



INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO PIAUÍ
CAMPUS TERESINA CENTRAL
CURSO BACHARELADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA DE BAIXO CUSTO PARA MANUTENÇÃO
PREDITIVA DE MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS VIA ANÁLISE DE
VIBRAÇÕES COM TECNOLOGIAS IOT**

ÁLVARO BARRETO DA SILVA

TERESINA

2025

ÁLVARO BARRETO DA SILVA

DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA DE BAIXO CUSTO PARA MANUTENÇÃO
PREDITIVA DE MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS VIA ANÁLISE DE
VIBRAÇÕES COM TECNOLOGIAS IOT

Trabalho de Conclusão de Curso (monografia),
apresentado como exigência parcial para obtenção
do diploma do curso de Bacharelado em
Engenharia Mecânica do Instituto Federal de
Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí, Campus
Teresina Central.

Orientador: Prof. Dr. Petteson Linniker Carvalho
Serra

TERESINA

2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD

Silva, Álvaro Barreto da
S586d Desenvolvimento de sistema de baixo custo para manutenção preditiva de motores de indução trifásicos via análise de vibrações com tecnologias IOT / Álvaro Barreto da Silva. - 2025.
114 f.: il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica)
- Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí, Campus Teresina Central, 2025.
Orientador : Prof Dr. Petteson Linnker Carvalho Serra.
1. Manutenção. 2. IOT. 3. Análise de vibrações. I.Título.

CDD - 620

Elaborado por Tanize Maria Sales CRB 3/1024

ÁLVARO BARRETO DA SILVA

DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA DE BAIXO CUSTO PARA MANUTENÇÃO
PREDITIVA DE MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS VIA ANÁLISE DE
VIBRAÇÕES COM TECNOLOGIAS IOT

Trabalho de Conclusão de Curso (monografia),
apresentado como exigência parcial para obtenção
do diploma do curso de Bacharelado em
Engenharia Mecânica do Instituto Federal de
Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí, Campus
Teresina Central.

Aprovado em: 15/07/2025.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Petteson Linniker Carvalho Serra (Orientador)

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí (IFPI)

Prof. Dr. Jose Weliton Nogueira Junior

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí (IFPI)

Prof. Esp. Raphael Mendes dos Santos

Universidade Federal do Piauí (UFPI)

RESUMO

Os motores elétricos de indução trifásicos são altamente utilizados em toda a indústria por sua alta eficiência, versatilidade e baixo custo. Por serem equipamentos de alta criticidade, é importante que haja um plano de manutenção adequado para que não haja paradas não planejadas por falha no equipamento. Nesse sentido, a implementação da manutenção preditiva para o monitoramento contínuo do equipamento pode contribuir para a identificação de falhas potenciais e para o planejamento adequado das ações de manutenção. Este trabalho tem como objetivo desenvolver e implementar um sistema de baixo custo para o monitoramento e análise de vibração de um motor de indução trifásico, utilizando a tecnologia da Internet das Coisas (IoT). O sistema transmite dados em tempo real, possibilitando a análise de vibrações contínua do desempenho do motor e a identificação de possíveis falhas. Com foco no baixo custo de aplicação e na eficiência, o sistema integra sensores e o protocolo de comunicação sem fio para fornecer informações precisas e imediatas. Para validar o sistema, foram realizados testes em três motores com condições operacionais distintas, nos quais os resultados obtidos refletiram a condição real dos motores avaliados. No Caso A, motor em condição normal, as análises de RMS e espectrais não apresentaram indícios de falhas. No Caso B, motor com folga mecânica, os valores de RMS para as três posições permaneceram abaixo da classificação de alerta, porém, o valor na posição vertical foi mais elevado, sinalizando uma possível falha. A análise dos sub-harmônicos, confirmou a presença de folgas mecânicas, especialmente na medição horizontal do 2,5XRPM, que atingiu uma amplitude de 3,8 mm/s. No Caso C, motor com falha nos rolamentos, os níveis de vibração RMS mostraram-se em estado crítico de acordo com as normas, indicando uma falha em estágio avançado, o que recomenda a parada imediata do equipamento para manutenção corretiva. A análise espectral dos rolamentos, especialmente na posição axial, revelou altas amplitudes nas frequências características de FTF, BPFO e BSF, com a BSF próxima do limite de 0,8 mm/s, e um espectro preenchido por ruído, confirmando a falha nos rolamentos. A solução proposta demonstrou-se viável e de baixo custo, com potencial de ser implementada em um sistema de manutenção preditiva para motores de indução trifásicos.

Palavras-chave: manutenção preditiva; iot; análise de vibrações.

ABSTRACT

Three-phase induction electric motors are widely used throughout the industry due to their high efficiency, versatility, and low cost. As these are highly critical pieces of equipment, it's important to have an appropriate maintenance plan to prevent unplanned downtime due to equipment failure. In this regard, implementing predictive maintenance for continuous equipment monitoring can contribute to identifying potential failures and adequately planning maintenance actions. This work aims to develop and implement a low-cost system for monitoring and analyzing the vibration of a three-phase induction motor, using Internet of Things (IoT) technology. The system transmits data in real-time, enabling continuous vibration analysis of motor performance and the identification of possible failures. With a focus on low application cost and efficiency, the system integrates sensors and a wireless communication protocol to provide accurate and immediate information. To validate the system, tests were conducted on three motors with distinct operating conditions, and the results obtained reflected the actual condition of the evaluated motors. In Case A, the motor was in normal condition, and RMS and spectral analyses showed no signs of faults. In Case B, the motor had mechanical looseness; RMS values for all three positions remained below the alert classification, but the vertical position's value was higher, signaling a possible fault. The sub-harmonic analysis, confirmed the presence of mechanical looseness, especially in the horizontal measurement of 2.5XRPM, which reached an amplitude of 3.8 mm/s. In Case C, the motor had bearing failure; RMS vibration levels were critical according to standards, indicating an advanced stage of failure, which recommends immediate equipment shutdown for corrective maintenance. The spectral analysis of the bearings, especially in the axial position, revealed high amplitudes in the characteristic frequencies of FTF, BPFO, and BSF, with BSF close to the 0.8 mm/s limit, and a spectrum filled with noise, confirming the bearing fault. The proposed solution proved to be viable and low-cost, with the potential to be implemented in a predictive maintenance system for three-phase induction motors.

Keywords: predictive maintenance; iot; vibration analysis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Comparativo custo-tempo: manutenções corretiva e preventiva.	17
Figura 2 - Relação entre a curva de falha potencial e os tipos de manutenção	18
Figura 3 - Representação dos componentes de um motor de indução trifásico.....	19
Figura 4 - Estator e rotor de motor de indução trifásico.	20
Figura 5 - Funcionamento do rotor em campo magnético girante.	21
Figura 6 - Parâmetros da amplitude.	24
Figura 7- Limites de vibração com base nas normas ISO 20816-1 e 10816-3.....	26
Figura 8 - Gráfico Espectral FFT.	28
Figura 9 - Tipos de desbalanceamentos em máquinas rotativas	31
Figura 10 - Espectros dos desbalanceamentos: (a) estático, (b) conjugado, (c) dinâmico.	32
Figura 11 - Desalinhamento: (a) angular, (b) paralelo, (c) combinado.	33
Figura 12 - Espectro de vibração para desalinhamento angular e paralelo.	35
Figura 13 - Representação das falhas por folga mecânica e seus espectros.	37
Figura 14 - (a) componentes de um rolamento; (b) dimensões do rolamento.	38
Figura 15 - Espectro de falha em rolamentos no estágio 1.	39
Figura 16 - Espectro de falha em rolamentos estágio 2.	40
Figura 17 - Espectro de falhas em rolamentos no estágio 3.	40
Figura 18 - Espectro de falha em rolamento no estágio 4.	42
Figura 19 - Diagrama de arquitetura IoT.	43
Figura 20 - Componentes de um microcontrolador.	45
Figura 21 - Tabela comparativa entre microcontroladores.	46
Figura 22 - Exemplo de agricultura inteligente baseado em IoT e MQTT.	47
Figura 23 - Principais brokers utilizados para MQTT.	48
Figura 24 - Diagrama do sistema de monitoramento de vibração.	49
Figura 25 - Microcontrolador ESP32.	50
Figura 26 - Diagrama da interface do ESP32 com o ADXL345.....	52
Figura 27 - Fluxograma de execução do firmware no ESP32.	57
Figura 28 - Diagrama de funcionamento do Mosquitto Broker.	58
Figura 29 - Diagrama de execução do script no Railway.	59
Figura 30 - Parâmetros de aquisição e pré-processamento.....	60

