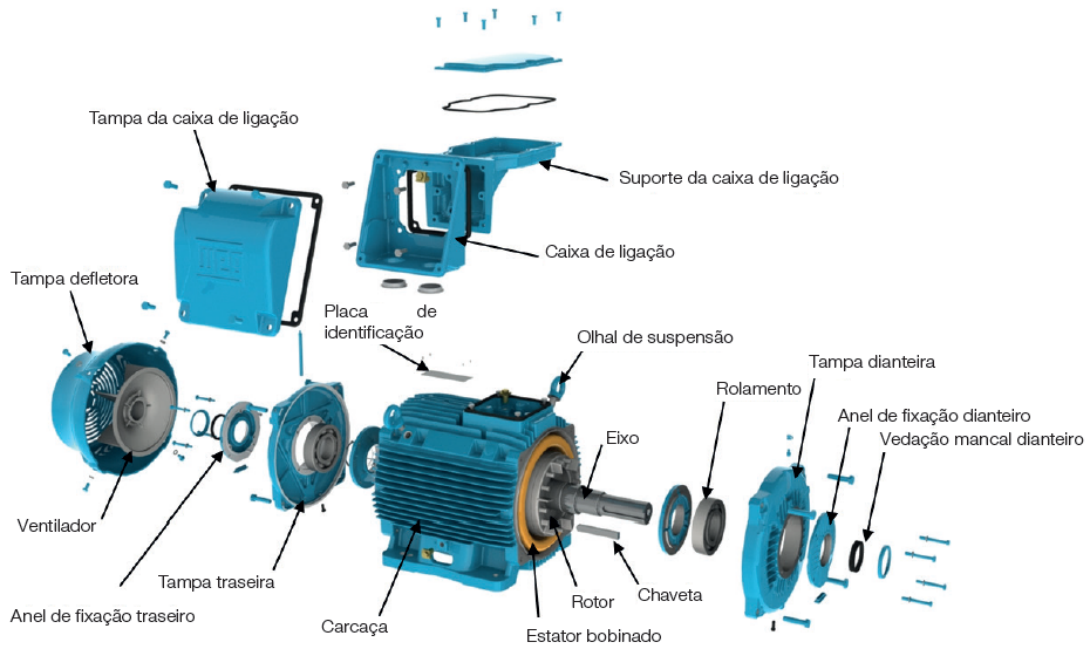
O estator de um MIT é a parte fixa do motor e desempenha um papel fundamental no funcionamento do sistema. A Figura 6 representa o estator que em sua composição possui um núcleo de ferro laminado, projetado para reduzir perdas por correntes parasitas, e compõem enrolamentos trifásicos (também chamados de enrolamentos de armadura) dispostos em ranhuras em torno de sua estrutura.

**Figura 6** – Estator de um motor de indução

Fonte: (UMANS, 2014)

A Figura 7 apresenta os principais aspectos construtivos do MIT's, destacando seus componentes essenciais para o funcionamento eficiente.

Observa-se a presença da carcaça, que protege os componentes internos e fornece suporte estrutural ao motor. O estator, representado na parte externa, é composto por um núcleo laminado em que os enrolamentos trifásicos estão alojados nas ranhuras. Esse conjunto é responsável por criar o campo magnético girante que permite o funcionamento do motor.

**Figura 7** – Vista explodida de um motor de indução

Fonte: (WEG, 2023)

O rotor, localizado no eixo da estrutura, recebe a indução do campo magnético girante gerado pelo estator e transforma a energia elétrica em movimento mecânico, transmitindo a rotação para dispositivos externos.

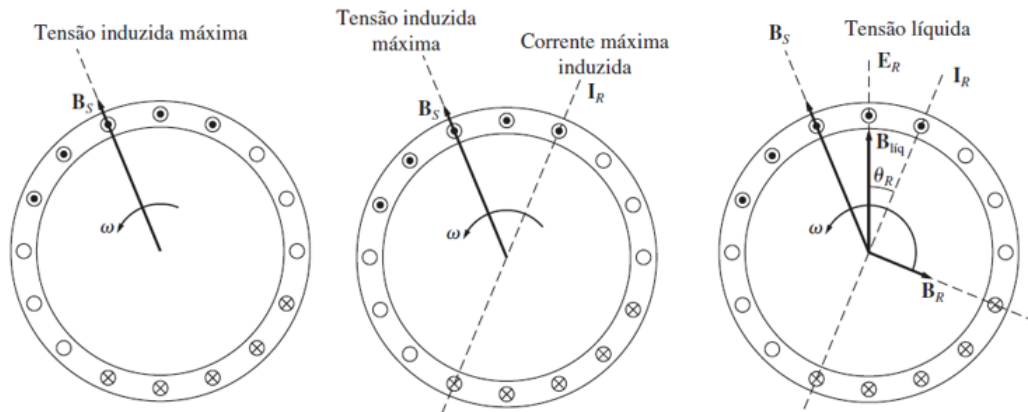
Também são visíveis os rolamentos, que reduzem o atrito e garantem a movimentação suave do eixo. Além disso, mostra ventilação do motor responsável por garantir a circulação de ar, incluindo o ventilador e a tampa defletora, que ajudam na dissipação do calor gerado durante seu funcionamento.

A placa de identificação fornece informações técnicas sobre o equipamento, como potência e tensão nominal de operação. Já a caixa de ligação e seus suportes servem para conectar eletricamente o motor à rede de alimentação.

## 3.2 Princípios básicos de funcionamento do MIT

A Figura 8 demonstra o desenvolvimento de conjugado induzido em um motor de indução com o rotor gaiola de esquilo. Será dado ênfase nesse tipo de motor por ser um dos mais empregados em qualquer aplicação industrial devido a sua construção robusta e simples.

Nesse sistema, um conjunto trifásico de tensões é aplicado aos terminais do enrolamento de armadura localizado no estator, induzindo um conjunto correspondente de

**Figura 8** – Produção de conjugado induzido em um motor de indução

Fonte: Adaptada de (CHAPMAN, 2013)

correntes elétricas que percorrem suas bobinas. E como resultado, forma-se um campo magnético girante ( $B_s$ ) que se desloca no sentido anti-horário e sua velocidade síncrona ( $n_s$ ) de rotação é dado em função da frequência elétrica do sistema ( $f_e$ ) aplicado ao estator dado em Hertz (Hz) e do número de polos da máquina ( $P$ ).

$$n_s = \frac{120f_e}{P} \quad (1)$$

Esse campo girante do estator  $B_s$  induz uma tensão nas barras curto-circuitadas por anéis nas extremidades do rotor dado por:

$$e_{ind} = (v \times B) \cdot l \quad (2)$$

em que,

$v$  = velocidade da barra em relação ao campo magnético;

$B$  = Vetor densidade de fluxo magnético;

$l$  = comprimento do condutor dentro do campo magnético.

Essa tensão induzida produz um fluxo de corrente no rotor que estará atrasada em relação a tensão devido a sua própria indutância, que por sua vez produzirá um campo magnético do rotor ( $B_R$ ). O campo  $B_R$  interage com o campo magnético líquido ( $B_{liq}$ ) produzindo um conjugado induzido no sentido anti-horário na máquina dado por:

$$T_{ind} = k(B_R \times B_s) \quad (3)$$

Nessa situação existe um limite superior finito para o qual a velocidade do motor ( $n_m$ )

possa alcançar até próxima da velocidade síncrona( $n_s$ ), sem nunca alcançá-lo exatamente. Daí surge um termo utilizado para descrever o movimento relativo entre  $n_s$  e  $n_m$  definido como escorregamento e expresso por unidade ou porcentagem (CHAPMAN, 2013):

$$s = \frac{n_s - n_m}{n_s} \quad (4)$$

Conforme a equação (4) podemos obter a velocidade do motor, tal que:

$$n_m = (1 - s)n_s \quad (5)$$

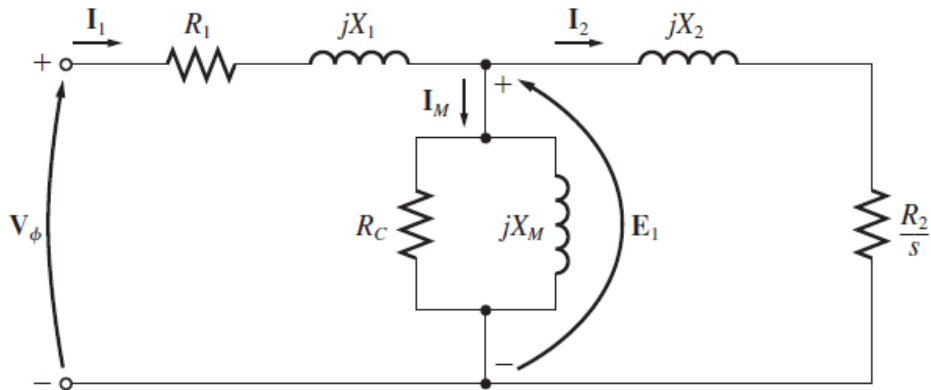
É comum associarmos o motor de indução por meio da ação de transformador pelos princípios de indução eletromagnética, uma vez que, o circuito de armadura no estator pode ser assimilado ao primário e o circuito de campo do rotor assemelha-se ao secundário na Figura 9. No entanto, no motor a frequência da tensão induzida no rotor( $f_r$ ) não necessariamente se mantém a mesma que a frequência elétrica do sistema aplicada ao estator( $f_e$ ).

$$f_r = sf_e \quad (6)$$

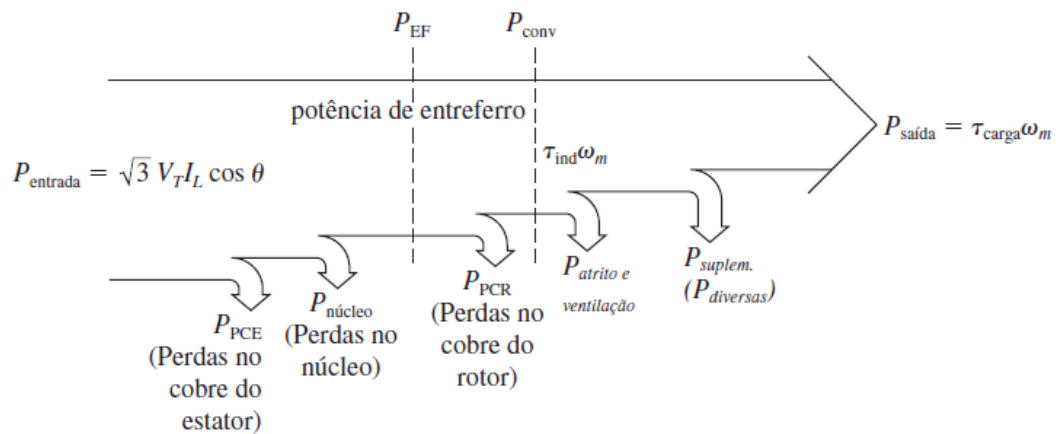
Evidentemente, se o rotor estiver bloqueado, isto é,  $n_m = 0$  e  $s = 1$ , o rotor experimentará a mesma frequência elétrica do estator  $f_r = f_e$ , conhecida como frequência de escorregamento máximo. Da mesma forma que, se o rotor atingir a velocidade síncrona, isto é,  $n_m = n_s$  e  $s = 0$ , não haverá variação de fluxo magnético relativa ao rotor, conseqüentemente,  $f_r = 0$  (CHAPMAN, 2013).

Para obter o circuito equivalente por fase de um motor de indução é fundamental converter os parâmetros do rotor para o lado do estator. Essa conversão é necessária para facilitar a análise e o cálculo do desempenho do motor. O seu modelo equivalente do circuito do rotor referenciado ao estator é ilustrado na Figura 9.

Em um motor de indução, a energia elétrica de entrada é fornecida por um sistema trifásico de tensões e corrente, que por sua vez, gera o campo magnético responsável pelo movimento do rotor. O circuito equivalente visto na Figura 9 é semelhante ao do transformador convencional, no entanto, os enrolamentos do rotor, que correspondem ao secundário, estão permanentemente em curto-circuito. Isso significa que não há saída elétrica direta, como acontece nos transformadores, mas sim uma conversão da energia elétrica em energia mecânica (CHAPMAN, 2013). A eficiência dessa conversão pode ser analisada por meio da relação entre a potência elétrica disponível no entreferro e a potência mecânica entregue na saída do motor, conforme representado no diagrama de fluxo de potência da Figura 10.

**Figura 9** – Circuito equivalente do motor de indução

Fonte: Adaptada de (CHAPMAN, 2013)

**Figura 10** – Diagrama de fluxo de potência do motor de indução

Fonte: Adaptada de (CHAPMAN, 2013)

em que,

$P_{entrada}$  = É a potência elétrica de alimentação nos enrolamentos do estator em função das tensões e correntes trifásicas;

$P_{CE}$  = Perdas nos enrolamentos do estator(ou no cobre do estator);

$P_{núcleo}$  = Perdas como histerese e corrente parasita no estator;

$P_{EF}$  = Perdas transferidas ao rotor da máquina através do entreferro entre o estator e o rotor;

$P_{CR}$  = Perdas nos enrolamentos do rotor (ou no cobre do rotor);

$P_{conv}$  = Potência convertida para a forma mecânica;

$P_{AeV}$  = Perdas por atrito e ventilação;

$P_{suplem.}$  = Perdas suplementares ou diversas;

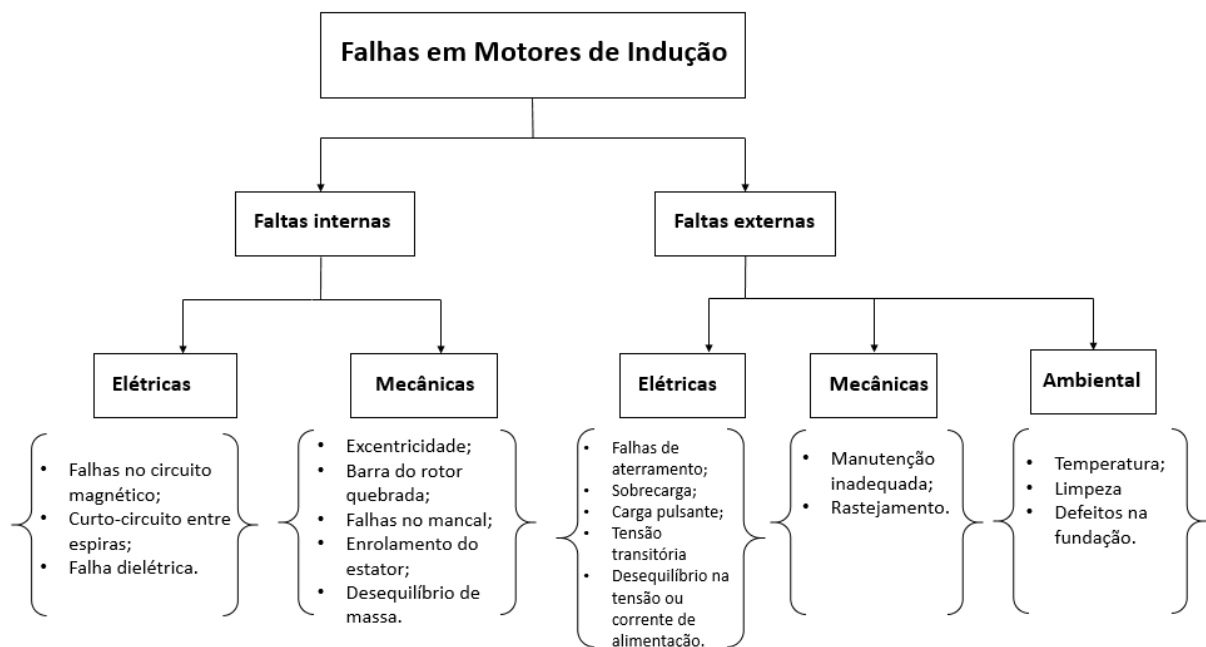
$P_{saída}$  = Potência de saída na ponta do eixo.