Figura 31 - Parâmetros de rotação do motor.....	61
Figura 32 - Parâmetros para rolamentos.....	61
Figura 33 - Limiares de diagnóstico.	62
Figura 34 - Etapa de processamento dos dados.....	64
Figura 35 - Localização dos motores analisados.	66
Figura 36 - Etapa de coleta dos sinais de vibração.....	66
Figura 37 - Posições de fixação do sensor.	67
Figura 38 - Valores de RMS (mm/s) por posição e condição do motor.	69
Figura 39 - Espectro de harmônicos, posição vertical, caso A.....	70
Figura 40 - Espectro de harmônicos e sub-harmônicos, posição vertical, caso A.....	70
Figura 41 - Espectro de harmônicos, posição horizontal, caso A.....	71
Figura 42 - Espectro de harmônicos e 71	71
Figura 43 - Espectro de harmônicos, posição axial, caso A.....	71
Figura 44 - Espectro de harmônicos e 71	71
Figura 45 - Gráfico da relação entre os harmônicos do motor caso A, por posição. .	72
Figura 46 - Gráfico com a relação dos sub-harmônicos com a frequência de rotação do motor caso A, por posição.....	74
Figura 47 - Espectro de falha em rolamentos, posição vertical, caso A.	75
Figura 48 - Espectro de falha em rolamentos, posição horizontal, caso A.....	75
Figura 49 - Espectro de falha em rolamentos, posição axial, caso A.....	76
Figura 50 - Gráfico de frequência de falha nos rolamentos e suas amplitudes para cada posição no motor caso A.	77
Figura 51 - Espectro de harmônicos, posição vertical, caso B.....	78
Figura 52 - Espectro de harmônicos e sub-harmônicos, posição vertical, caso B.....	78
Figura 53 - Espectro de harmônicos, posição horizontal, caso B.....	78
Figura 54 - Espectro de harmônicos e sub-harmônicos, posição horizontal, caso B	78
Figura 55 - Espectro de harmônicos, posição axial, caso B.....	79
Figura 56 - Espectro de harmônicos e sub-harmônicos, posição axial, caso B.....	79
Figura 57 - Gráfico da relação entre os harmônicos do motor caso B, por posição. .	80
Figura 58 - Gráfico com a relação dos sub-harmônicos com a frequência de rotação do motor caso B, por posição.....	81
Figura 59 - Espectro de falha em rolamentos, posição vertical, caso B.	82
Figura 60 - Espectro de falha em rolamentos, posição horizontal, caso B.....	83
Figura 61 - Espectro de falha em rolamentos, posição axial, caso B.....	83

Figura 62 - Gráfico de frequência de falha nos rolamentos e suas amplitudes para cada posição no motor caso B.	84
Figura 63 - Espectro de harmônicos, posição vertical, caso C.....	85
Figura 64 - Espectro de harmônicos e sub-harmônicos, posição vertical, caso C. ...	85
Figura 65 - Espectro de harmônicos, posição horizontal, caso C.....	86
Figura 66 - Espectro de harmônicos e sub-harmônicos, posição horizontal, caso C.	86
Figura 67 - Espectro de harmônicos, posição axial, caso C.....	86
Figura 68 - Espectro de harmônicos e sub-harmônicos, posição axial, caso C.	86
Figura 69 - Gráfico da relação entre os harmônicos do motor caso C, por posição..	87
Figura 70 - Gráfico com a relação dos sub-harmônicos com a frequência de rotação do motor caso C, por posição.....	89
Figura 71 - Espectro de falha em rolamentos, posição vertical, caso C.....	90
Figura 72 - Espectro de falha em rolamentos, posição horizontal, caso C.....	90
Figura 73 - Espectro de falha em rolamentos, posição axial, caso C.....	91
Figura 74 - Gráfico de frequência de falha nos rolamentos e suas amplitudes para cada posição, motor caso C.....	92

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Especificações do acelerômetro ADXL345.	51
Tabela 2 - Conexão do ESP32 com o acelerômetro ADXL345.	52
Tabela 3 - Limites de diagnóstico por defeito.	62
Tabela 4 - Especificação dos três motores analisados.	67
Tabela 5 - Taxas de amostragem para cada um dos motores em número de coletas por segundo.	68
Tabela 6 - Frequências, amplitudes e relação entre harmônicos nas posições vertical, horizontal e axial, caso A.....	72
Tabela 7 - Sub-harmônicos por Posição de Medição: Frequência, Amplitude e Relação com 1XRPM, caso A.	73
Tabela 8 - Frequências características do rolamento e suas amplitudes por posição de medição, caso A.....	76
Tabela 9 - Frequências, amplitudes e relação entre harmônicos nas posições vertical, horizontal e axial, caso B.....	79
Tabela 10 - Sub-harmônicos por Posição: Frequência, Amplitude e Relação com 1XRPM, caso B.	81
Tabela 11 - Frequências características do rolamento e suas amplitudes por posição de medição, caso B.....	84
Tabela 12 - Frequências, amplitudes e relação entre harmônicos nas posições vertical, horizontal e axial, caso C.	87
Tabela 13 - Sub-harmônicos por Posição: Frequência, Amplitude e Relação com 1XRPM, caso C.....	88
Tabela 14 - Frequências características do rolamento e suas amplitudes por posição de medição, motor caso C.....	91

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	OBJETIVOS	13
1.1.1	Objetivo Geral	13
1.1.2	Objetivos Específicos.....	13
1.2	JUSTIFICATIVA	14
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	15
2.1	DEFINIÇÃO DA MANUTENÇÃO	15
2.1.1	Tipos de Manutenção	15
2.2	MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS	18
2.2.1	Elementos Constituintes.....	19
2.2.2	Funcionamento do Motor Trifásico	20
2.3	FUNDAMENTOS DE VIBRAÇÕES MECÂNICAS	21
2.3.1	Vibração Forçada.....	21
2.3.2	Movimento Harmônico Simples	22
2.3.3	Amplitude	23
2.4	MANUTENÇÃO PREDITIVA POR ANÁLISE DE VIBRAÇÃO.....	24
2.4.1	Técnica de Monitoramento da Vibração: Análise no Domínio do Tempo	25
2.4.2	Técnica de Monitoramento de Vibração: Análise de Espectro por FFT...	27
2.5	PRINCIPAIS FALHAS MECÂNICAS E SEUS ESPECTROS.....	29
2.5.1	Desbalanceamento Mecânico em Motores.....	29
2.5.2	Desalinhamento Mecânico em Máquinas Rotativas	32
2.5.3	Folga Mecânica em Máquinas Rotativas	35
2.5.4	Falha em Mancais de Rolamentos em Máquinas Rotativas.....	37
2.6	INTERNET DAS COISAS (IOT)	42
2.6.1	Arquitetura IoT	43
2.6.2	Sensor	44
2.6.3	Microcontroladores	44
2.6.4	MQTT	46
3	MATERIAS E MÉTODOS.....	49
3.1	DEFINIÇÃO DE <i>HARDWARE</i>	50
3.1.1	Microcontrolador ESP32	50