Muitas das vezes a potência convertida corresponde a potência de saída na ponta do eixo quando as perdas por atrito e ventilação, e suplementares são desconsideradas ( $P_{conv} = P_{saída}$ ).

### 3.3 Classificação de falhas em MIT's

De acordo com a análise do *Institute of Electrical and Electronic Engineers* (IEEE) que proporciona uma visão essencial sobre os mecanismos de falha em motores de indução, revelam padrões recorrentes que impactam sua confiabilidade e desempenho. Estudos mostram que as falhas no estator são responsáveis por aproximadamente 38% dos problemas identificados, enquanto defeitos no rotor representam cerca de 10%. Além disso, falhas nos rolamentos surgem como um dos desafios mais significativos abrangendo 40% dos casos relatados, enquanto os 12% restantes incluem diversas outras anomalias mecânicas e elétricas (BAHGAT; ELHAY; ELKHOLY, 2024). A Figura 11 classifica as falhas elétricas e mecânicas mais frequentes em MIT's.

**Figura 11** – Classificação de falhas mais frequentes em MIT's



Fonte: Adaptada de (BAHGAT; ELHAY; ELKHOLY, 2024)

Entre os diversos problemas mecânicos que podem comprometer o funcionamento dos motores de indução, destaca-se a excentricidade, isto é, desalinhamento no eixo, um

fenômeno que pode ocorrer de maneira estática, dinâmica ou mista. Sendo assim, identificar e corrigir essas irregularidade de forma eficiente é essencial para garantir o desempenho ideal dos motores e evitar falhas prematuras que possam comprometer processos industriais.

### 3.3.1 Métodos de análise preditivas

A manutenção preditiva fundamenta-se na análise contínua de dados operacionais coletados diretamente dos equipamento. Tais dados, permitem a identificação precoce de sinais de desgates, irregularidades ou tendências anormais de funcionamento, que se não forem tratadas, podem evoluir para panes ou defeitos graves. Quando detectadas, é planejado um ação corretiva previamente agendada, com o objetivo de sanar o problema antes que ocorra uma falha inesperado que demande uma intervenção emergencial, comprometendo a produtividade e elevando os custos operacionais (MARQUES, 2016).

Destacam-se alguns dos métodos de análises preditivas para identificar as falhas em MIT's (RIBEIRO, 2016):

- Análise de vibração;
- Análise termográfica;
- Análise de assinatura elétrica;
- Análise por campo magnético;
- Análise por emissão acústica;
- Análise de flutuação de velocidade;
- Análise de emissão de rádio frequência, entre outros.

Uma das técnicas mais relevantes empregada na manutenção preditiva é a análise de vibração, por sua capacidade de detectar antecipadamente uma ampla variedade de falhas mecânicas e eletromecânicas nos equipamentos. Essa técnica é fundamental para diagnosticar problemas como desbalanceamento rotacional, excentricidade ou desalinhamento de eixo, desgaste ou danos em rolamento, falhas em engrenagens, cavitação em sistemas de bombeamento e até desbalanceamento magnético em motores elétricos. Como essas vibrações são imperceptíveis ao olho humano, utiliza-se instrumentos dedicados como acelerômetros e analisadores de espectro que são capazes de captar, registrar e interpretar com precisão os sinais vibratórios emitidos pelo equipamento em operação (PEREIRA; GRANDE, 2021).

### 3.3.2 Método da análise de vibração

As vibrações desempenham um papel fundamental no funcionamento de diversos tipos de equipamento, sendo inclusive consideradas previstas durante sua fase de projeto para ocorrerem dentro de padrões regulares. No entanto, quando há variações ou alterações inesperadas no comportamento vibracional durante a operação, isso pode indicar o surgimento de defeitos ou desgastes em componentes internos (PEREIRA; GRANDE, 2021).

A análise de vibração se baseia na medição da variação das forças dinâmicas geradas durante o funcionamento dos sistemas mecânicos, as quais provocam oscilações vibratórias características. Essas forças perturbam o nível de vibração, e podem ser avaliadas em pontos acessíveis do motor elétrico, sem a necessidade de interromper a operação dos equipamentos (RIBEIRO, 2016).

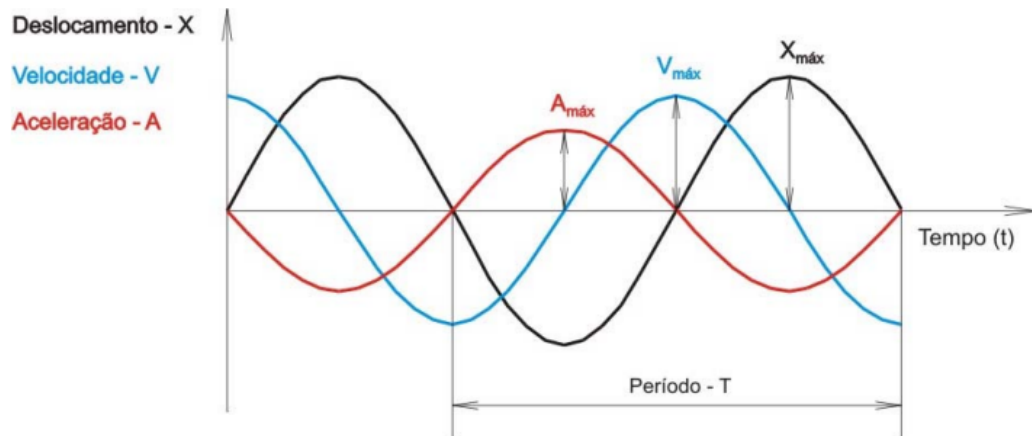
Qualquer máquina rotativa emite vibrações que podem ser captadas por equipamentos que detectam sua frequência. Para isso, utiliza-se transdutores acoplados à estrutura do motor que converteram os sinais vibratórios em dados elétricos. Esses dados são então processados por softwares especializados, que transformam as informações em espectros de frequência, facilitando a identificação de padrões, desvio ou anomalias. Com base na análise desses espectros, é possível avaliar o nível de criticidade das vibrações observadas, utilizando tanto o conhecimento técnico quanto parâmetros estabelecidos por normas regulamentadoras, assegurando com precisão nas tomadas de decisões de manutenções (PEREIRA; GRANDE, 2021).

Conforme destacado por (KARDEC; NASCIF, 2009) os parâmetros de vibração comumente utilizados na avaliação de máquinas rotativas são o deslocamento, a velocidade e a aceleração. Cada um desses parâmetros fornece uma perspectiva específica sobre o comportamento dinâmico dos componentes e representam a intensidade em que o equipamento está vibrando. A maioria dos medidores de vibração modernos são equipados para medirem todos os três parâmetros (Brüel Kjaer, 2025).

Na Figura 12 nota-se que o sinal de velocidade é defasado em 90° em relação ao sinal de deslocamento, assim como, o sinal de aceleração está defasado em 180° em relação ao deslocamento.

O deslocamento comumente medido em micrômetro ( $\mu m$ ), destaca-se componentes de baixa frequência, em que é aconselhado em medições inferior a 10Hz (HOLANDA, 2016), e pode ser expressado pela equação:

$$x = A \cdot \sin(\omega t) \quad (7)$$

**Figura 12** – Ilustração dos parâmetros de vibração

Fonte: (OLIVEIRA et al., 2004)

A velocidade normalmente medida em metros/segundo ou milímetro/segundo ( $m/s$  ou  $mm/s$ ), é o parâmetro menos significativo para componentes tanto de baixa frequência quanto de alta frequência, para avaliação da severidade da vibração é numa faixa intermediária, compreendida entre 10Hz e 1.000Hz (HOLANDA, 2016). Sua equação é dado por;

$$v = A \cdot \omega \cdot \cos(\omega t) = \frac{dx}{dt} \quad (8)$$

E aceleração tem sua equação descrita por:

$$a = -A \cdot \omega^2 \cdot \sin(\omega t) = \frac{dv}{dt} \quad (9)$$

é o parâmetro mais eficaz para representar fenômenos vibratórios em componentes que operam em altas frequências. Tem aplicação recomendada na análise de elementos mecânicos sujeitos a variações rápidas e intensas, como rolamentos, engrenagens, pulsação de pressão em compressores rotativos e outros equipamentos cujo espectro de defeitos se concentram entre 1.000Hz e 10.000Hz.

Nas equações (7), (8) e (9) a frequência angular ( $\omega$ ) é dado por:

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f \quad (10)$$

em que,  $f$  corresponde a frequência e no *Sistema Internacional de Unidades* (SI) é dado em ciclos/segundos ou Hz.

Os parâmetros tradicionais de deslocamento, velocidade e aceleração, três variáveis adicionais desempenham papel essencial na análise de vibração, tais qual (HOLANDA,

2016):

- **Amplitude (A):** Representa a intensidade do evento vibratório, isto é, o grau de severidade da vibração, indicando o quanto o componente se desloca durante o movimento oscilatório. É expressado normalmente em milímetro (*mm*);
- **Fase( $\phi$ ):** É uma grandeza medida em (*rad*) e expressa o ângulo inicial de uma função senoidal que descreve o movimento harmônico. Ela permite determinar se o sinal está adiantado ou atrasado em relação a outro. Na prática, a vibração geralmente apresenta atraso em relação à oscilação original;
- **Frequência (f):** Refere-se a quantidade de vezes que um determinado fenômeno se repete dentro de uma unidade de tempo, portanto, é útil para identificar a origem da vibração. Com base na relação matemática dado na equação 10, pode-se observar que:
  - A amplitude de deslocamento independe da frequência;
  - A amplitude de velocidade cresce proporcionalmente à frequência;
  - A amplitude de aceleração aumenta com o quadrado da frequência.

De acordo com (SPAMER, 2009), a análise do sinal de vibração ao longo do tempo pode ser realizada com base em diferentes formas de medição da amplitude do sinal. Entre os principais parâmetros utilizados estão o valor de pico a pico, que corresponde à diferença entre o valor máximo positivo e o valor máximo negativo da vibração. O valor de pico indica a maior amplitude registrada em relação à linha de base e usado na indicação de níveis de impacto de curta duração. O valor *Root Mean Square* (RMS) que representa a média quadrática da amplitude do sinal e é utilizado por oferecer uma estimativa mais representativa da energia total de vibração considerando o histórico da onda senoidal no tempo.

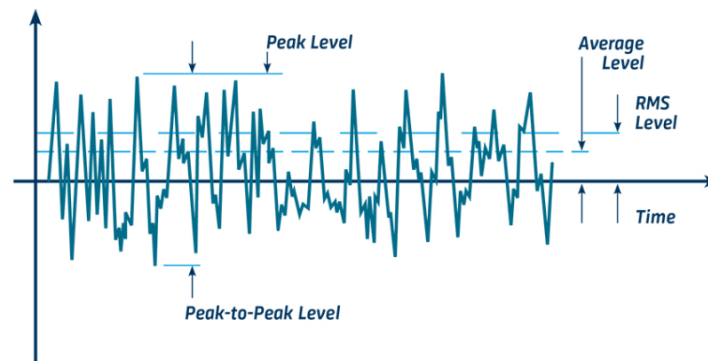
Esses métodos de medição são ilustrados na Figura 13 e permitem avaliar com precisão a severidade das vibrações presentes nos sistemas monitorados.

Qualquer função periódica no tempo pode ser representada pelo seu valor médio quadrático(RMS) dado por:

$$X_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt} \quad (11)$$

### Sensores para medição de vibração

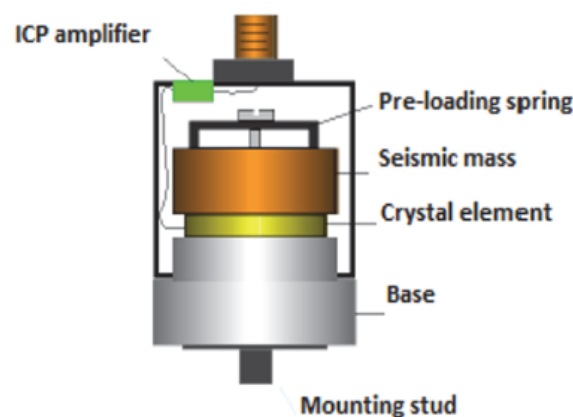
Kardec e Nascif (2009) destacam quais são os tipos de sensores comumente utilizados para medição de vibração, são eles:

**Figura 13** – Diferentes amplitudes do sinal

Fonte: (Brüel Kjær, 2025)

- Sensores Eletromagnéticos;
- Sensores Capacitivos;
- Sensores Eletrodinâmicos de velocidade;
- Acelerômetros.

Existem vários tipos de acelerômetros utilizados na análise de vibração, mas, de modo geral, todos compartilham o princípio de funcionamento baseado em um sistema massa-mola, sendo por isso classificados como transdutores sísmicos. O modelo mais utilizado é o acelerômetro piezoelétrico, composto por um ou mais cristais piezoelétricos tensionados por uma massa e alojados em uma carcaça rígida, como ilustrado na Figura 14.

**Figura 14** – Aspectos construtivo do acelerômetro piezoelétrico

Fonte: (GHEMARI; SALAH; BOURENANE, 2018)

Quando a máquina está submetida à pressão provocada por vibrações mecânicas, gera uma força variável sobre os cristais piezoelétricos do acelerômetro, produzindo uma

sinal elétrico proporcional à aceleração. No entanto, esse sinal possui alta impedância, o que dificulta seu uso direto com instrumentos de medição. Para viabilizar a leitura do sinal, utiliza-se de um circuito eletrônico que converte essa impedância de alta para baixa.

Os sensores acelerômetros piezoelétricos apresentam algumas vantagens e desvantagens quanto ao seu uso, tais quais são abordados no Quadro 1:

**Quadro 1** – Vantagens e Desvantagens dos Sensores Acelerômetros Piezoelétricos

<b>Vantagens</b>	<b>Desvantagens</b>
Ampla faixa de resposta em frequência de 1 Hz até 50 kHz	Sensibilidade mecânica elevada, exigindo cuidados na montagem
Peso e dimensões reduzidas	Susceptibilidade à excitação por ressonância
Boa resistência à temperatura (inclusive existem modelos para altas temperaturas sob recomendação)	Necessidade de instalação de filtro passa-baixa para evitar ruídos
Preço relativamente acessível	

Um fator essencial na análise vibracional é a faixa de frequência de interesse, que define o intervalo em que serão feitas as medições. O objetivo é compreender como cada frequência típica contribui para o comportamento vibratório total do sistema em um determinado instante. Esse conjunto de dados forma o chamado espectro de vibração, uma espécie de “assinatura” vibracional do equipamento, onde se representam simultaneamente os valores de velocidade ou deslocamento ao longo das diferentes frequências envolvidas (KARDEC; NASCIF, 2009).

### **Padrão de severidade de vibrações**

O valor RMS representa de forma eficaz a energia contida em um sinal de vibração, por essa razão, a norma ISO 10816-3 adotou esse parâmetro como referência oficial para definir os limites aceitáveis de vibração em equipamentos e estruturas. Os níveis de vibração disponibilizada pela *WEG Motion Fleet Management* e da norma são para pontos sobre os mancais ou da máquina acoplada. Sua redefinição deverá levar em consideração o tipo de base de fixação do motor e a localização do sensor longe dos mancais. A Figura 15 é uma referência, caso não haja outros valores de experiência com a aplicação e local de medição (WEG, 2021).

Na Figura 16, mostra um exemplo do ativo de um motor elétrico, no qual pode auxiliar na interpretação dos níveis de vibração monitoradas. Esse gráfico indica que o valor RMS em uma das direções excedeu o nível crítico em determinado instante de tempo, retornando posteriormente ao padrão normal de operação nas medições seguintes. Esse

**Figura 15** – Níveis de alerta e críticos de vibração - ISO 10816-3

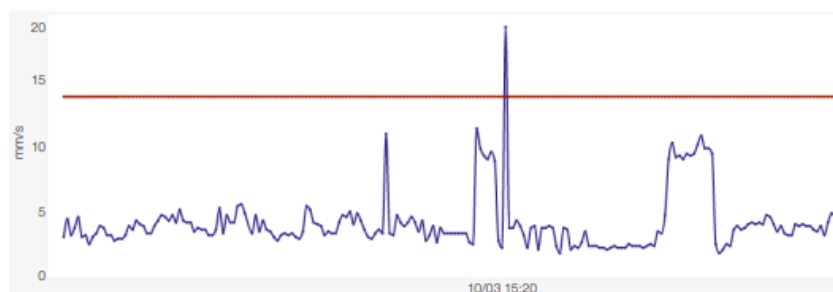
Velocidade de Vibração RMS [mm/s]	Potência ≤ 300 kW Grupo 2 da ISO 10816-3		Potência > 300 kW Grupo 1 da ISO 10816-3	
	Base Rígida	Base Flexível	Base Rígida	Base Flexível
$V \leq 2,8$	Normal	Normal	Normal	Normal
$2,8 < V \leq 5,6$	Alerta	Normal	Alerta	Normal
$5,6 < V \leq 8,9$	Crítico	Alerta	Crítico	Alerta
$8,9 < V \leq 13,8$	Crítico	Crítico	Crítico	Alerta
$V > 13,8$	Crítico	Crítico	Crítico	Crítico

Legenda:	
Normal	NORMAL
Alerta	ALERTA
Crítico	CRITICO

Fonte: (WEG, 2021)

comportamento pode estar associado a uma sobrecarga momentânea ou a um impacto pontual ocorrido durante o período de medição.

**Figura 16** – Níveis de vibração

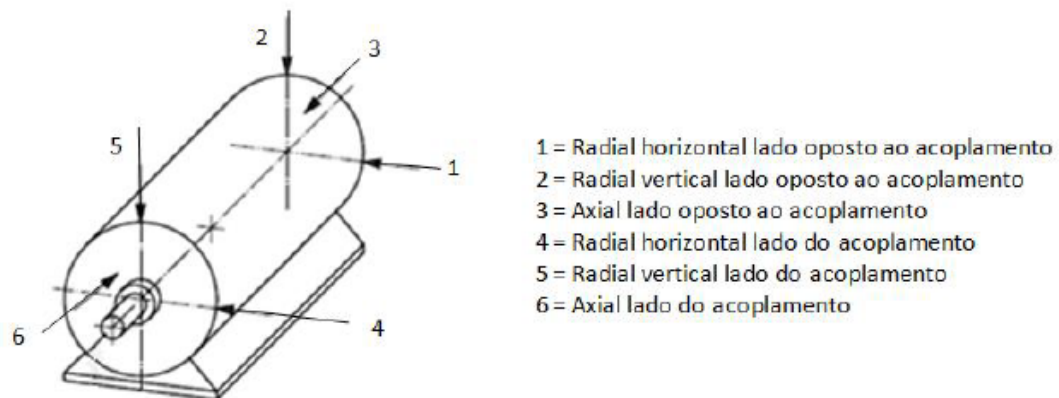
Fonte: (WEG, 2021)

### Pontos de medição adequados em máquinas rotativas

Os mancais são os principais elementos responsáveis por transmitir os esforços gerados durante o funcionamento da máquina à sua estrutura de suporte. Por isso, as vibrações captadas diretamente nesses componentes são menos influenciadas pelas propriedades dinâmicas da estrutura e refletem de forma mais precisa a condição dos elementos rotativos. Dessa forma, a norma ISO 10816-1 estabelece pontos específicos de medição nos mancais como ilustrado na Figura 17, isso garante uma avaliação confiável da integridade e desempenho da máquina.

Esses pontos foram definidos com base na sensibilidade das direções às diferentes fontes de falhas mecânicas, como desbalanceamentos, desalinhamentos ou problemas estruturais. A aplicação correta dessas medições permite uma avaliação confiável da condição da máquina, contribuindo diretamente para a manutenção preditiva e a prevenção de paradas inesperadas.

**Figura 17** – Posições recomendadas para sensores de vibração em mancais, de acordo com a norma ISO 10816-1



Fonte: (HOLANDA, 2016)

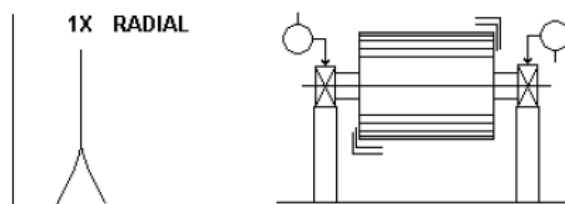
### Frequências características para identificação de falhas

A identificação de falhas mecânicas em sistemas rotativos é fundamentado pela análise de sinais de vibração, especialmente no domínio da frequência. Cada tipo de defeito tende a gerar vibrações características com padrões espectrais específicos, associados principalmente à frequência de rotação dos componentes e suas harmônicas. Esse comportamento vibracional permite categorizar anomalias com base na frequência predominante, plano de ocorrência, fase e amplitude da vibração.

Os quadros de diagnósticos de falhas da (SKF Reliability Systems, n.d.) sistematiza os principais tipos de falhas mecânicas e elétricas em máquinas rotativas, assimilando com suas assinaturas frequenciais típicas. Ele serve como referência diagnóstica para profissionais da manutenção preditiva e monitoramento de condição, permitindo inferências sobre o tipo de defeito com base na análise espectral do sinal medido.

### Desbalanceamento de massa

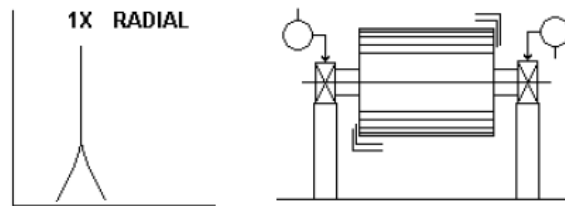
**Figura 18** – Espectro típico de desbalanceamento de forças



Fonte: (SKF Reliability Systems, n.d.)

O desbalanceamento de forças (Figura 18) caracteriza-se por ser um problema em fase e permanente. Sua amplitude de vibração apresenta uma relação quadrática com a velocidade, em que um aumento de 3 vezes na velocidade resulta em 9 vezes mais vibração. A componente 1X RPM está sempre presente e tipicamente domina o espectro vibratório. A correção deste tipo de desbalanceamento pode ser resolvida através da adição de um peso de balanceamento em um único plano localizado no Centro de gravidade (CG) do rotor.

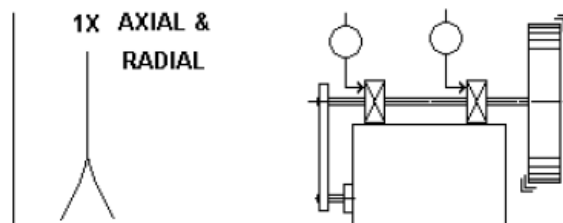
**Figura 19** – Espectro típico de desbalanceamento de acoplamento



Fonte: (SKF Reliability Systems, n.d.)

O desbalanceamento de acoplamento (Figura 19) apresenta um padrão de fase característico de  $180^\circ$  fora de fase no mesmo eixo. A componente 1X está sempre presente e normalmente domina o espectro vibratório, com amplitudes que variam quadraticamente com o aumento da velocidade. Este tipo de desbalanceamento pode gerar vibrações tanto axiais quanto radiais. Um dos principais indicadores é a diferença de fase de aproximadamente  $180^\circ$  observada entre as medições horizontais Outboard (OB) e Inboard (IB), bem como entre as verticais OB e IB. Na sua correção exige a colocação de pesos de balanceamento em pelo menos dois planos, caracterizando-se como um problema de balanceamento multiplano que requer uma abordagem mais complexa para sua eliminação adequada.

**Figura 20** – Espectro típico de desbalanceamento do rotor em balanço



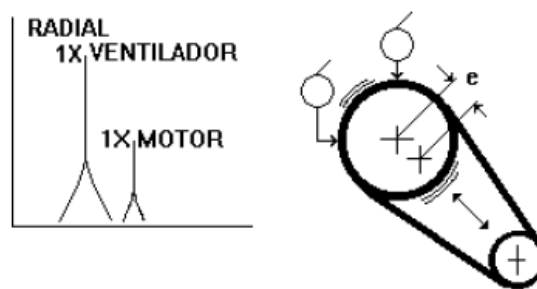
Fonte: (SKF Reliability Systems, n.d.)

O desbalanceamento em rotores em balanço (Figura 20) caracteriza-se por gerar elevados níveis de vibração na componente 1X RPM, manifestando-se tanto nas direções axial quanto radial. Um padrão distinto é observado nas leituras de fase, tais que, as

medições axiais tendem a permanecer em fase, enquanto as leituras de fase radiais podem apresentar comportamento instável. Estes rotores frequentemente apresentam uma combinação de dois tipos de desbalanceamento, sendo o desbalanceamento de força e desbalanceamento de acoplamento. Esta condição misturada exige que ambos os problemas sejam corrigidos simultaneamente para restaurar o equilíbrio adequado do sistema rotativo.

### Rotor excêntrico

**Figura 21** – Espectro típico rotor excêntrico

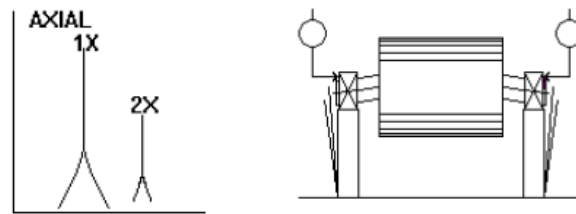


Fonte: (SKF Reliability Systems, n.d.)

A excentricidade (Figura 21) ocorre quando o centro de rotação não coincide com o centro geométrico do componente, como polias, engrenagens, mancais ou armaduras de motor. Esta condição gera sua maior vibração na frequência de 1X RPM do componente excêntrico, especialmente na direção da linha que conecta os centros dos dois rotores. Um indicador característico são as leituras de fase horizontal e vertical, que normalmente diferem de  $0^\circ$  ou  $180^\circ$ , revelando um movimento retilíneo. As tentativas de balanceamento convencional frequentemente produzem resultados inconsistentes, onde a redução da vibração em uma direção radial pode acarretar seu aumento na direção oposta, dependendo da magnitude da excentricidade presente.

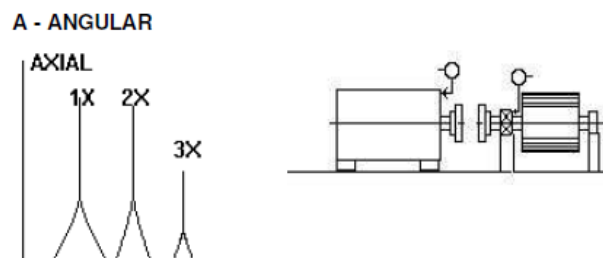
### Eixo arqueado

O arqueamento do eixo (Figura 22) ocorre por meio de elevados níveis de vibração na direção axial, com diferenças de fase axiais que tendem a  $180^\circ$  no mesmo componente da máquina. A frequência dominante da vibração varia conforme a localização da curvatura, isto é, quando próxima ao centro do eixo, predomina a componente 1X RPM, já quando próxima ao acoplamento, a vibração dominante passa a ser 2X RPM. Durante as medições, é ideal adotar cuidados com a orientação do transdutor, invertendo sistematicamente sua direção para cada medição axial realizada, garantindo a precisão na detecção deste tipo de problema.

**Figura 22** – Espectro típico do eixo arqueado

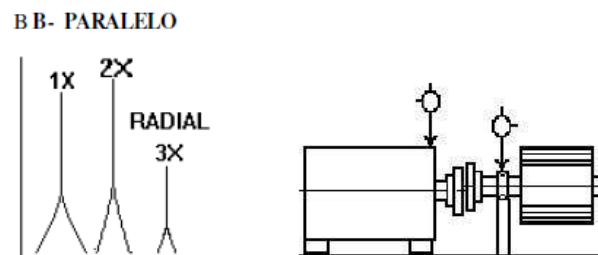
Fonte: (SKF Reliability Systems, n.d.)

## Desalinhamento

**Figura 23** – Espectro típico de desalinhamento angular

Fonte: (SKF Reliability Systems, n.d.)

O desalinhamento angular (Figura 23) caracteriza-se por gerar elevada vibração na direção axial, com um padrão de fase de  $180^\circ$  fora de fase através do acoplamento. Este tipo de desalinhamento é comum apresentar altos níveis de vibração axial tanto na frequência fundamental (1X RPM) quanto no segundo harmônico (2X RPM). Embora essas sejam as componentes mais características, o espectro vibratório pode variar, sendo possível observar a dominância de 1X, 2X ou mesmo 3X RPM. Vale ressaltar que estes mesmos sintomas também podem indicar problemas associados ao acoplamento em si.

**Figura 24** – Espectro típico de desalinhamento paralelo

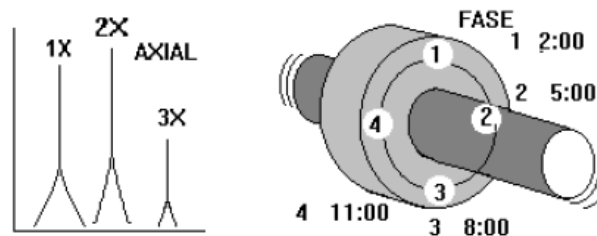
Fonte: (SKF Reliability Systems, n.d.)

O desalinhamento paralelo (Figura 24) apresenta características similares ao desalinhamento angular, mas diferencia-se por gerar vibração radial elevada com padrão

de fase próximo a  $180^\circ$  fora de fase através do acoplamento. A componente 2X RPM frequentemente supera a 1X em amplitude, sendo que a relação entre estas harmônicas é influenciada pelo tipo e construção específica do acoplamento utilizado. Em casos severos de desalinhamento, seja angular ou paralelo, o espectro vibratório pode exibir picos de alta amplitude em harmônicos mais elevados (4X a 8X RPM) ou mesmo uma série completa de harmônicos de alta frequência, cuja aparência se assemelha à de folga mecânica. A construção do acoplamento influencia diretamente na configuração do espectro quando o desalinhamento atinge níveis críticos.

## Rolamento

**Figura 25** – Espectro típico do rolamento

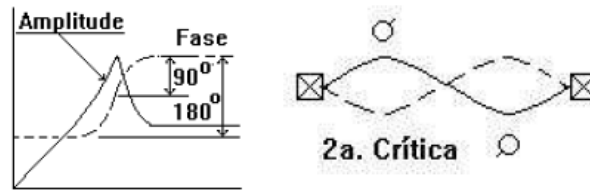


Fonte: (SKF Reliability Systems, n.d.)