3.1.2	Acelerômetro ADXL345	51
3.2	COMUNICAÇÃO DOS DISPOSITIVOS IOT	53
3.2.1	Comunicação I2C (<i>Inter-Integrated Circuit</i>)	53
3.2.2	Comunicação Wi-Fi.....	53
3.2.3	Comunicação MQTT (<i>Message Queuing Telemetry Transport</i>).....	54
3.3	DEFINIÇÃO DE SOFTWARE	54
3.3.1	Desenvolvimento do Código para o ESP32.....	55
3.3.2	Integração entre MQTT e Banco de Dados.....	57
3.3.3	Diagnóstico de Falhas com Ferramenta de Análise de Sinais	59
3.4	VALIDAÇÃO DO SISTEMA EM AMBIENTE REAL.....	65
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	68
4.1	ANÁLISES NO DOMÍNIO DO TEMPO.....	69
4.2	ANÁLISE NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA.....	70
4.2.1	Análise Espectral do Caso A: Motor em Condição Normal	70
4.2.2	Análise Espectral do Caso B: Motor com Folga Mecânica	77
4.2.3	Análise Espectral do Caso C: Motor Falha nos Rolamentos	85
5	CONCLUSÃO.....	93
	REFERÊNCIAS	94
	APÊNDICE A – FIRMWARE DO ESP32.....	102
	APÊNDICE B – SCRIPT PARA COLETA DE DADOS DE VIBRAÇÃO VIA MQTT E INSERÇÃO EM MYSQL	104
	APÊNDICE C – SCRIPT PARA ANÁLISE DE VIBRAÇÃO E DIAGNÓSTICO DE FALHAS	106

1 INTRODUÇÃO

Os motores elétricos de indução trifásica são amplamente utilizados em operações industriais por ser um produto confiável, versátil e manifestar um baixo custo em relação aos demais motores. Eles têm uma grande variedade de aplicações industriais, como sistema de bombeamento de fluidos, acionamento de ventiladores, compressores, entre outros. Nesse sentido, pode-se observar o quanto é importante o papel do motor de indução trifásico para a indústria, com isso torna-se indispensável para a continuidade da operação industrial um plano de manutenção adequado para que não haja quebras inesperadas do equipamento (WEG, 2005).

Com esse alto nível de aplicações os motores estão sujeitos a uma grande variedade de ambientes e a condições de difícil acesso. De acordo com o tempo de uso, eles podem apresentar diversas falhas, tanto externas como internas, que podem resultar em perdas como a inatividade da operação e em custos elevados de conserto não programados. Nesse contexto, a análise de vibrações permite antecipar as falhas presentes no motor, já que os mesmos estão relacionados diretamente em uma determinada frequência no espectro (OLIVEIRA; NUNES; GARRETO, 2023).

O monitoramento e a análise de vibração utilizando técnicas da manutenção preditiva antecipam futuras falhas e possibilitam que a manutenção ocorra durante paradas programadas das máquinas. Esse tipo de manutenção evita que as máquinas que tenham um alto índice de criticidade para operação enfrentem paralisações inesperadas e reduz os custos associados a reparos e substituição de peças. Dessa forma é possível observar o quanto a identificação precoce de falhas e o monitoramento contínuo dos motores elétricos na indústria são práticas fundamentais para assegurar a operação eficiente e confiável desses equipamentos (JOSÉ; BORLIDO; LEITÃO, 2017).

O levantamento feito pelo Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações (2018), indica que a utilização da tecnologia IoT trarão melhorias consideráveis nos processos industriais, podendo resultar em uma economia de 10% a 20% no consumo de recursos energéticos, de 10% a 25% na eficiência da mão de obra e apontam que até 2025 haverá uma redução nos custos de manutenção de equipamentos que varia de 10% a 40%. Além disso, é previsto que os setores que

mais se beneficiarão dos advindos da indústria 4.0 são: automotivo, engenharia mecânica, processos industriais, indústria eletroeletrônica, evidenciando um enorme potencial de aplicação para as indústrias.

Com o avanço da tecnologia Internet das Coisas (IoT), ela vem se consolidando como uma solução eficiente para a indústria, especialmente na manutenção preditiva. Isso possibilita a coleta de dados em tempo real para monitorar e analisar o funcionamento de máquinas e equipamentos, ajudando a identificar falhas antes que causem problemas maiores (JOAQUIM, 2024)

Nesse contexto, torna-se viável a aplicação de um sistema de manutenção preditiva aplicado a motores de indução trifásico com o monitoramento e análise de vibração através de tecnologia IoT de baixo custo.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo desenvolver e implementar um sistema de monitoramento e análise de vibração de baixo custo para motores de indução trifásicos.

1.1.2 Objetivos Específicos

- i. Desenvolver um sistema de obtenção de dados para monitoramento da vibração em motores de indução trifásico.
- ii. Integrar os sensores, microcontrolador e comunicação do sistema de monitoramento.
- iii. Desenvolver a comunicação com um servidor para envio e visualização dos dados na nuvem.
- iv. Analisar e interpretar os dados coletados do motor.

- v. Realizar testes em motores em condições que simulem falhas para validar o sistema.

1.2 JUSTIFICATIVA

Os motores de indução trifásicos são ativos essenciais na indústria devido à sua confiabilidade e capacidade de operar com eficiência em diferentes condições de carga e velocidade. O monitoramento desses motores é crucial para evitar falhas inesperadas, que podem resultar em altos custos de manutenção corretiva e interrupções intermitentes na produção. Manter um sistema de monitoramento adequado pode prolongar a vida útil dos motores e melhorar a eficiência geral dos processos industriais (CHAPMAN, 2013).

A motivação para este trabalho surgiu a partir da observação de um processo de coleta e análise de vibração realizado por uma empresa especializada, que prestava serviços para um centro comercial. Na ocasião, foi utilizado um analisador de vibração da SKF, e percebeu-se que a coleta de dados ocorria apenas uma vez por mês, com os relatórios sendo disponibilizados após a análise dos equipamentos. Embora eficaz, esse modelo apresenta limitações, pois restringe o monitoramento contínuo e o acesso remoto aos dados, exigindo a coleta manual periódica. Diante desse cenário, surgiu a reflexão sobre a viabilidade e os benefícios de um sistema com sensores integrados. Esse sistema seria capaz de monitorar continuamente os equipamentos e acessar remotamente às informações, eliminando a necessidade de coletas manuais e oferecendo uma visão mais detalhada do estado dos ativos. Essa análise fundamenta o desenvolvimento deste trabalho.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 DEFINIÇÃO DA MANUTENÇÃO

Segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), a manutenção é definida como a combinação de todas as ações técnicas e administrativas, incluindo as de supervisão, destinadas a manter ou recolocar um item em um estado no qual possa desempenhar uma função requerida (ABNT, 1994).