O rolamento enjambrado (Figura 25) caracteriza-se por gerar vibração axial ascendente, manifestando um movimento de torção distintivo. Este padrão é identificado através de variações de fase de aproximadamente  $180^\circ$  entre as medições superior e inferior, ou entre os lados opostos, quando realizadas na direção axial do mesmo mancal. Um aspecto importante deste diagnóstico é que as abordagens convencionais de manutenção como tentativas de realinhamento do acoplamento ou balanceamento do rotor, não resolvem o problema. Uma possibilidade de correção efetiva exige a remoção completa do rolamento e sua reinstalação adequada, seguindo os procedimentos técnicos corretos de montagem.

## Ressonância

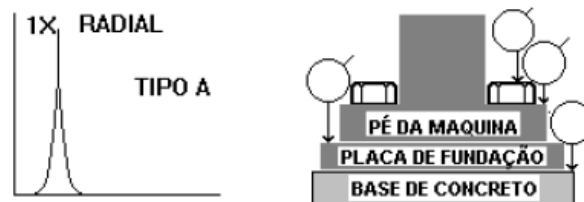
A ressonância (Figura 26) ocorre quando uma frequência forçada coincide com uma frequência natural do sistema, provocando um aumento significativo na amplitude vibratória que pode levar a falhas prematuras ou pane. Esta condição pode originar-se não apenas do rotor, mas também de outros componentes como carcaças, fundações, caixas de engrenagens ou correias de transmissão. Um aspecto crítico da ressonância é que, quando o rotor opera próximo desta condição, torna-se praticamente impossível realizar

**Figura 26** – Espectro típico de ressonância

Fonte: (SKF Reliability Systems, n.d.)

seu balanceamento devido às grandes variações de fase experimentadas (90° na ressonância exata e aproximadamente 180° quando ultrapassada). A solução frequentemente exige a modificação da localização da frequência natural por meio de alterações no sistema. As frequências naturais possuem a característica distinta de permanecerem constantes frente a mudanças na velocidade operacional, o que facilita sua identificação durante a análise vibratória.

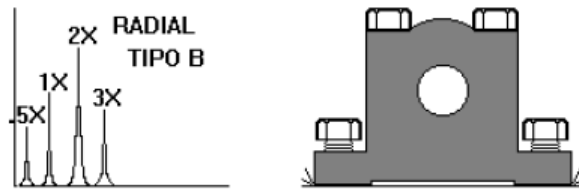
### Folga mecânica

**Figura 27** – Espectro típico de folga mecânica tipo A

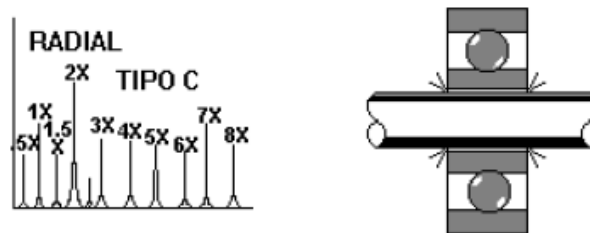
Fonte: (SKF Reliability Systems, n.d.)

A folga mecânica do tipo A (Figura 27) é identificada por espectros vibratórios característicos e resulta de problemas de folga ou fragilidade estrutural nos componentes de suporte da máquina. Suas principais causas incluem deterioração dos apoios de fundação, folga nos parafusos de fixação da base, distorção da armação ou estrutura de suporte. A confirmação diagnóstica é obtida através da análise de fase, que revela uma diferença de aproximadamente 180° entre as medições verticais realizadas no pé da máquina e na base de suporte correspondente. Este padrão de fase específico permite diferenciar este tipo de folga mecânica de outras condições que possam apresentar sintomas vibratórios similares.

A folga mecânica do Tipo B (Figura 28) caracteriza-se por ser causada principalmente por problemas de fixação e integridade estrutural nos componentes de suporte. Suas origens mais comuns incluem parafusos soltos nos apoios da base, presença de trincas na estrutura do skid ou fissuras no pedestal do mancal.

**Figura 28** – Espectro típico de folga mecânica tipo B

Fonte: (SKF Reliability Systems, n.d.)

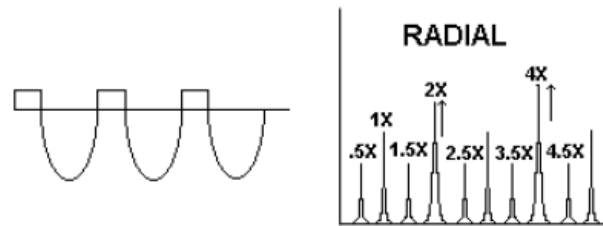
**Figura 29** – Espectro típico de folga mecânica tipo C

Fonte: (SKF Reliability Systems, n.d.)

A folga mecânica do Tipo C (Figura 29) é caracterizada por ser provocada por ajustes inadequados entre componentes frente às forças dinâmicas do rotor, resultando no truncamento da forma de onda no domínio do tempo. Suas causas típicas incluem folga linear do mancal em sua tampa, folga excessiva em buchas, folga no elemento rotativo de rolamentos, ou rotores soltos com excesso de folga em relação ao eixo. Um indicador que diferencia é a instabilidade da fase, que pode variar amplamente entre medições consecutivas, especialmente quando o rotor altera sua posição no eixo a cada partida. Esta condição apresenta comportamento altamente direcional, gerando leituras significativamente diferentes em incrementos de  $30^\circ$  ao redor da caixa do mancal. Outra característica relevante é a geração de múltiplos sub-harmônicos em frequências exatas de  $1/2$  ou  $1/3$  da rotação ( $0.5X$ ,  $1.5X$ ,  $2.5X$  RPM), servindo como um padrão espectral distintivo para identificação deste tipo específico de folga mecânica.

### Roçamento do rotor

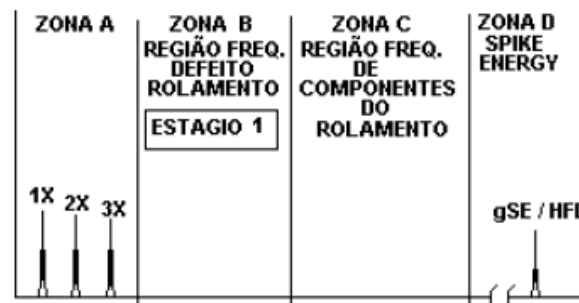
O roçamento do rotor (Figura 30) ocorre quando componentes rotativos entram em contato com partes estacionárias, gerando um espectro vibratório similar ao de folga mecânica. O contato pode ser parcial ou contínuo ao longo da rotação, produzindo tipicamente uma série de frequências que frequentemente excitam uma ou mais ressonâncias do sistema. Esta condição caracteriza-se pela excitação de múltiplos sub-harmônicos em frações da velocidade de rotação ( $1/2$ ,  $1/3$ ,  $1/4$ ,  $1/5$ , etc.), dependendo da localização

**Figura 30** – Espectro típico de roçamento do rotor

Fonte: (SKF Reliability Systems, n.d.)

das frequências naturais do rotor. Além disso, o roçamento pode gerar altas frequências com ruído de banda larga, semelhante ao som de giz em quadro-negro. A severidade do problema varia significativamente conforme o local do contato: é particularmente crítico quando envolve o contato do eixo com o metal do mancal, podendo levar a falhas em curto prazo.

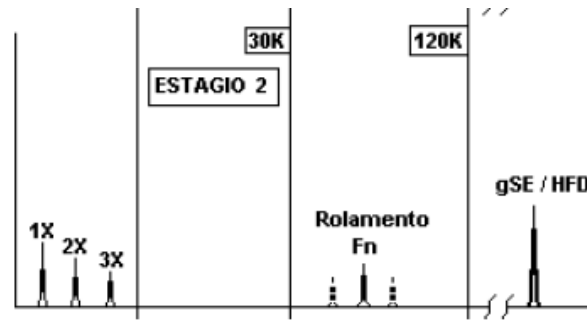
### Mancais de rolamentos

**Figura 31** – Espectro típico de rolamento - estágio 1

Fonte: (SKF Reliability Systems, n.d.)

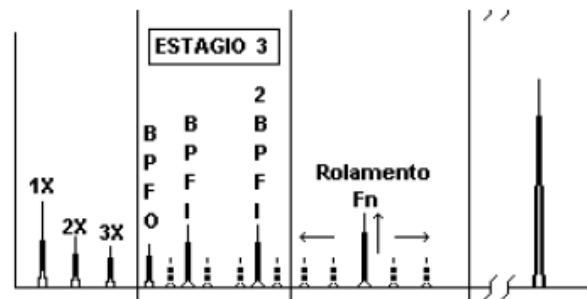
Existem 4 tipos de estágios de falha nos rolamentos, o estágio 1 (Figura 31) tem seus primeiros indicadores de problemas em rolamentos manifestando-se numa faixa de frequências ultrassônicas, compreendendo aproximadamente 20.000 a 80.000 Hz (1.200.000 a 3.800.000 CPM). A detecção precoce é realizada através de parâmetros especializados como Spike Energy (gSE), HFD (g) e Shock Pulse (dB). No estágio inicial da falha (Estágio 1), o Spike Energy pode apresentar valores em torno de (0,25gSE), sendo que o valor específico varia conforme fatores como a localização exata do ponto de medição e a velocidade operacional da máquina. Esta detecção precoce permite intervenção antes que o dano evolua para estágios mais avançados e críticos.

No estágio intermediário de falha (Figura 32), defeitos iniciais começam a modular as frequências naturais dos componentes do rolamento ( $F_n$ ), que se situam predomina-

**Figura 32** – Espectro típico de rolamento - estágio 2

Fonte: (SKF Reliability Systems, n.d.)

temente na faixa de (30.000 a 120.000 CPM). Este fenômeno manifesta-se através do aparecimento de bandas laterais caracteristicamente posicionadas acima e abaixo do pico da frequência natural. Concomitantemente, observa-se um aumento significativo nos valores de energia de ponta, que evoluem de aproximadamente (0,25gSE) para cerca de (0,50gSE), indicando a progressão do dano nos elementos do rolamento e a necessidade de intervenção mais imediata.

**Figura 33** – Espectro típico de rolamento - estágio 3

Fonte: (SKF Reliability Systems, n.d.)

No estágio avançado de falha (Figura 33), as frequências de defeito específicas dos rolamentos e seus harmônicos tornam-se evidentes no espectro vibratório. Conforme o desgaste progride, observa-se um aumento no número de harmônicos das frequências de defeito e uma proliferação de bandas laterais, tanto em torno das frequências de defeito quanto das frequências naturais do rolamento. O parâmetro Spike Energy (gSE) continua sua trajetória ascendente, evoluindo de aproximadamente (0,5gSE) para valores superiores a (1gSE). Nesta fase, o desgaste geralmente já é visível e pode estar se espalhando pela periferia do rolamento, especialmente quando bandas laterais bem definidas acompanham os harmônicos das frequências de defeito. Este é o estágio crítico onde a substituição imediata dos rolamentos se torna imperativa para evitar falha catastrófica.

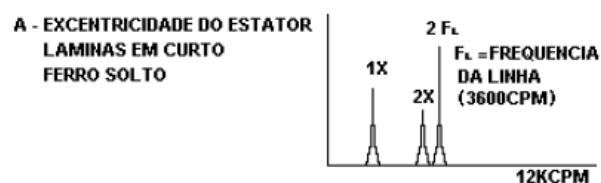
No estágio terminal da falha de rolamentos (Figura 34), observa-se um impacto

**Figura 34** – Espectro típico de rolamento - estágio 3

Fonte: (SKF Reliability Systems, n.d.)

significativo na vibração fundamental, com o aumento da amplitude de (1XRPM) e o crescimento de múltiplos harmônicos da velocidade operacional. Nesta fase crítica, ocorre uma transição importante no espectro vibratório: as frequências de defeito específicas dos rolamentos e as frequências naturais dos componentes começam a "desaparecer", sendo substituídas por um padrão de ruído de banda larga com frequências altas e aleatórias. Paradoxalmente, as amplitudes tanto do ruído de alta frequência quanto da energia de ponta podem apresentar uma redução temporária. No entanto, imediatamente antes da falha catastrófica, o Spike Energy (gSE) normalmente experimenta um aumento abrupto para amplitudes excessivamente elevadas, servindo como último alerta antes da falha completa do componente.

### Problemas elétricos

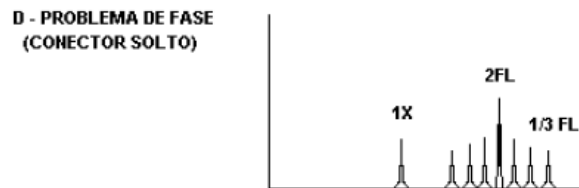
**Figura 35** – Espectro típico de excentricidade do estator

Fonte: (SKF Reliability Systems, n.d.)

Problemas no estator (Figura 35) manifestam-se através de vibração elevada na frequência de duas vezes da linha ( $2F_L = 120 \text{ Hz}$ ). Esta condição resulta de um entreferro desigual e estacionário entre o rotor e o estator, gerando vibração bem definida nessa frequência característica. Os limites máximos recomendados para o entreferro diferencial são de 5% para motores de indução e 10% para motores síncronos. Entre as causas frequentes podem ser devidos ao pés amortecidos ou bases isoladas que podem induzir excentricidade do estator. Outra possibilidade é o ferro solto devido à fragilidade ou folga nos suportes

do estator, e lâminas do estator em curto-circuito que provocam aquecimento localizado irregular. Um efeito particularmente crítico é o empenamento térmico do eixo do motor causado por aquecimento irregular, resultando em vibração termicamente induzida que pode crescer significativamente ao longo do tempo de operação, representando um risco progressivo para a integridade do equipamento.

**Figura 36** – Espectro típico de problema de fase



Fonte: (SKF Reliability Systems, n.d.)

Problemas de fase resultantes de conectores frouxos ou danificados geram vibração excessiva na frequência de duas vezes da linha ( $2F_L = 120$  Hz), caracterizada pela presença de bandas laterais em intervalos de um terço da frequência da linha ( $1/3 F_L = 20$  Hz) em torno do pico principal. Esta assinatura espectral distinta permite diferenciar o problema de outras falhas elétricas. A severidade do problema é evidenciada pelos níveis vibratórios que podem exceder (1,0 polegada/segundo) se não for corrigido instantaneamente. A condição torna-se particularmente crítica quando o conector defeituoso estabelece um contato intermitente, abrindo e fechando periodicamente, o que pode levar a picos de vibração ainda mais elevados e potencialmente causar danos adicionais ao sistema elétrico e mecânico do motor.

### 3.3.3 Sistemas de instrumentação para manutenção baseada em medida de vibração

Os sistemas de instrumentação utilizados na monitoração periódica de vibração podem ser agrupados em duas categorias principais: Medidores de vibração de nível global, que avaliam a vibração sem aplicação de filtros e analisadores de frequência por Transformada de Fourier.

#### Medidor de vibração de nível global (Sem filtro)

O medidor de vibração de nível global é um dispositivo utilizado para quantificar a vibração total de uma máquina, expressa em valores de pico ou RMS, dentro de uma ampla faixa de frequência determinada por normas técnicas e padrões específicos. Esse

instrumento opera sem filtragem de sinais, registrando a soma de todas as componentes de frequência presentes no espectro de vibração. Os dados obtidos são então comparados a limites de referência estabelecidos por normas gerais ou critérios específicos definidos para cada tipo de equipamento, possibilitando uma avaliação rápida do estado operacional da máquina (MARRA, s.d.).

Este tipo de medidor deve ser capaz de medir valores precisos de vibração, seja o valor verdadeiro RMS ou o valor de pico, abrangendo parâmetros como velocidade, deslocamento e, em determinadas situações, aceleração, dentro de uma faixa de frequência que vai de 5 Hz a 5.000 Hz. Na ausência de referências específicas para a máquina em análise, os dados de velocidade em RMS podem ser comparados diretamente com critérios normativos de severidade de vibração como exemplo da Figura 15, auxiliando na identificação da necessidade de intervenção.

Apesar de sua eficácia na detecção de defeitos operacionais, o medidor de vibração de nível global possui limitações quanto à capacidade de diagnóstico preciso. Para isso, são recomendados instrumentos com análise de frequência ou sistemas baseados na Transformada de Fourier, que permitem uma investigação mais detalhada das fontes da vibração (MARRA, s.d.).

### **Analisadores de frequência por Transformada de Fourier**

Nos casos em que se deseja realizar uma análise de frequência com larguras de filtro extremamente estreitas, ou avaliar sinais transitórios (como choques), é necessário empregar sistemas capazes de aplicar a Transformada de Fourier. Essa ferramenta matemática permite transformar sinais aleatórios, periódicos ou transitórios em uma série de Fourier equivalente, conhecida como espectro de frequência. O princípio fundamental dessa técnica é que qualquer sinal pode ser decomposto em uma série infinita de componentes de frequência que representam o sinal original no domínio da frequência.

Cada componente de frequência obtida pode ser diretamente relacionada ao comportamento dinâmico de um determinado elemento da máquina. A aplicação desse tipo de analisador permite gerar o espectro de frequência de referência de cada ponto de medição, denominado assinatura espectral da máquina ou baseline. Com essa referência estabelecida, torna-se possível comparar espectros de máquinas sob suspeita de falhas com seus espectros normais, identificar desvios, correlacioná-los com falhas específicas, baseadas em frequências características e, assim, realizar diagnósticos assertivos (MARRA, s.d.).

### Técnicas de análise espectral do sinal

A Transformada de Fourier (FT) equivale à uma decomposição de um sinal no tempo discreto como uma soma infinita de senoides complexas no tempo discreto. Para uma sequência de  $x[n]$  pode ser caracterizado no domínio da frequência com o auxílio da FT dado por:

$$X(e^{j\omega}) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x[n]e^{-j\omega n} \quad (12)$$

De forma natural, o espectro na frequência  $X(e^{j\omega})$  de um sinal no tempo discreto  $x[n]$  é periódica com período  $2\pi$ , isto é, a FT de um sinal discreto no tempo só precisa ser especificada numa faixa de  $2\pi$ , assim  $\omega \in [-\pi, \pi]$  ou  $\omega \in [0, 2\pi]$  (DINIZ; SILVA; NETTO, 2014).

A vantagem de trabalhar com sinais em tempo discreto é que podem ser representadas e processadas em computadores digitais, no entanto, quando examinada a equação (12) é notável que sua caracterização no domínio da frequência depende da variável contínua  $\omega$ . Isso implica que a FT, conforme originalmente definida, não é adequada para o processamento de sinais em tempo discreto por computadores digitais. É necessário utilizar uma versão da transformada que envolva uma variável de frequência discreta, preservando, sempre que possível, a ideia e a informação contidas na equação (12) (DINIZ; SILVA; NETTO, 2014).

É possível obter essa versão a partir da própria FT, bastando realizar uma amostragem uniforme da variável de frequência contínua  $\omega$ . Com isso, é mapeado um sinal que depende de uma variável discreta de tempo  $n$  para uma representação que depende de uma variável discreta de frequência  $k$ . Esse tipo de mapeamento é conhecido como DFT e tem sua equação descrita por:

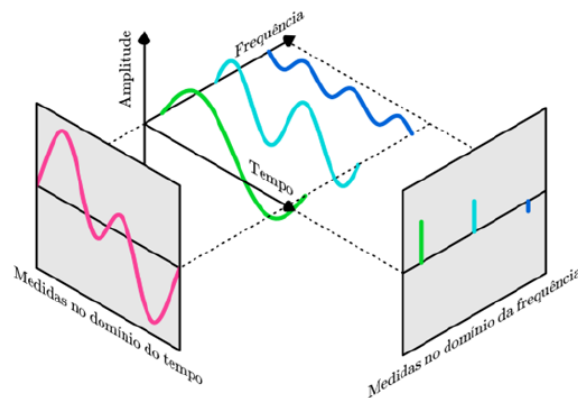
$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \cdot e^{-j\left(\frac{2\pi}{N}\right)kn}, \quad \text{para } 0 \leq k \leq N-1 \quad (13)$$

Uma limitação relevante na aplicação prática da DFT é o elevado número de operações aritméticas exigidas em seu cálculo especialmente quando se trata de sequências longas. Para isso foi desenvolvido algoritmos mais eficientes, conhecidos como FFT para realizar rapidamente os cálculos da DFT de forma computacional. Os primeiros algoritmos de FFT foram introduzidos por Cooley e Tukey, em 1965, e desde então, utiliza-se da DFT em diversas aplicações de processamento de sinais (DINIZ; SILVA; NETTO, 2014).

A análise baseada na FFT permite examinar sinais no domínio da frequência, realizando uma separação precisa de cada componente individual. Isso torna possível identificar e avaliar o comportamento de cada componente do sinal Figura 37. O resul-

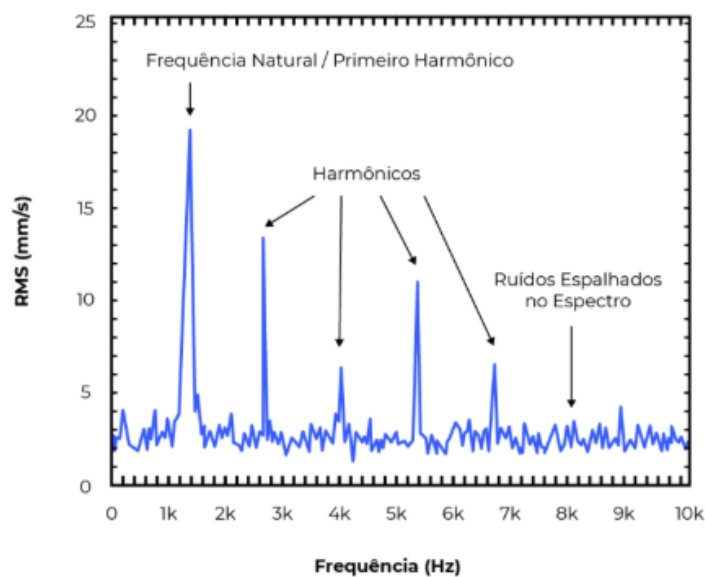
tado dessa transformação é denominado espectro de frequência, uma representação gráfica do padrão vibratório do sinal. Esse espectro é exibido em um gráfico onde a frequência corresponde ao eixo horizontal (abscissa) e a amplitude ao eixo vertical (ordenada) (HOLLANDA, 2016). No domínio do tempo, Figura 37, observa-se uma soma de diferentes sinais, o que dificulta a avaliação do sinal.

**Figura 37** – Representação de sinais tanto no domínio do tempo, quanto na frequência.



Fonte: (SILVA, 2025)

**Figura 38** – Espectro de um sinal de vibração no domínio da frequência.



Fonte: (TRACTIAN, 2023)

A análise de sinais no domínio da frequência é uma técnica essencial para o diagnóstico de vibrações em equipamentos. Ao investigar as componentes de frequência, é possível identificar com precisão as fontes de vibração como no exemplo da Figura 38. No espectro resultante, cada componente vibratório é representado por picos individuais.

ais, permitindo acompanhar separadamente as variações de amplitude e detectar, sem interferências, possíveis falhas em desenvolvimento (HOLANDA, 2016).

O padrão de espectros refletem o comportamento esperado de um equipamento operando dentro de suas condições normais. Assim, qualquer elevação na magnitude das vibrações ou alteração na distribuição das frequências pode indicar uma mudança no estado operacional que é considerado estável. Além disso, diferentes tipos de falhas em motores de indução manifestam padrões específicos no domínio da frequência, permitindo a distinção entre os defeitos com base em suas assinaturas espectrais características (SILVA, 2025).

### 3.4 Protocolo de comunicação HTTP

É um protocolo de comunicação cliente-servidor para transferência de dados na web, fundamental para a comunicação entre navegadores e servidores web (FIELDING; NOTTINGHAM; RESCHKE, 2022). O *HyperText Markup Language* (HTML) é a linguagem padrão que é utilizada para estruturar e exibir conteúdo em páginas web. No contexto de sistemas embarcados que se comunicam via Ethernet ou Wi-Fi, o HTML desempenha o papel fundamental de interface entre o usuário e o dispositivo. O microcontrolador atua como um servidor *Hypertext Transfer Protocol* (HTTP), enviando páginas HTML ao navegador do usuário. Na qual, essas páginas podem conter botões, textos, formulários e elementos que permitem monitorar ou controlar o sistema remotamente. Assim, o HTML possibilita a criação de uma interface universal, acessível a partir de qualquer dispositivo conectado à rede, sem a necessidade de aplicativos adicionais.

---

## METODOLOGIA

### 4.1 Sistema Proposto

O sistema proposto contém a integração do ensaio experimental, que foi realizado por meio da aquisição dos dados de vibração de uma máquina de indução trifásica com as seguintes especificações na Tabela 1, localizada no Laboratório de Máquinas Elétricas do Centro Multidisciplinar de Bom Jesus da Lapa.

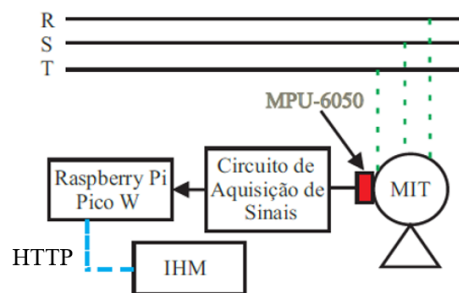
**Tabela 1** – Especificações técnicas do motor de indução trifásico

Parâmetro	Especificação
Modelo	W22
Tensão de Alimentação	380V
Rotação Por Minuto (RPM)	1730
Corrente Nominal	2,01A
Temperatura Ambiente	40°C
Classe de Isolação	F (155°C)
Grau de Proteção	IP55
Terminação	Caixa de ligação
Frequência	60 Hz
Fator de Serviço (SF)	1,15
Relação IP/IN	6,6
Terminais	U1, V1, W1 / L1, L2, L3
Fabricante	WEG
Linha/Modelo	POLYREX EM
Norma	NBR 17094-1

Fonte: Autoria Própria

A configuração do sistema de aquisição de dados é composta por um sensor acelerômetro MPU-6050 posicionado diretamente sobre a carcaça do motor nas direções radial e axial, como visto na Figura 17, responsável pela coleta das vibrações mecânicas durante sua operação. O sensor foi conectado ao microcontrolador Raspberry Pi Pico W, que integra uma placa de desenvolvimento da BitDogLab disponibilizada pela instituição de ensino da UFOB, e foi programado para coletar e armazenar os dados num formato de arquivo (.csv) de aceleração nos três eixos (X, Y, Z) em um módulo de cartão SD. Paralelamente, foi implementado uma interface gráfica em um navegador web, por meio de um protocolo de comunicação HTTP que possibilitou o monitoramento em tempo real dos sinais de vibração. Durante a coleta, o motor é mantido em regime permanente e, de forma proposital, é inserido um defeito elétrico de falta de fase, com o sistema registrando os sinais vibratórios em uma taxa de amostragem pré-definida. Em seguida, os dados armazenados foram transferidos para ambiente computacional e processados no software *Matrix Laboratory* (MATLAB), no qual foram submetidos a técnicas de análise espectral, aplicando o método da FFT, para conversão do sinal do domínio do tempo para o domínio da frequência. Essa análise do espectro de frequências resultante permitiu identificar componentes predominantes e padrões distintos devido à falha, viabilizando o diagnóstico do estado operacional do motor com base nas assinaturas vibratórias características. A Figura 39 apresenta a ilustração geral das etapas descritas, e a Figura 40 corresponde ao circuito implementado de aquisição de dados.

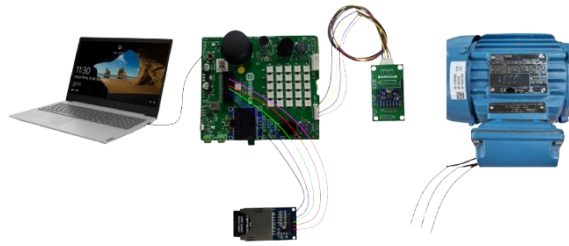
**Figura 39** – Diagrama geral do sistema proposto.



Fonte: Autoria Própria

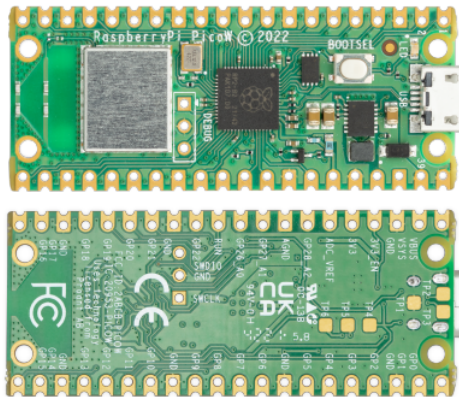
#### 4.1.1 Levantamento dos Materiais

Considerando o desenvolvimento do sistema proposto, deve-se destacar os principais dispositivos utilizados. Entre eles, podemos evidenciar o dispositivo *Raspberry Pi Pico W* na Figura 41, que se trata de uma placa compacta com baixo custo e alta performance desenvolvida pela *Raspberry Pi Foundation*, a qual inclui em seus atributos Wi-Fi 4(802.11n) + Bluetooth 5.2 da *Infineon* integrado, tornando-se ideal para aplicações IoT.

**Figura 40** – Circuito de aquisição de sinais.

Fonte: Autoria Própria

A Figura 42 detalha a pinagem da placa.

**Figura 41** – Placa de desenvolvimento Raspberry Pi Pico W.

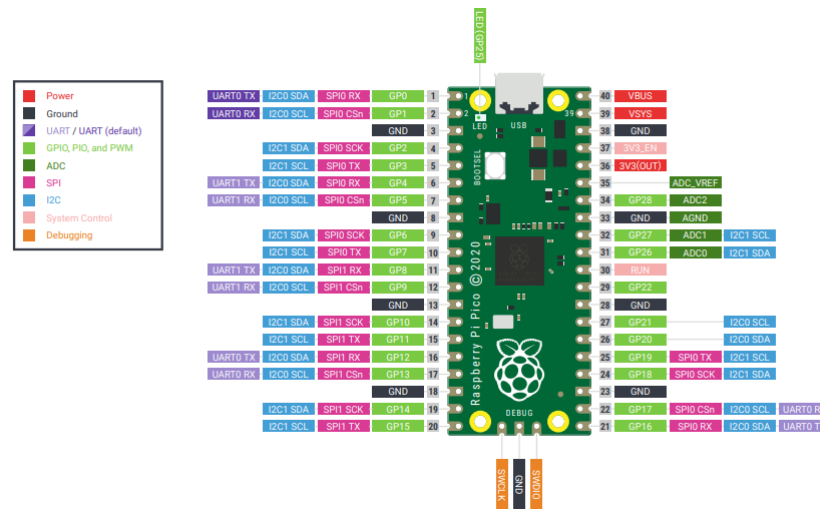
Fonte: Adaptada de (EMBARCADOS, 2023)

Utiliza-se de um microcontrolador RP2040 que compõem um processador *Dual-core ARM Cortex M0+*, rodando em até 133MHz e conta com 264KB de memória RAM e 2MB de memória Flash integrada na placa. Além disso, a placa possui suporte USB 1.1 *Host e Device* e modos de *low power*. As principais especificações técnicas deste microcontrolador está descritas no Quadro 2 e para mais informações, consultar o datasheet da placa em Foundation (2022).