Pereira e Sena (2016) Conceituam manutenção como o conjunto das ações que têm por fim executar as operações necessárias para que os equipamentos sejam mantidos ou restabelecidos num estado especificado ou com possibilidade de assegurar um serviço determinado, por um custo global mínimo.

De acordo com a Norma Portuguesa Europeia NP EN 13306 (2007), a manutenção é definida como a combinação das ações técnicas, administrativas e de gestão durante o ciclo de vida do bem, tendo como objetivo mantê-lo ou repô-lo num estado no qual possa executar a função requerida (NORMA PORTUGUESA EUROPEIA, 2007).

2.1.1 Tipos de Manutenção

2.1.1.1 Manutenção corretiva

De acordo com Kardec e Nascif (2009), a manutenção corretiva consiste na intervenção realizada para corrigir falhas ou restaurar o desempenho de um equipamento quando este não atende mais às expectativas. Esse tipo de manutenção, conforme ilustrado na Figura 01, apresenta o maior custo em comparação com outras abordagens de manutenção. Entre os principais fatores que contribuem para esse alto custo, destacam-se: multas contratuais por atrasos na entrega de produtos, desperdício de materiais devido a lotes com baixa qualidade, danos ao próprio equipamento, impactos ambientais, comprometimento da segurança, aumentando o

risco de acidentes, além da possível perda de clientes devido à não entrega dos produtos dentro do prazo estabelecido.

Branco (2008), complementa essa definição ao destacar que a manutenção corretiva envolve a execução de reparos ou ajustes em máquinas que já apresentam falhas. Esse tipo de manutenção pode ser tanto planejado, quando a falha no equipamento não compromete a operação e pode ser programada, quanto não planejado, ou seja, quando a falha ocorre de maneira inesperada e exige uma ação imediata para evitar paralisações prolongadas no processo produtivo da empresa.

A Associação Brasileira de Normas e Técnicas, também define a manutenção corretiva como a manutenção efetuada após a ocorrência de uma pane, destinada a recolocar um item em condições de executar uma função requerida” (ABNT, 1994, p.7).

2.1.1.2 Manutenção Preventiva

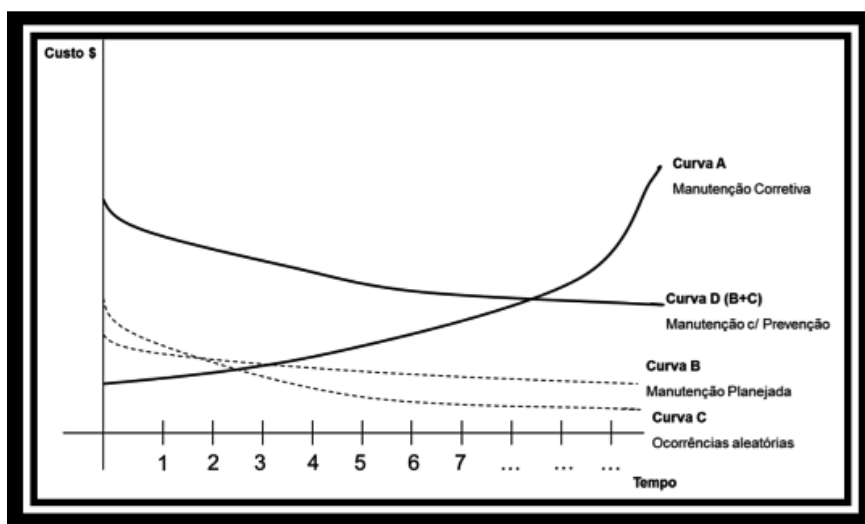
Conforme Kardec e Nascif (2009), a manutenção preventiva consiste em intervenções planejadas com o objetivo de minimizar ou evitar falhas e a perda de desempenho dos equipamentos. Essa abordagem segue um plano previamente estabelecido, no qual as ações de manutenção são realizadas em intervalos de tempo definidos.

De acordo com Branco (2008) , a manutenção preventiva é todo processo de manutenção realizado em máquinas que ainda estão operando, mesmo que apresentem algum defeito. A Associação Brasileira de Normas e Técnicas, define a manutenção preventiva como a manutenção realizada em intervalos predeterminados ou conforme critérios prescritivos, com o objetivo de reduzir a probabilidade de falha ou a degradação do desempenho de um item (ABNT, 1994).

Conforme a Figura 1, ilustra-se a relação entre os custos da manutenção corretiva e preventiva, destacando que a preventiva apresenta um custo menor por realizar inspeções regulares e substituições programadas, prolongando a vida útil dos equipamentos e minimizando despesas com reparos emergenciais. Dessa forma, a

abordagem preventiva se mostra mais eficiente e econômica, garantindo maior confiabilidade e menor impacto financeiro (BRANCO, 2006).

Figura 1 - Comparativo custo-tempo: manutenções corretiva e preventiva.



Fonte: Branco (2006)

2.1.1.3 Manutenção Preditiva

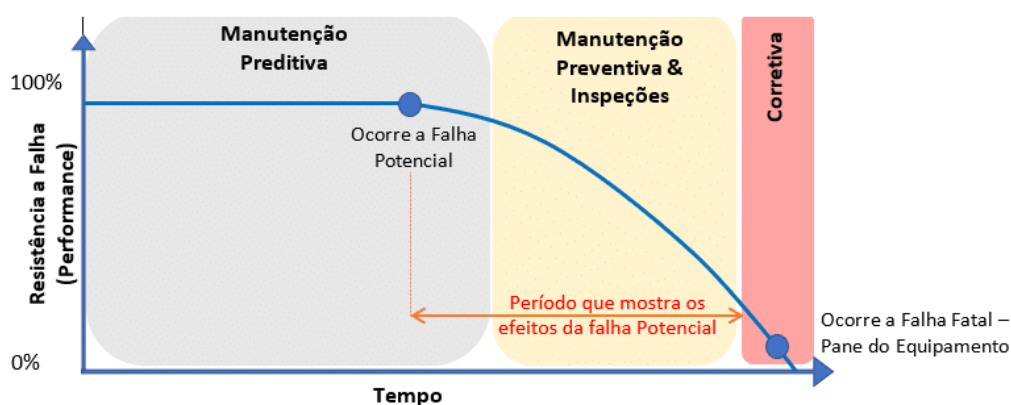
A manutenção preditiva é uma estratégia de manutenção preventiva que se baseia no monitoramento contínuo das condições dos componentes das máquinas e equipamentos. Essa abordagem permite a coleta de dados sobre o desgaste de peças essenciais, possibilitando a previsão do momento ideal para substituições ou reparos, a fim de evitar falhas inesperadas. Entre as principais técnicas utilizadas nessa prática estão a análise de vibrações e o monitoramento de mancais (SENAI-SP, 2000).

Segundo Nascif (2009), a manutenção preditiva consiste no acompanhamento sistemático de parâmetros de condição ou desempenho dos equipamentos, permitindo a detecção antecipada de falhas. Da mesma forma, Verri (2007) destaca que essa estratégia envolve a intervenção em um equipamento ou sistema quando variáveis monitoradas, como temperatura, vibração, emissão de gases ou espessura de chapas, indicam a necessidade de ação, com base em critérios previamente definidos. Além de prevenir falhas inesperadas, a manutenção preditiva reduz o tempo de parada, possibilita intervenções rápidas e programadas e amplia os intervalos entre

manutenções, garantindo maior disponibilidade dos equipamentos e menores custos operacionais.

Conforme a Figura 2, o gráfico da curva de falha potencial, ilustrando o período entre o surgimento de um defeito inicial em um equipamento e sua falha total. Essa curva demonstra a importância da manutenção preditiva, pois permite identificar sinais de desgaste ou anomalias antes que o problema se agrave, possibilitando a intervenção no momento ideal. Com o monitoramento contínuo de variáveis como vibração, temperatura e outros parâmetros, a manutenção preditiva antecipa falhas, reduzindo custos com reparos emergenciais, evitando paradas inesperadas e garantindo maior confiabilidade e disponibilidade dos equipamentos.

Figura 2 - Relação entre a curva de falha potencial e os tipos de manutenção



Fonte: Modularcursos.com/ (2021)

2.2 MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS

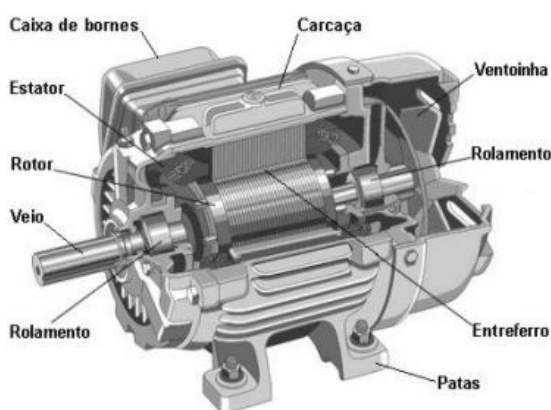
O motor de indução ou motor assíncrono foi patenteado em 1888 por Nikola Tesla e atualmente constitui mais de 90% dos motores utilizados na indústria. Trata-se de uma máquina robusta, de fácil construção e por conseguinte mais barata comparada com outras. Os tipos básicos de motores de indução são os trifásicos e os monofásicos. Os motores de indução monofásicos, normalmente potências baixas, têm grande aplicação, principalmente, em utilização doméstica. Por outro lado, os motores de indução trifásicos são utilizados na maioria dos acionamentos na indústria (FRANCISCO, 2006).

Motores elétricos consistem em máquinas que possuem capacidade de transformar a energia elétrica em energia mecânica. Na indústria, os motores de indução trifásica têm maior destaque na utilização para acionar cargas mecânicas (PETRUZELLA, 2009).

2.2.1 Elementos Constituintes

Conforme a Figura 3, são representados os principais elementos que compõem um motor de indução trifásico, incluindo o estator, onde estão alojados os enrolamentos responsáveis por gerar o campo magnético girante, e o rotor, que reage a esse campo para produzir torque e movimento. Além disso, são mostrados componentes estruturais como a carcaça, que fornece suporte mecânico e proteção. Esses elementos, em conjunto, permitem o funcionamento eficiente do motor (FRANCISCO, 2006).

Figura 3 - Representação dos componentes de um motor de indução trifásico.



Fonte: Francisco (2006)

O estator, componente fixo do motor, é formado por chapas ferromagnéticas empilhadas e isoladas, contendo cavas onde são inseridos os enrolamentos conectados à rede trifásica de corrente alternada. Já o rotor, peça móvel, possui um núcleo ferromagnético e enrolamentos responsáveis pela indução eletromagnética

que gera o movimento. A Figura 4 apresenta separadamente o estator e o rotor, destacando sua construção (FRANCISCO, 2006).

Figura 4 - Estator e rotor de motor de indução trifásico.

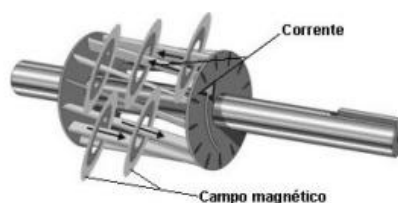


Fonte: www.neocharge.com.br/tudo-sobre/carro-eletrico/motor-como-funciona,(2025)

2.2.2 Funcionamento do Motor Trifásico

De acordo com Francisco (2006), nos motores assíncronos trifásicos, o estator é formado por três eletroímãs dispostos a 120° entre si. Quando percorridos pela corrente trifásica, esses eletroímãs geram um campo magnético girante. Esse campo, ao atravessar o rotor, induz uma força eletromotriz nos condutores da gaiola de esquilo ou do rotor bobinado devido à variação do fluxo magnético. Como os condutores do rotor formam um circuito fechado, eles são percorridos por uma corrente induzida que, segundo a lei de Lenz, se opõe à variação do fluxo que a originou. Consequentemente, o rotor entra em movimento, tentando acompanhar a rotação do campo magnético do estator. A Figura 5 ilustra esse funcionamento, mostrando a interação entre o rotor e o campo girante criado pelo estator. A compreensão desse princípio de funcionamento é essencial para a definição de parâmetros de monitoramento do equipamento, possibilitando a identificação precoce de falhas e o planejamento antecipado de ações corretivas, evitando paradas inesperadas da máquina.

Figura 5 - Funcionamento do rotor em campo magnético girante.



Fonte: Francisco (2006)

2.3 FUNDAMENTOS DE VIBRAÇÕES MECÂNICAS

Conforme Rao (2009), vibração é o movimento oscilatório de um corpo em torno de uma posição de equilíbrio. Esse movimento pode ser causado por forças externas, como um motor girando, ou por perturbações internas, como um desbalanceamento.

2.3.1 Vibração Forçada

De acordo com Rao (2009), um sistema sofre vibração forçada sempre que energia externa é fornecida ao sistema durante a vibração. A força aplicada ou a excitação por deslocamento podem ser harmônicas, não harmônicas, periódicas, não periódicas ou aleatórias por natureza.

A excitação não periódica pode ter uma duração longa ou curta. A resposta de um sistema dinâmico a excitações não periódicas aplicadas repentinamente é chamada de resposta transitória. Uma excitação harmônica ou não harmônica, mas periódica, produzirá uma resposta em estado estacionário enquanto a excitação for aplicada. A resposta de um sistema a uma excitação harmônica também é harmônica e com a mesma frequência de excitação. Na equação 1, é expressa a fórmula para o sistema de vibração forçada.

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = f(t) \quad (1)$$

$m = \text{massa do sistema}(kg)$

$\ddot{x} = \text{aceleração da massa}(\frac{m}{s^2})$

$\dot{x} = \text{velocidade da massa}(\frac{m}{s})$

$k = \text{constante de rigidez}(\frac{N}{m})$

$x = \text{deslocamento da massa apartir da posição de equilíbrio}(m)$

$c = \text{coeficiente de amortecimento viscoso}$

$f(t) = \text{força externa a ser aplicada no sistema}$

2.3.2 Movimento Harmônico Simples

O movimento harmônico simples (MHS) é a forma mais básica de vibração periódica, caracterizada por um restabelecimento linear da posição de equilíbrio, em que a força restauradora é proporcional ao deslocamento ($f = -kx$) e atua sempre em direção ao ponto central, produzindo oscilações senoidais de amplitude constante(A) e frequência angular ($\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$), onde m é a massa e k é a rigidez. O deslocamento do corpo vibrante é descrito pela equação 2, onde φ é a fase inicial do movimento. Essa representação implica que o sistema retorna à mesma posição em intervalos de tempo constantes ($T=2\pi/\omega$), independentemente da amplitude, sendo a base teórica para decompor respostas vibratórias complexas em componentes harmônicas elementares por meio da transformada de Fourier (RAO, 2009).

$$x(t) = A\cos(\omega t + \varphi) \quad (2)$$

$x(t)$ = deslocamento instantâneo do corpo em função do tempo(m)

A = amplitude(m)

w = velocidade angular($\frac{rad}{s}$)

t = tempo(s)

φ = fase inicial (rad)