A programação da placa pode ser realizada tanto em MicroPython como em C/C++, seu código é enviado para a placa na forma *drag and drop*, isto é, ao conectá-lo no computador é criado um disco onde poderá ser colocado o código que a placa irá rodar.

### Sensor de vibração

O MPU-6050 observado na Figura 43 de dimensões 4mm x 4mm x 0,9mm, da *InvenSense*, é um sensor que integra acelerômetro e giroscópio *Micro-Electro-Mechanical*

Figura 42 – Pinagem da placa *Raspberry Pi Pico W*

Fonte: Adaptada de (EMBARCADOS, 2023)

Quadro 2 – Especificações do Raspberry Pi Pico W

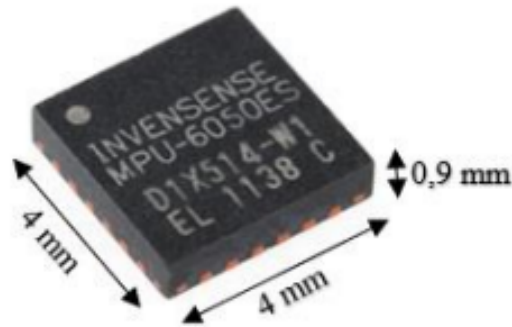
<b>Tipo</b>	Microcontrolador
<b>Fabricante</b>	Raspberry
<b>Preço</b>	R\$79,00
<b>Dimensões</b>	51 mm × 21 mm
<b>Software</b>	Arduino IDE, Thonny IDE
<b>Clock</b>	133 MHz
<b>Microcontrolador</b>	RP2040 (Silicon Designed by Raspberry Pi)
<b>Memória RAM</b>	264 kB
<b>Memória Flash</b>	2 MB
<b>GPIOs</b>	26 GPIOs multifuncionais
<b>Periféricos</b>	2×SPI, 2×I2C, 2×UART
<b>Wireless</b>	WiFi 2.4 GHz 802.11n
<b>USB</b>	micro-USB
<b>Tensão de Alimentação</b>	5 V USB VBUS
<b>Tensão de Operação</b>	3.3 V
<b>Miscelâneas</b>	Sensor de temperatura, Bluetooth 5.2

(MEMS) de seis eixos em um único chip, oferecendo *Degrees of Freedom* (DOF) completo. São três eixos dedicados ao acelerômetro e três ao giroscópio, permitindo ampla detecção de movimento e orientação. Destaca-se pela alta precisão, devido ao conversor analógico-digital de 16 bits de resolução presente em cada canal, que possibilita a captura simultânea das forças de aceleração lineares em três eixos X, Y e Z com o acelerômetro e as taxas de rotação em torno desse mesmo eixos com o giroscópio. O sensor utiliza o I2C-bus para fazer a interface com o *Raspberry Pi Pico W*.

O acelerômetro é responsável por identificar variações na velocidade linear do mo-

vimento, enquanto o giroscópio mensura a velocidade angular, isto é, a taxa de rotação do dispositivo. A combinação dessas medições permite obter informações precisas sobre sua orientação e dinâmica em três dimensões. Tais dados são processados internamente pelo MPU-6050 e convertidos em sinais digitais, tornando-os acessíveis para leitura e manipulação por microcontroladores ou outros sistemas de processamento embarcado.

**Figura 43** – Chip MPU-6050

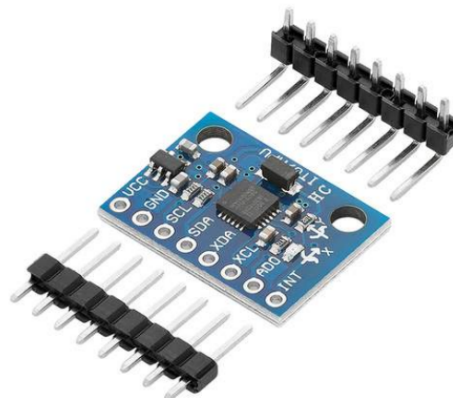


Fonte: (JÚNIOR; GALDINO, 2018)

Utiliza-se o sensor MPU-6050 contido no módulo GY-521 da Figura 44. Sua arquitetura é replicada por diferentes fabricantes que possui todo o circuito necessário para o funcionamento do sensor. Além disso, inclui um regulador de tensão e todo o circuito de condicionamento de sinal.

No Quadro 3 demonstra as principais especificações do Acelerômetro e Giroscópio 3 eixos MPU-6050. Para mais detalhes de informações desse sensor, recomenda-se o datasheet InvenSense (2013).

**Figura 44** – Módulo GY-521



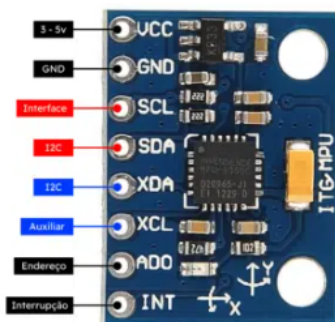
Fonte: (MAKERHERO, n.d.)

Na Figura 45 especifica a pinagem da placa GY-521, em que:

**Quadro 3** – Especificações do módulo MPU-6050 (GY-521)

<b>Componente</b>	Acelerômetro e Giroscópio 3 Eixos
<b>Módulo</b>	GY-521 (datasheet)
<b>Chip</b>	MPU-6050 (datasheet - (INVENSENSE, 2013))
<b>Tensão de Operação</b>	3,3 – 5 V
<b>Conversor AD</b>	16 bits
<b>Comunicação</b>	Protocolo padrão I2C
<b>Faixa do Giroscópio</b>	$\pm 250, \pm 500, \pm 1000, \pm 2000$ °/s
<b>Faixa do Acelerômetro</b>	$\pm 2, \pm 4, \pm 8, \pm 16$ g
<b>Faixa do Sensor de Temperatura</b>	-40°C a +85°C
<b>Taxa de Amostragem</b>	Até 8 kHz
<b>Temperatura de Operação</b>	-40°C a +85°C
<b>Dimensões</b>	20 mm x 16 mm x 1 mm

- VCC: Pino de alimentação, geralmente conectado a uma fonte de energia de 3,3V ou 5V;
- GND: Pino de terra (0V), conectado ao terra do sistema;
- SCL: Pino de clock Serial, usando para comunicação I2C;
- SDA: Pino de Dados Serial, também usado para comunicação I2C;
- XDA: Saída de dados auxiliar para comunicação I2C;
- XCL: Clock auxiliar para comunicação I2C;
- AD0: Pino de endereço. Pode ser usado para alterar o endereço I2C do dispositivo;
- INT: Pino de interrupção, usado para notificar o microcontrolador sobre eventos como detecção de movimento.

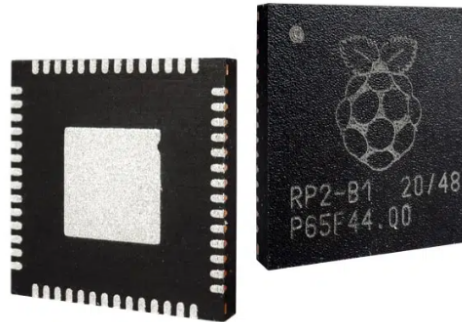
**Figura 45** – Pinagem do Acelerômetro e Giroscópio 3 Eixos MPU-6050 (GY-521)

Fonte: (MAKERHERO, n.d.)

### Microcontrolador do *Raspberry Pi Pico W* - RP2040

O RP2040, desenvolvido pela Fundação Raspberry Pi, é o primeiro microcontrolador (MCU) criado pela própria instituição em 2021. Esse chip da Figura 46 destaca-se por possuir um desempenho elevado, baixo custo e facilidade de uso, tornando-se uma solução ideal para o sistema proposto deste trabalho.

**Figura 46** – Chip do microcontrolador RP2040



Fonte: (MakerHero, 2025)

O chip tem uma memória RAM de 264 KB, um processador dual-core ARM Cortex-M0+ operando com clock fixo de 48 MHz, e oferece suporte para até 16 MB de memória Flash externa, além de dispor de um amplo conjunto de periféricos.

A arquitetura do RP2040 inclui pinos GPIO dedicados com funcionalidades pré-definidas, como SPI, I2C e UART, além de disponibilizar quatro entradas analógicas (ADC) e 16 canais PWM.

Para maior flexibilidade, o microcontrolador apresenta controladores PIO configuráveis, que possibilitam a implementação personalizada de protocolos de comunicação e outras funções avançadas de entrada/saída.

Outro diferencial relevante é o controlador USB integrado com PHY, que oferece suporte ao modo de inicialização via armazenamento em massa USB, compatível com o padrão UF2, permitindo programação no formato "arrastar e soltar". Além disso, possui compatibilidade com linguagens tanto em MicroPython quanto em C++.

Conforme o Quadro 4 em que especifica quais são principais recursos disponíveis do RP2040, pode-se notar que independentemente da aplicação desejada, seja em aprendizado de máquina, para controle de motores, sistemas agrícolas ou para processamento de áudio, esse chip oferece um desempenho agradável e robusto, assim como, recursos com versatilidade para o sistema projetado. Para que tenha mais informações sobre o microcontrolador, o datasheet é disponível em Raspberry Pi Ltd (2025).

**Quadro 4** – Principais especificações do microcontrolador RP2040

Característica	Descrição
Processador	Dual ARM Cortex-M0+ a 133 MHz
Memória SRAM	264 kB on-chip em seis bancos independentes
Memória Flash	Suporte para até 16 MB via barramento QSPI dedicado
DMA	Controlador DMA integrado
Arquitetura de barramento	Barra transversal AHB totalmente conectada
Unidades matemáticas	Periféricos interpoladores e divisores de inteiros
Regulador de tensão	LDO programável on-chip para tensão de núcleo
Geração de clock	2 PLLs on-chip para clock de núcleo e USB
GPIO	30 pinos disponíveis, sendo 4 com função de entrada analógica (ADC)
Interfaces de comunicação	2 UARTs, 2 SPI, 2 I2C
PWM	16 canais de modulação por largura de pulso
USB	Controlador USB 1.1 com PHY, suporte a host e dispositivo
PIO	8 máquinas de estado programáveis (PIO)

### Módulo de cartão SD

Este módulo é útil para leitura e escrita em cartão SD, com suporte adequado para bibliotecas no Raspberry Pi Pico W. Ele é compatível com cartões formatados em FAT32 com capacidade de 32Gigabytes (GB). Ele possui um design simples, e centrado em um regulador de tensão integrado. Este dispositivo na Figura 47 é responsável por converter a tensão de entrada, que pode variar entre 3,3V e 6V, para os estáveis 3,3 V necessários para a operação de qualquer cartão micro SD padrão.

**Figura 47** – Módulo de cartão para SD

Fonte: Autoria própria

## 4.2 Plataformas de desenvolvimento

O Raspberry Pi Pico W é uma placa baseada no microcontrolador RP2040, com conectividade Wi-Fi integrada. As aplicações são desenvolvidas por algumas das plataformas, tais quais:

- C/C++ SDK (Pico SDK): É o oficial da Raspberry Pi e permite um controle total do hardware, em que, utiliza de ferramenta como CMake, GCC e Visual Studio Code. Apresenta um suporte completo a Wi-Fi via biblioteca, além disso, reque configuração manual, ideal para desenvolvedores.
- MicroPython: Possui uma linguagem simples e interpretada, tornado-se ideal para iniciantes e prototipagem rápida. Têm suporte nativo ao Pico W com biblioteca para Wi-Fi, podendo ser programado diretamente via terminal serial ou Thony IDE;

Entre as opções disponíveis para o Raspberry Pi Pico W, utilizou-se de uma programação em C/C++ SDK no Visual Studio Code que é um editor de código gratuito e de código aberto desenvolvido pela Microsoft para Windows, macOS e Linux. Esse tipo de linguagem é possível que seja adequado para aplicações industriais e científicas que exigem alto desempenho, precisão de leitura, e controle total do hardware. Além disso, permite acesso direto ao microcontrolador RP2040, integrando bibliotecas de processamento digital de sinais, além de oferecer suporte completo à comunicação Wi-Fi para envio remoto dos dados coletados. O Quadro 5 apresenta um comparativo, evidenciando os pontos fortes da linguagem C/C++ em projetos voltados à manutenção preditiva e diagnóstico de máquinas rotativas:

**Quadro 5** – Comparativo entre plataformas de desenvolvimento para Raspberry Pi Pico W

Plataforma	Linguagem	Controle do Hardware	Facilidade de Uso	Suporte Wi-Fi	Indicação
C/C++ SDK	C/C++	Máximo	Média/Difícil	Completo	Projetos avançados
MicroPython	Python	Médio	Fácil	Simples	Prototipagem, ensino

### 4.2.1 Coleta de dados

O sistema implementado configura um módulo de aquisição de dados de vibração otimizado para análise de falhas em motores de indução trifásicos conforme os parâmetros no Quadro 6. A faixa de operação do acelerômetro é configurável entre  $\pm 2g$  ou  $\pm 4g$ , permitindo ajuste sensível conforme a intensidade das vibrações do motor em análise. O sistema opera com frequência de amostragem de 1000 Hz, correspondendo a um período

**Quadro 6** – Parâmetros do sistema de aquisição de dados

Parâmetro	Valor
Resolução por faixa do Acelerômetro	$\pm 2g$ ou $\pm 4g$
Frequência de Amostragem	1000 Hz
Período de Amostragem	1 ms
Total de Amostras por Coleta	5120 amostras
Duração da Coleta	5,12 s
Canais Adquiridos	6 (3 aceleração + 3 velocidade angular)
Método de Temporização	Timing absoluto
Formato de Armazenamento	CSV com precisão de microssegundos

de 1 milissegundo(ms) entre medições consecutivas, possibilitando uma captura detalhada dos componentes de vibração relevantes.

Cada ciclo de aquisição coleta 5120 amostras distribuídas ao longo de 5,12 segundos, tempo suficiente para capturar múltiplos ciclos completos de rotação mesmo em motores de baixa velocidade nominal. A aquisição dos dados abrange em seis canais, em que, existem três eixos de aceleração linear (X, Y, Z) e três eixos de velocidade angular (Giro X, Giro Y, Giro Z), o que possibilitou análise tridimensional completa do comportamento vibratório, mas apenas foram utilizados os canais de aceleração. A temporização é implementada através de método de timing absoluto utilizando contadores de alta precisão do microcontrolador. Os dados adquiridos são estruturados em formato Comma-Separated Values (CSV) com timestamp em segundos com resolução de microssegundos, seguido pelos seis canais do MPU6050 em valores inteiros de 16 bits. Esta formatação possibilitou o processamento direto na ferramenta de análise (MATLAB), em que facilitou a aplicação de algoritmos de transformada de Fourier, e frequências características de falhas. Cada arquivo gerado contém aproximadamente 5,12 segundos de dados contínuos, adequado para análise de componentes de frequência até 500 Hz conforme o teorema de Nyquist, cobrindo as faixas típicas de interesse para diagnóstico de falhas em MIT's.