2.3.3 Amplitude

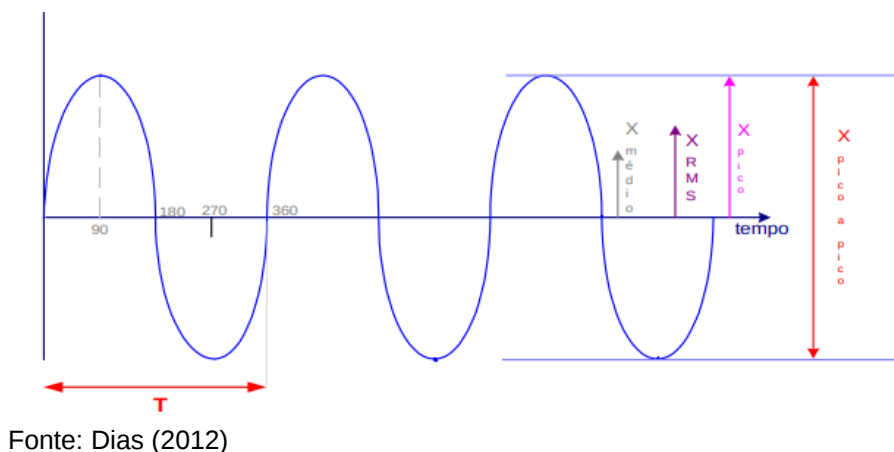
Segundo Rao (2009), as características de vibração, deslocamento, velocidade e aceleração, são diferentes manifestações da amplitude de um sinal vibratório, cada uma fornecendo uma perspectiva única sobre a severidade do fenômeno em análise.

O deslocamento (x) representa o afastamento máximo do corpo em relação à posição de equilíbrio e é particularmente sensível a fenômenos de baixa frequência, sendo medido tipicamente em milésimos de polegada (mils) ou milímetros (mm) (CHU et al., 2024).

A velocidade ($\dot{x}$) quantifica a rapidez com que esse deslocamento varia no tempo, refletindo o transporte de energia vibratória pelo sistema e servindo de indicador preferencial em faixas intermediárias de frequência (10 Hz a 1 kHz). Já a aceleração ($\ddot{x}$) mede a taxa de variação da velocidade, sendo mais adequada para diagnosticar componentes de alta frequência e impactos, pois realça picos abruptos de movimento. Essas três grandezas podem ser expressas segundo diversos parâmetros de amplitude: valor eficaz (RMS), pico (P), pico-a-pico (P-P) ou valor médio, conforme preconizado pela ISO 20816-1:2016, que estabelece critérios de aquisição e limites de severidade baseados no tipo de máquina e na faixa de frequência estudada (RAO, 2009).

Na Figura 6 expressa os principais parâmetros para a amplitude, X_{rms} , X_{pico} e $X_{pico\ a\ pico}$.

Figura 6 - Parâmetros da amplitude.



2.4 MANUTENÇÃO PREDITIVA POR ANÁLISE DE VIBRAÇÃO

A análise de vibração é uma das técnicas mais utilizadas na indústria para monitoramento de equipamentos, permitindo a detecção precoce de falhas e prevenindo a indisponibilidade causada por falhas funcionais durante a operação. A análise de vibração pode variar desde uma simples medição do nível global de vibrações, análise espectral, cepstrum, curtose, fator de crista, envelope e outras. Como é impossível desenvolver uma máquina perfeita, ela está sujeita a possíveis imperfeições durante o processo de fabricação, como folgas, desalinhamentos, desbalanceamentos, que vão gerar as vibrações e/ou ruídos (ANTONIOILLI, 1999).

Segundo LENZI (1991), a análise das vibrações é o mais recomendado para avaliar as condições dinâmicas do equipamento, como balanceamento, estabilidade nos mancais, tensões dinâmicas existentes em componentes, e falhas incipientes em rolamentos e engrenagens, além de identificar desalinhamentos entre eixos e tolerância limite de funcionamento. O autor complementa dizendo que todos os níveis de vibração medidos e analisados podem ser comparados com a especificação do fabricante, a fim de verificar se as medidas estão dentro do limite estabelecido.

Os sistemas de monitoramento de vibrações empregam sensores para converter oscilações mecânicas em sinais elétricos mensuráveis. Esses sensores são posicionados estrategicamente em máquinas para capturar respostas dinâmicas críticas. Os sinais adquiridos são processados por analisadores, gerando conjuntos

de dados que são armazenados para avaliação posterior. Com uma análise especializada, esses dados possibilitam um diagnóstico preciso das condições dos componentes mecânicos, identificando padrões de desgaste, desalinhamento e falhas iminentes (SINGIRESU RAO, 2009).

Os sistemas de monitoramento de vibração podem ser classificados em três níveis tecnológicos, cada um com diferentes capacidades de detecção e diagnóstico. O primeiro nível compreende os medidores de vibração global, que avaliam a amplitude total (RMS) em uma banda larga de frequência, sem discriminação espectral. Esses dispositivos comparam os valores medidos com normas internacionais como ISO 20816, sendo eficazes para alertas genéricos de mau funcionamento, porém incapazes de identificar falhas específicas, como desbalanceamento ou folgas (RANDALL, 2011).

No segundo nível, os medidores com análise de frequência incorporam filtros de banda para isolar componentes dominantes do espectro, como as frequências de engrenagens ou rolamentos, permitindo monitorar parâmetros críticos em faixas pré-definidas (RANDALL, 2011).

Já o terceiro nível engloba analisadores baseados na Transformada Rápida de Fourier (FFT), que convertem sinais temporais em espectros de alta resolução, com filtros de banda estreita, capazes de detectar anomalias sutis, como harmônicos de falhas incipientes ou ressonâncias, essenciais para diagnósticos precisos em máquinas complexas (RANDALL, 2011).

2.4.1 Técnica de Monitoramento da Vibração: Análise no Domínio do Tempo

A análise de vibração no domínio do tempo é uma técnica que usa o tempo do sinal em forma de onda. Durante o processamento e análise dos dados coletados serão observados sinais de anomalias não estáveis ou transitórios. Neste tipo de análise, são observadas características como amplitude, pico, média e forma do sinal, sem considerar o domínio em frequências (SINGIRESU RAO, 2009).

Nesse contexto, uma das formas de se avaliar as vibrações no domínio do tempo é pela norma ISO 20816 que estabelece diretrizes para a avaliação da

severidade das vibrações em máquinas rotativas, especialmente com a utilização do valor eficaz (RMS) da vibração. O valor RMS (Root Mean Square) representa uma medida de energia da vibração e é comumente utilizado como parâmetro principal para a detecção de falhas mecânicas, como desbalanceamentos, desalinhamentos e folgas mecânicas. Conforme a ISO 20816-1:2016 e a 10816-3, são estabelecidos limites de severidade para diferentes faixas de potência e tipos de montagem de motores, permitindo classificar o estado operacional do equipamento em zonas como “Boa”, “satisfatório”, “não satisfatório” e “inaceitável” (ISO 10816-3, 2009; ISO 20816-1, 2016)

Conforme a Figura 7, é representado em uma tabela os limites de vibração baseados nas normas internacionais 20818 e 10816, onde se classificam as vibrações em classe A, B, C E D, sendo A condição boa, B satisfatório, C não satisfatório e D inaceitável.

Figura 7- Limites de vibração com base nas normas ISO 20816-1 e 10816-3.