Foram realizadas 28 coletas de vibração (Quadro 7), e foram divididas em duas condições operacionais, em que, 18 coletas correspondem ao motor em estado normal (operação ideal) e 10 coletas com falta de fase (simulada por conectores frouxos ou desconectados). Todas as medições foram feitas nas direções axial e radial individualmente posicionado sobre o MIT. As medições axiais capturam vibrações longitudinais do rotor, enquanto as radiais registram movimentos perpendiculares ao eixo. A comparação entre as duas classes permite identificar padrões distintos de vibração para diagnóstico de falhas.

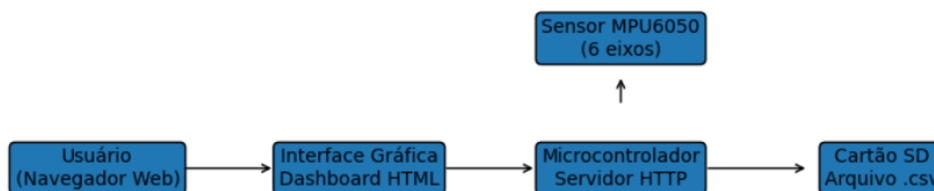
**Quadro 7** – Classificação dos dados

Classe	Quantidade de Coletas	Observações
Normal	18	Motor em condição ideal
Falta de fase	10	Conectores frouxos ou desconectados

### 4.3 Interface gráfica

O fluxograma na Figura 48 apresenta o sistema completo da interface gráfica para análise de vibração desenvolvida neste trabalho. O funcionamento inicia-se com a configuração da conexão Wi-Fi no microcontrolador, na qual são definidos, diretamente no código-fonte, o SSID e a senha da rede. Após o estabelecimento da conexão, o microcontrolador passa a operar como um servidor web HTTP, obtendo automaticamente um endereço IP por meio do protocolo *Dynamic Host Configuration Protocol* (DHCP). De posse desse endereço IP, o usuário pode acessar o sistema a partir de qualquer navegador web, sem a necessidade de instalação de software adicional. Ao acessar o IP, é carregado um dashboard em HTML, que funciona como a interface gráfica de controle e monitoramento do sistema. Por meio dessa interface, o usuário pode iniciar o processo de aquisição de dados ao acionar o comando “Iniciar Gravação”. Uma vez acionado, o microcontrolador realiza a leitura do sensor MPU6050, responsável pela aquisição dos sinais de vibração em seis eixos (três acelerômetros e três giroscópios). Os dados coletados são automaticamente armazenados em um cartão SD, no formato (.csv), possibilitando posterior análise no domínio do tempo e da frequência para fins de diagnóstico de falhas mecânicas e elétricas. Dessa forma, o sistema integra, de maneira eficiente, aquisição de dados, armazenamento local e interface gráfica acessível via navegador, permitindo o monitoramento e controle remoto do processo de análise de vibração por meio de uma rede sem fio.

**Figura 48** – Fluxograma do processo



Fonte: Autoria própria

Segue uma descrição resumida das etapas no fluxograma (Figura 48) para a interface gráfica de coleta dos dados de vibração no MIT:

- Usuário (navegador web): Acessa o sistema remotamente por meio de um navegador, onde visualiza e controla a coleta de dados em tempo real;
- Interface gráfica (Dashboard HTML): Apresenta os dados de vibração de forma visual (gráficos, indicadores) e fornece controles para iniciar/para aquisição;
- Microcontrolador como servidor HTTP: Processa as requisições do usuário, gerencia a comunicação com o sensor e disponibiliza os dados via servidor web;

- Sensor MPU6050 (6 eixos): Mede as vibrações do MIT, capturando aceleração e giro nos três eixos (X, Y, Z);
- Armazenamento em cartão SD (.csv): Salva os dados coletados em arquivos CSV no cartão SD para análise posterior e registro contínuo.

---

## RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Os resultados finais apresentados nesta proposta estão baseados na avaliação em que um sistema de aquisição de dados coletou de um motor de indução trifásico. Nessa etapa, foi realizado um estudo sobre os principais componentes a serem utilizados no desenvolvimento do sistema de monitoramento de máquinas elétricas. Ensaio experimentais foram realizados em uma bancada de teste situada no laboratório de máquinas elétricas do campus de Bom Jesus da Lapa, e avaliadas as assinaturas medidas de vibração para uma máquina elétrica funcionando normalmente e com a inserção de defeito.

### 5.1 Comparativo entre dispositivos microcontroladores

O Quadro 8 apresenta comparação entre as especificações técnicas básicas dos microcontroladores, já o Quadro 9 mostra seus principais recursos avançados e aplicações. Nesta análise, considerou-se, principalmente, a capacidade de processamento, memória e compatibilidade com a proposta deste projeto. O Raspberry Pi Pico W é muito utilizado em projetos IoT, automação e prototipagem devido ao seu baixo custo e versatilidade. Neste caso, espera-se um protótipo robusto, de baixo custo e que entregue repostas rápidas e precisas para monitoramento em tempo real.

**Quadro 8** – Comparativo entre STM32, Raspberry Pi Pico W e ESP32 - Parte 1/2

Característica	STM32	RPi Pico W	ESP32
Fabricante	STMicroelectronics	Raspberry Pi Found.	Espressif Systems
Arquitetura	ARM Cortex-M (variado)	ARM Cortex-M0+	Xtensa LX6/RISC-V
Núcleos	1 ou 2	2	1 ou 2
Frequência	Até 480 MHz	Até 133 MHz	Até 240 MHz
Memória RAM	Até 1 MB	264 KB	Até 520 KB
Memória Flash	Até 2 MB (int.)	2 MB	Até 16 MB (ext.)
Conectividade	Opcional Wi-Fi/BT	Wi-Fi 4 + BT 5.2	Wi-Fi 4 + BT
GPIOs	Até 168	26	Até 34

**Quadro 9** – Comparativo entre STM32, Raspberry Pi Pico W e ESP32 - Parte 2/2

Característica	STM32	RPi Pico W	ESP32
Conversores	ADC 12/16b + DAC 12b	ADC 12b (3 canais)	ADC 12b + DAC 8b
Interfaces	UART, SPI, I2C, CAN USB, Ethernet	UART, SPI, I2C USB, PIO	UART, SPI, I2C CAN, USB, Ethernet
Consumo	Baixo (deep sleep)	Muito baixo	Ultra baixo
Recursos	FPU, DSP, segurança	PIO, sensor temp.	AES/SHA/RSA
Programação	C/C++, CubeIDE Arduino	C/C++, MicroPython Arduino	C/C++, Lua Arduino
Aplicações	Industrial, automotivo IoT avançado	Educacional, IoT básico	IoT, wearables automação
Preço	Médio a alto	Baixo	Médio

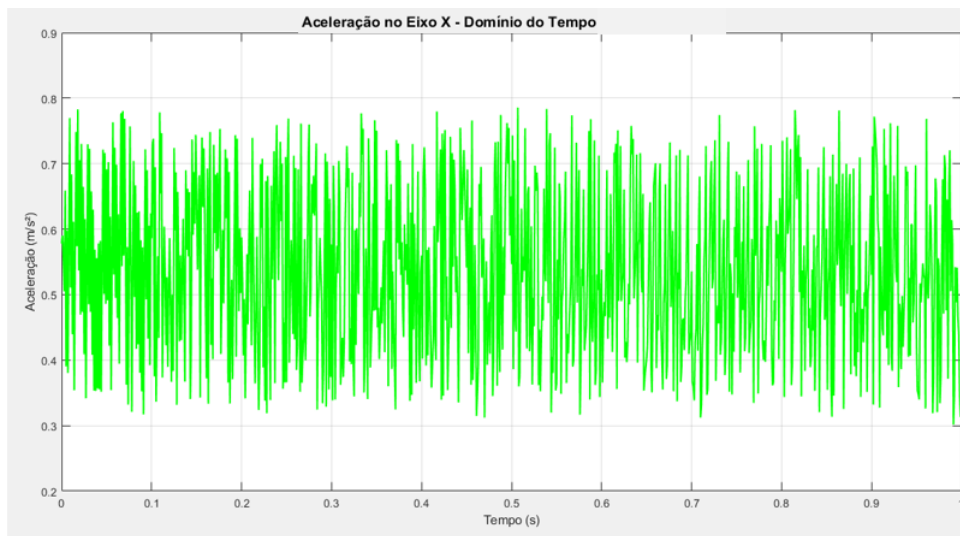
## 5.2 Avaliação das assinaturas medidas de vibração

O software utilizado a partir do conjunto de dados obtido, foi o MATLAB para o processamento e análise de sinais. Taís dados foram rotulados em categorias de motor em operação de funcionamento normal e motores com a presença de falhas (falta de fase). A taxa de amostragem é fixada em 1000 Hz para cada eixo, conforme especificação do sistema de aquisição de dados no Quadro 6.

De acordo com a Figura 49 o sinal, adquirido no eixo X (direção radial) durante 1 segundo de aquisição (equivalente às primeiras 1000 amostras), exibe um padrão oscilatório com amplitudes variando aproximadamente entre ( $\pm 0,8$  m/s<sup>2</sup>). Esse nível de vibração, inferior a (0,1g), é típico de um motor saudável em operação normal, indicando um funcionamento suave. O comportamento observado informa que possivelmente o motor operava em regime permanente durante a aquisição.

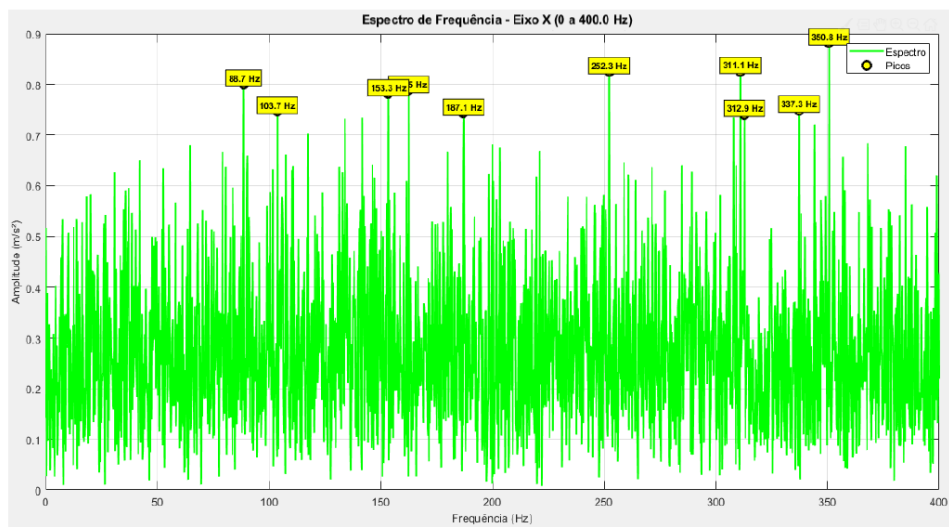
O espectro de frequência obtido na Figura 50, que deveria representar a condição operacional normal de um motor de indução trifásico com especificações de 1730 RPM (1), apresenta anomalias que comprometem sua validade como referência confiável para diagnóstico. A característica mais notável, é que existe uma ausência do pico dominante

**Figura 49** – Representação no domínio do tempo do sinal de vibração - operação normal do MIT



Fonte: Autoria própria

**Figura 50** – Espectro de frequência do sinal de vibração - operação normal do MIT

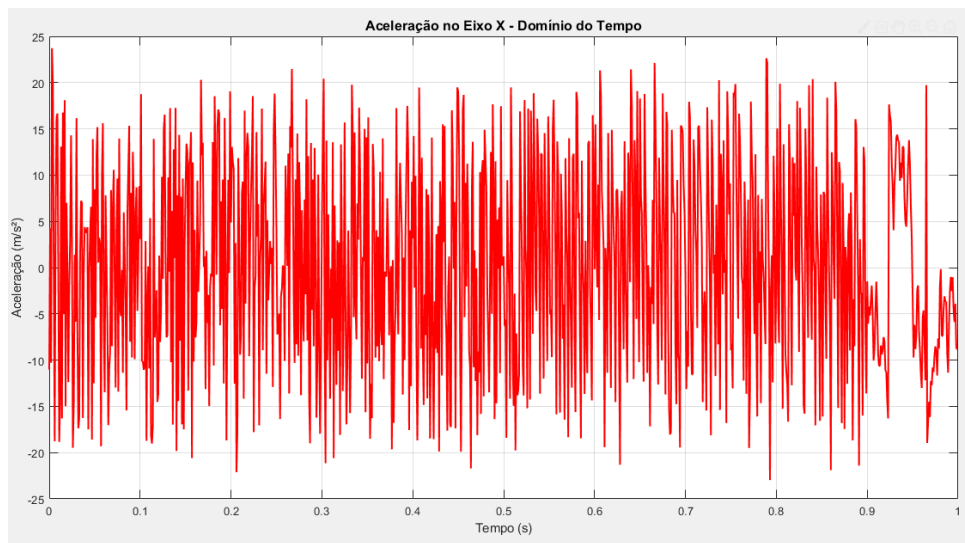


Fonte: Autoria própria

na frequência fundamental de rotação esperada ( $1 \times \text{RPM} = 28,8 \text{ Hz}$ ), possivelmente um aliado a um padrão espectral atípico, sugerindo fortemente a ocorrência de problemas durante a aquisição ou o processamento dos dados.

O sinal de vibração no domínio do tempo (Figura 51), coletado na direção radial (eixo X) de um motor de indução trifásico de 1730 RPM sob condição de falta de fase, apresenta características vibratórias marcantes e severas. A amplitude do sinal varia entre aproximadamente ( $\pm 19 \text{ m/s}^2$ ), o que corresponde a quase (2g) aceleração de pico a pico. Esse valor é de ordens de magnitude superior ao observado na operação normal de ( $\pm 0,8$

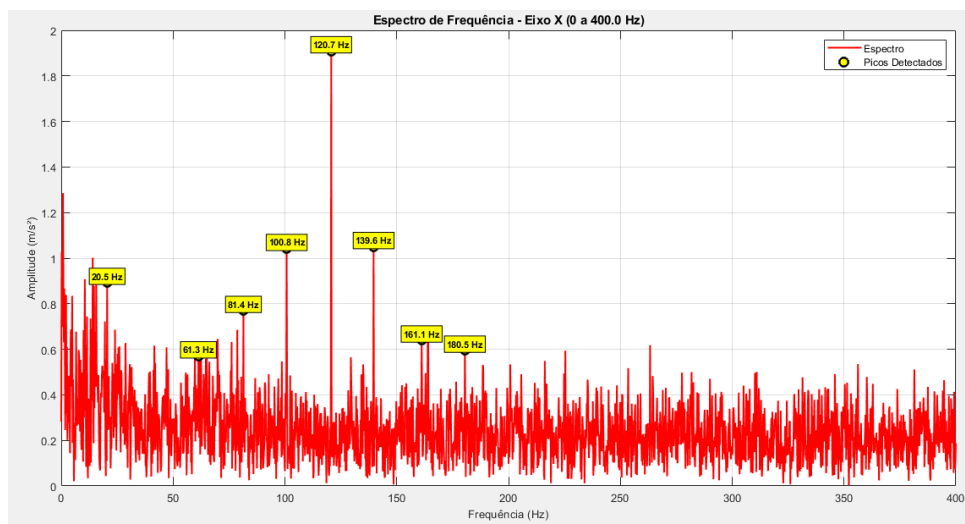
**Figura 51** – Representação no domínio do tempo do sinal de vibração com presença de falha no MIT



Fonte: Autoria própria

m/s<sup>2</sup>), confirmando que o defeito elétrico induz um aumento drástico nas forças dinâmicas atuantes na carcaça do motor.

**Figura 52** – Espectro de frequência do sinal de vibração - com presença de falha no MIT



Fonte: Autoria própria

O espectro de frequência obtido (Figura 52) na condição de uma inserção de defeito proposital, exibe características que, de primeira observação, parecem alinhadas com assinaturas frequenciais típicas de um defeito de fase visto na (Figura 36). É visível a dominância de um pico próximo a 120 Hz (duas vezes a frequência da rede de 60 Hz) e a presença de bandas laterais espaçadas em aproximadamente 20 Hz (um terço da frequência da rede) ao seu redor.

### 5.3 Avaliação da interface gráfica

O monitor de vibrações obtido (Figura 53) é uma interface gráfica web projetada para controle e visualização em tempo real da aquisição de dados de um MIT. No painel superior de "CONTROLE", o status do sistema é exibido com indicadores como "SD: OK" e "REC: ON (1008)", acompanhado por botões para montar, ejetar, iniciar e parar a gravação no módulo de cartão SD. No centro da tela, os valores instantâneos de vibração são apresentados de forma clara, mostrando as leituras do acelerômetro em metros/segundo<sup>2</sup>(m/s<sup>2</sup>) e do giroscópio em graus/segundo(<sup>o</sup>/s) nos três eixos(X, Y, Z), permitindo monitorar as vibrações. Além disso, a interface oferece a opção de personalizar os dados que foram gravados, permitindo que o usuário possa selecionar quais os parâmetros desejados, como aceleração e velocidade angular para serem registrados no arquivo .csv e serem analisados posteriormente, combinando assim controle operacional, visualização dinâmica e configuração flexível em uma única plataforma acessível remotamente via navegador.

**Figura 53** – Monitor de vibrações



Fonte: Autoria própria

---

## CONCLUSÃO

A interpretação dos resultados obtidos na seção anterior, é que houve um diagnóstico equivocado que possivelmente foi limitada por inconsistências no processo de aquisição. Artefatos como instabilidade na taxa de amostragem durante a coleta, ruído eletromagnético acoplado ao sensor MPU-6050, e interferências da comunicação podem ter distorcido o espectro real, gerando ou amplificando componentes que não refletem fielmente a dinâmica do motor. Então, embora o padrão observado seja coerente com a falha, ele não pode ser tomado isoladamente como prova definitiva, servindo antes como um indicativo preliminar que ressalta a importância crítica de uma aquisição de dados robusta e validada para que a análise espectral em vibrações possa atingir seu pleno potencial diagnóstico.

Portanto, o sistema proposto neste trabalho buscou desenvolver uma solução robusta e de baixo custo para a coleta de dados sobre as condições operacionais de máquinas elétricas. O principal objetivo do monitoramento desses equipamentos é possibilitar uma manutenção mais eficiente, reduzindo a ocorrência de paradas indesejadas. Os testes realizados mostraram-se ser apenas um indicativo para prever defeitos mecânicos ou elétricos, uma vez que foi possível projetar um dispositivo capaz de adquirir informações do motor e realizar análises tanto no domínio do tempo quanto no domínio da frequência. Entretanto, as principais limitações do estudo estão relacionadas à diversidade de defeitos que podem ser induzidos na máquina. Isso ocorre porque certos tipos de falhas poderiam comprometer permanentemente a integridade do equipamento utilizado, restringindo o conjunto de experimentos possíveis.

Para trabalhos futuros pretende-se implementar:

1. Interface de comunicação com aplicativo usando o protocolo MQTT;

2. Melhoria na aquisição de dados com outras condições de operação da máquina elétrica utilizada;
3. Desenvolvimento de um sistema de classificação de defeitos usando *Machine Learning*;
4. Realizar a integração completa do sistema.

---

## Referências Bibliográficas

- ALEXAKOS, C. T. et al. A combined short time fourier transform and image classification transformer model for rolling element bearings fault diagnosis in electric motors. *Machine Learning and Knowledge Extraction*, MDPI, v. 3, n. 1, p. 228–242, 2021.
- ALTAF, M. et al. A new statistical features based approach for bearing fault diagnosis using vibration signals. *Sensors*, MDPI, v. 22, n. 5, p. 2012, 2022. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1424-8220/22/5/2012>>. Acesso: 25/04/2025.
- BAHGAT, B. H.; ELHAY, E. A.; ELKHOLY, M. M. Advanced fault detection technique of three phase induction motor: comprehensive review. *Discover Electronics*, Springer, v. 1, n. 1, p. 9, 2024.
- Brüel Kjør. *Medindo Vibração – Como e Por Quê*. 2025. Acessado em: 19 de jul. de 2025. Disponível em: <<https://www.bksv.com/pt/knowledge/blog/vibration/measuring-vibration>>.
- BULGARELLI, R. Proteção térmica de motores de indução trifásicos industriais. 2006. Disponível em: <<https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3143/tde-01122006-134918/publico/RobervalBulgarelli.pdf>>. Acesso em: 10/04/2025.
- CARTILHA, W. *Gestão eficiente de energia: motores elétricos, inversores de frequência e geração solar*. 2017. Disponível em: <<https://static.weg.net/medias/downloadcenter/h7c/h92/WEG-gestao-eficiente-da-energia-eletrica-50030292-brochure-portuguese-web.pdf>>. Acesso: 07/04/2025.
- CHAPMAN, S. J. *Fundamentos de máquinas elétricas*. [S.l.]: AMGH editora, 2013.
- CHU, T. et al. A review of vibration analysis and its applications. *Heliyon*, Elsevier, v. 10, n. 5, 2024. Disponível em: <[https://www.cell.com/heliyon/pdf/S2405-8440\(24\)02313-2.pdf](https://www.cell.com/heliyon/pdf/S2405-8440(24)02313-2.pdf)>. Acesso em: 28/04/2025.
- CIABATTONI, L. et al. Statistical spectral analysis for fault diagnosis of rotating machines. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, IEEE, v. 65, n. 5, p. 4301–4310, 2017.
- DINIZ, P. S.; SILVA, E. A. da; NETTO, S. L. *Processamento digital de sinais-: Projeto e análise de sistemas*. [S.l.]: Bookman Editora, 2014.
- EMBARCADOS. *Raspberry Pi Pico W*. 2023. <<https://embarcados.com.br/placa/raspberry-pi-pico-w/>>. Acesso em: 11 jul. 2025.

- FIELDING, R. T.; NOTTINGHAM, M.; RESCHKE, J. RFC, *HTTP Semantics*. 2022. Obsoletes RFC 7231. Disponível em: <<https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc9110.html>>.
- FOUNDATION, R. P. *Raspberry Pi Pico W Datasheet*. 2022. <<https://d229kd5ey79jzj.cloudfront.net/2717/pico-w-datasheet.pdf>>. Acessado em: 12 jul. de 2025.
- GHAZALI, M. H. M.; RAHIMAN, W. Vibration analysis for machine monitoring and diagnosis: A systematic review. *Shock and Vibration*, Wiley Online Library, v. 2021, n. 1, p. 9469318, 2021. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1155/2021/9469318>>. Acesso em: 27/04/2025.
- GHEMARI, Z.; SALAH, S.; BOURENANE, R. Resonance effect decrease and accuracy increase of piezoelectric accelerometer measurement by appropriate choice of frequency range. *Shock and Vibration*, Wiley Online Library, v. 2018, n. 1, p. 5370438, 2018.
- HOLANDA, S. M. S. *Aplicação da manutenção preditiva por análise de vibrações em equipamentos de trens urbanos com plano de manutenção proposto*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Pernambuco, 2016.
- INVENSENSE, I. Mpu-6000 and mpu-6050 product specification revision 3.4. *United States*, 2013. Acessado em: 11 jul. 2025. Disponível em: <<https://invensense.tdk.com/wp-content/uploads/2015/02/MPU-6000-Datasheet1.pdf>>.
- JÚNIOR, T.; GALDINO, E. Acelerômetro sem fio de baixo custo para monitoramento dinâmico estrutural. 2018. Acesso em: 11 jul. 2025.
- KAFEEL, A. et al. An expert system for rotating machine fault detection using vibration signal analysis. *Sensors*, MDPI, v. 21, n. 22, p. 7587, 2021.
- KARDEC, A.; NASCIF, J. *Manutenção-função estratégica*. [S.l.]: Qualitymark Editora Ltda, 2009.
- KUMAR, S. et al. Vibration based fault diagnosis techniques for rotating mechanical components. In: IOP PUBLISHING. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. [S.l.], 2018. v. 376, n. 1, p. 012109. Disponível em: <<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/376/1/012109/pdf>>. Acesso em: 28/04/2025.
- MakerHero. *Microcontrolador RP2040 - Chip Raspberry Pi*. 2025. Acessado em: 18 de jul. de 2025. Disponível em: <<https://www.makerhero.com/produto/microcontrolador-rp2040/>>.
- MAKERHERO. *Acelerômetro e Giroscópio 3 Eixos 6 DOF - MPU-6050*. n.d. Acessado em: 11 jul. 2025. Disponível em: <<https://www.makerhero.com/produto/acelerometro-e-giroscopio-3-eixos-6-dof-mpu-6050>>.
- MARQUES, L. F. B. *Manutenção preditiva de motores trifásicos de indução através da análise de assinatura de corrente e fluxo magnético*. 2016.
- MARRA, J. L. *Medida de Vibração: Uma Ferramenta para a Manutenção*. Av. Mutinga, 309 s/4, São Paulo, Brasil, s.d. Apostila disponibilizada via PDFCoffee.com. Disponível em: <<https://pdfcoffee.com/apostila-vibracoes-pdf-free.html>>.

- MARTINS, D. H. C. de S. S. et al. Diagnostic and severity analysis of combined failures composed by imbalance and misalignment in rotating machines. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Springer, v. 114, n. 9, p. 3077–3092, 2021. Disponível em: <[https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/95156564/Artigo\\_JAMT-libre.pdf?1669972010=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DDiagnostic\\_and\\_severity\\_analysis\\_of\\_comb.pdf&Expires=1745849767&Signature=A7lnSYEJy3k5hPqZMzGZhbM9FRparirM7YR9LVn7qbKstxT85sfPYgzWmWOy9-kmhaMP3uOi~u.\\_&Key-Pair-Id=APKAJLOHF5GGSLRBV4ZA](https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/95156564/Artigo_JAMT-libre.pdf?1669972010=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DDiagnostic_and_severity_analysis_of_comb.pdf&Expires=1745849767&Signature=A7lnSYEJy3k5hPqZMzGZhbM9FRparirM7YR9LVn7qbKstxT85sfPYgzWmWOy9-kmhaMP3uOi~u._&Key-Pair-Id=APKAJLOHF5GGSLRBV4ZA)>. Acesso em: 28/04/2025.
- OLIVEIRA, A. L. d. et al. Contribuição para a dosagem e produção de peças de concreto para pavimentação. Florianópolis, SC, 2004.
- OLIVEIRA, L. et al. Otimização da manutenção preditiva em motores elétricos de baixa potência. 2020. Disponível em: <<https://finom.edu.br/assets/uploads/cursos/tcc/2021021908022112.pdf>>. Acesso em: 11/04/2025.
- PEREIRA, K. Y. da S.; GRANDE, C. Diagnóstico de falhas elétricas em motores de indução trifásico utilizando método de análise de vibração e análise do espectro de corrente. 2021.
- PIOVESAN, P. *Manutenção Preditiva: o que é, vantagens e prática*. [S.l.: s.n.], 2025. Disponível em: <<https://traction.com/blog/manutencao-preditiva>>. Acesso em: 12/04/2025.
- Raspberry Pi Ltd. *RP2040 Datasheet: A microcontroller by Raspberry Pi*. [S.l.], 2025. Build version: 3184e62-clean. Licensed under CC BY-ND 4.0. Disponível em: <<https://datasheets.raspberrypi.com/rp2040/rp2040-datasheet.pdf>>.
- RIBEIRO, J. M. Análise de falhas em motores de indução trifásica, através do método de detecção de falhas análise de vibração, utilizando controle por lógica fuzzy. Fundação de Ensino e Pesquisa do Sul de Minas, 2016.
- SHABBIR, N. et al. Spectrum analysis for condition monitoring and fault diagnosis of ventilation motor: a case study. *Energies*, MDPI, v. 14, n. 7, p. 2001, 2021. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1996-1073/14/7/2001>>. Acesso em: 28/04/2025.
- SILVA, S. F. *Monitoramento de falhas em motores de indução utilizando inteligência artificial embarcada*. Dissertação (B.S. thesis) — Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2025.
- SKF Reliability Systems. *Quadro Ilustrativo de Diagnósticos de Vibração*. São Paulo, Brasil, n.d. Tradução do *Proven Method for Specifying both 6 Spectral Alarm Bands (3rd Edition)* - Technical Associates of Charlotte. Disponível em: <<http://www.skf.com.br/>>.
- SPAMER, F. R. Técnicas preditivas de manutenção de máquinas rotativas. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2009.
- TRACTIAN. *Análise de vibração na detecção de falhas*. 2023. Acessado em: [data de acesso]. Disponível em: <<https://www.manutencaoemfoco.com.br/analise-de-vibracao-na-deteccao-de-falhas/>>.
- UMANS, S. D. *Máquinas Elétricas de Fitzgerald e Kingsley-7*. [S.l.]: AMGH Editora, 2014.

WANG, K. et al. Mechanical fault prognosis through spectral analysis of vibration signals. *Algorithms*, MDPI, v. 15, n. 3, p. 94, 2022.

WEG. *Motor Scan: Vibration Measurement - Technical Note*. 2021. Acesso em: 08 jul. 2025. Disponível em: <<https://static.weg.net/medias/downloadcenter/h50/h86/WEG-motor-scan-vibration-measurement-technical-note-10008451145-pt-en-es.pdf>>.

WEG, G. Guia de especificação: Motores elétricos. *Jaraguá do Sul*, 2019. Disponível em: <<https://www.weg.net/institutional/US/pt/search/downloadcenter?q=WEG-guia-de-especificacao-de-motores-eletricos-50032749-manual-portugues-br.pdf>>. Acesso: 10/10/2023.

WEG, G. Guia de especificação: Motores elétricos. 2023. Disponível em: <<https://static.weg.net/medias/downloadcenter/h32/hc5/WEG-motores-eletricos-guia-de-especificacao-50032749-brochure-portuguese-web.pdf>>. Acesso: 07/04/2025.

ZWANENBURG, E. et al. A combination of fourier transform and machine learning for fault detection and diagnosis of induction motors. In: IEEE. *2021 8th International Conference on Dependable Systems and Their Applications (DSA)*. [S.l.], 2021. p. 344–351. Disponível em: <<https://www.honda-ri.de/pubs/pdf/4793.pdf>>. Acesso em: 28/04/2025.

CorujaT<sub>E</sub>X



Este volume foi tipografado em L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X na classe CorujaT<sub>E</sub>X como uma demanda do Colegiado do curso de Engenharia Elétrica da **UFOB!** (**UFOB!**)  
([https://github.com/ademariocarvalho/CCEE\\_UFOB\\_CorujaTEX](https://github.com/ademariocarvalho/CCEE_UFOB_CorujaTEX)).