Power	≤15 kW	>15kW ≤300kW		>300kW ≤50MW	
Mounting	Rigid / Flexible	Rigid	Flexible	Rigid	Flexible
Vibration mm/s RMS	Class A	Class A	Class A	Class A	Class A
1.12	Class B	Class A	Class A	Class A	Class A
1.4	Class B	Class B	Class A	Class A	Class A
2.3	Class B	Class B	Class B	Class B	Class A
2.8	Class C	Class C	Class B	Class B	Class A
3.5	Class C	Class C	Class B	Class B	Class B
4.5	Class D	Class D	Class C	Class C	Class B
7.1	Class D	Class D	Class D	Class D	Class C
11.0	Class D	Class D	Class D	Class D	Class D

Fonte: Brząkała (2025)

Na equação 3, é representada a fórmula para se calcular o valor global de vibração (RMS).

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^{N-1} X_i^2}{N}} \quad (3)$$

N = numero de amostras

X_i = valor individual de cada amostra

2.4.2 Técnica de Monitoramento de Vibração: Análise de Espectro por FFT

A Transformada Rápida de Fourier (FFT, *Fast Fourier Transform*) converte um sinal que está no domínio do tempo para o domínio da frequência. Isso revela quais frequências estão presentes e quais são suas intensidades, facilitando a identificação de componentes específicos do sinal. Em outras palavras, essa técnica, divide o sinal em vários blocos de frequência, medindo o quanto o sinal vibra em cada frequência. Na plotagem gráfica do espectro, o eixo X representa as frequências em (Hz) e no eixo Y representa as amplitudes correspondentes. Cada ponto indica o quanto aquela frequência contribui para o sinal (SKF RELIABILITY SYSTEMS, 2000).

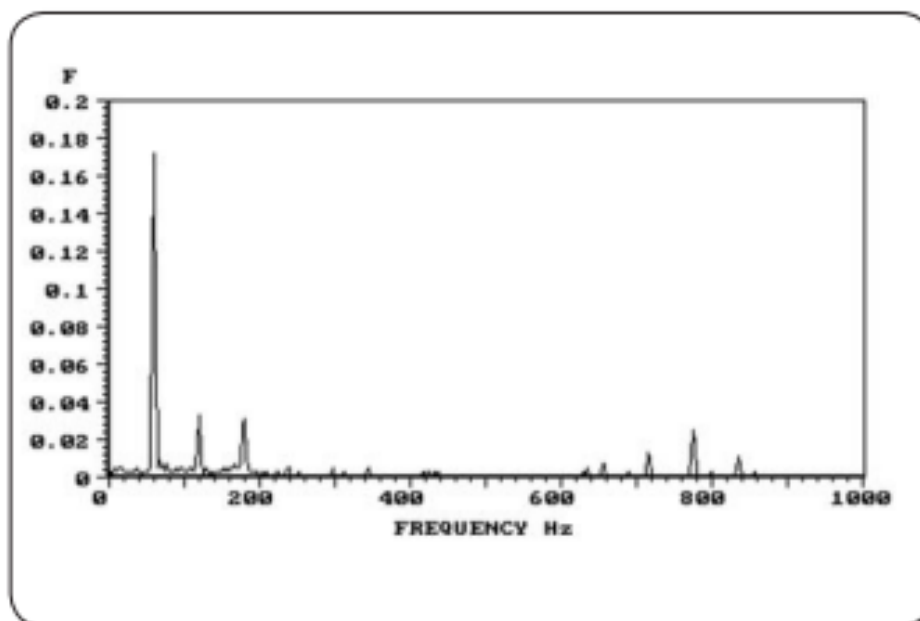
Segundo Rao (2009), espectro de frequência funciona como uma assinatura do equipamento, refletindo não apenas as características de seus componentes, mas também o seu arranjo e as condições de montagem. Um equipamento em seu estado normal de operação vai apresentar um nível vibratório estável, desvios desse padrão simbolizam possíveis falhas. Outro dado importante é que cada componente em máquinas rotativas gera uma frequência identificável, sendo assim a mudança no espectro a uma determinada frequência pode determinar qual componente está apresentando defeito (RAO, 2009).

A resolução espectral depende de quantos pontos FFT e da taxa de amostragem, quanto maior o número de frequências no espectro, maior será a resolução, mais detalhada e precisa será a análise de frequência, permitindo distinguir frequência próximas umas às outras. O gráfico resultante do espectro, representado na Figura 8, mostra as amplitudes de todas as frequências, sendo uma ferramenta essencial em diagnósticos de vibração, análise de sinais e outras diversas aplicações.

É imprescindível que a taxa de amostragem seja adequada para evitar distorções no sinal digitalizado. Segundo o critério de Nyquist exige que a frequência de amostragem seja pelo menos duas vezes a maior frequência contida no sinal; caso contrário, informações sobre o sinal serão perdidas. Se a frequência de amostragem for inferior ao dobro da frequência máxima do sinal analógico, ocorrerá um fenômeno conhecido como aliasing (Meddins, 2000).

Ao realizar o diagnóstico de um equipamento, os espectros de frequência fornecem informações que auxiliam a determinar a localização do problema, a causa e, com o histórico de tendência é possível determinar quando aquele equipamento vai ter sua falha funcional (SKF RELIABILITY SYSTEMS, 2000).

Figura 8 - Gráfico Espectral FFT.



Fonte: Skf Reliability Systems (2000)

Na equação 4, é expressa a fórmula da transformada rápida de Fourier

$$X_k = \sum_{n=0}^{N-1} x_n * e^{\frac{-2\pi i k n}{N}} \quad (4)$$

X_k = Valor da FFT para a frequência associada a k

k = índice da frequência

x_n = valor do sinal original no instante n

i = unidade imaginária

N = número total de amostras

n = índice da amostra no tempo

e = constante de Euler

2.5 PRINCIPAIS FALHAS MECÂNICAS E SEUS ESPECTROS

Nesse tópico, serão abordadas as principais falhas mecânicas em motores de indução trifásica e seus respectivos espectros de vibração FFT, serão apresentadas:

- Falhas por desbalanceamento
- Falhas por desalinhamento
- Falhas por folga mecânica
- Falhas por defeito no rolamento

2.5.1 Desbalanceamento Mecânico em Motores

A falha de desbalanceamento em motores é caracterizada pelo deslocamento do centro de massa em relação ao eixo de rotação, o que indica uma alteração no momento de inércia do sistema. Esse deslocamento compromete a rotação do eixo, gerando vibrações anormais durante o período de funcionamento. Esse tipo de falha pode ter sido originado durante o processo de fabricação, como erros de projeto ou montagem, mas também podem surgir ao longo do tempo, devido ao desgaste da estrutura ou danos causados durante a operação (COSTA, 2011).

O desbalanceamento mecânico é uma das principais causas de falhas prematuras em motores elétricos. Essa falha, ao provocar o deslocamento de centro de massa, gera um aumento na carga dinâmica atuando sobre o motor e seus componentes. Como esses componentes são projetados para operar dentro de uma faixa específica de carga, essa variação pode ocasionar desgastes excessivos e

falhas em partes importantes do sistema, como rolamento e mancais. Além de comprometer o desempenho do motor, o desbalanceamento contribui para o aumento de custos com manutenções corretivas, uma vez que será necessário substituir frequentemente os componentes danificados. Caso a indústria não adote técnicas de manutenção eficiente, principalmente a manutenção preditiva com foco na análise de vibração, essas falhas vão continuar a se repetir, elevando ainda mais os custos operacionais e reduzindo a vida útil do equipamento (GALAR; KUMAR, 2017)

Existem três tipos de desbalanceamento mecânico: estático, acoplado e dinâmico.

- Desbalanceamento estático

Segundo Rao (2000), o desbalanceamento estático ocorre quando o centro de massa do rotor não coincide com seu eixo de rotação, gerando uma força centrífuga perceptível mesmo em condições estáticas. A correção envolve ajustes de massa em um único plano para realinhar o centro de gravidade.

- Desbalanceamento acoplado

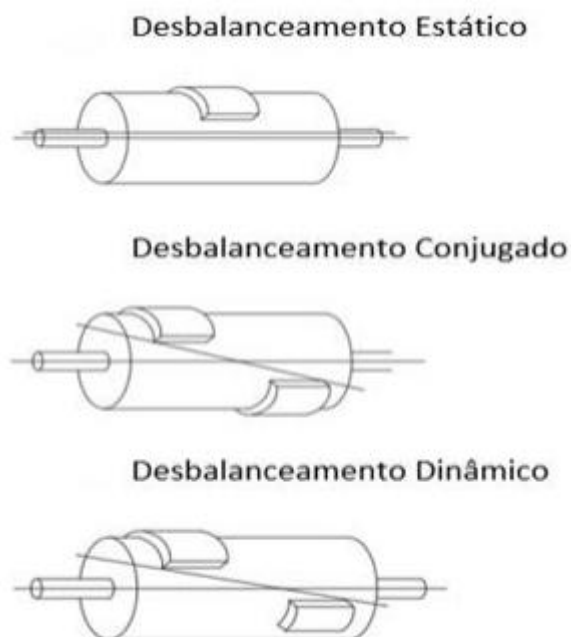
Conforme Friswell (2010), o desbalanceamento acoplado é um fenômeno que surge quando massas desbalanceadas, posicionadas simetricamente em relação ao centro de gravidade, geram momentos opostos durante a rotação. Para neutralizar esse efeito são necessárias correções em dois planos distintos, criando um contramomento equivalente.

- Desbalanceamento dinâmico

De acordo com Ehrich (1992), o desbalanceamento dinâmico combina os efeitos estático e acoplado, sendo predominante em sistemas industriais complexos. Conforme estabelecido pela NBR ISO 21940-11 (2016), que padroniza métodos de balanceamento para diferentes classes de máquinas, a correção desse tipo de desbalanceamento exige obrigatoriamente a utilização de dois planos de correção. Essa exigência se deve à interação entre desalinhamentos e distribuições assimétricas de massa.

Na Figura 9 são representados os três principais tipos de desbalanceamento mecânico em máquinas rotativas.

Figura 9 - Tipos de desbalanceamentos em máquinas rotativas



Fonte: Krey (2015)

2.5.1.1 Diagnóstico de desbalanceamento por meio da análise de vibração

Segundo Skf Reliability Systems (2025), a vibração causada pelo desbalanceamento ocorre sempre no mesmo padrão durante a rotação, ou seja, ela segue sempre na mesma posição angular do rotor a cada volta. Enquanto essa falha estiver presente na máquina, a força centrífuga gerada pelo desbalanceamento estará continuamente presente na rotação do motor. A amplitude dessa vibração cresce proporcionalmente ao quadrado da velocidade de rotação.

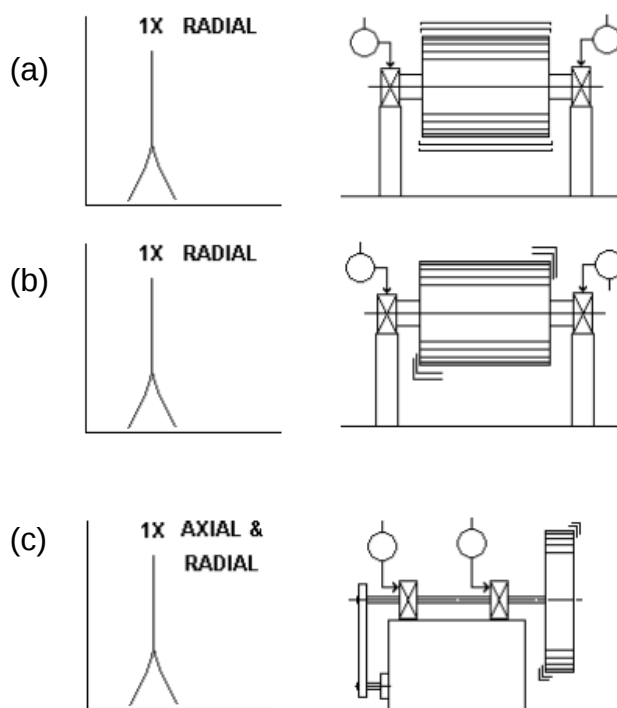
O desbalanceamento estático gera vibrações no sentido radial. Em uma análise espectral por transformada rápida de Fourier (FFT), a componente correspondente a frequência de rotação (1xRPM) estará sempre visível quando houver desbalanceamento, tendendo a ser mais energética e a dominar o espectro.(SKF RELIABILITY SYSTEMS, 2025).

Já o desbalanceamento conjugado, terá também a componente em 1XRPM sempre permanente e dominando o espectro. Essa falha pode gerar vibrações tanto no sentido radial como no sentido axial (SKF RELIABILITY SYSTEMS, 2025).

Por fim, o desbalanceamento dinâmico gera vibrações tanto na direção axial e radial, seus espectros de vibrações são caracterizados por ter um pico dominante em 1XRPM, para realizar as leituras desse tipo de falha é recomendado na direção axial, pois estão em fase entre si, já no radial tende a estar em uma fase instável por misturar componentes estáticos e os de acoplamento (SKF RELIABILITY SYSTEMS, 2025).

Na Figura 10 é representado os tipos de desbalanceamento e seus respectivos espectros de vibrações.

Figura 10 - Espectros dos desbalanceamentos: (a) estático, (b) conjugado, (c) dinâmico.



Fonte: Skf Reliability Systems (2025)

2.5.2 Desalinhamento Mecânico em Máquinas Rotativas

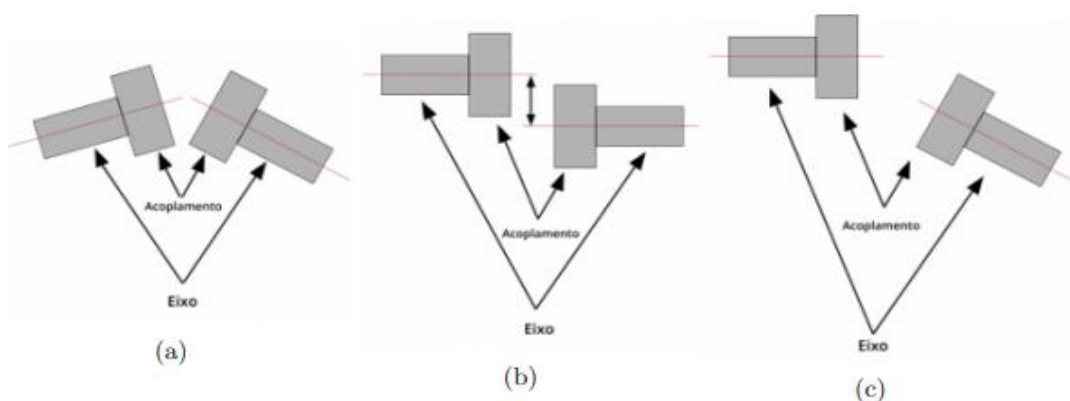
Um dos defeitos mais evidentes em motores é o desalinhamento de eixos, ocorre quando as linhas centrais de dois eixos acoplados não coincidem ao longo do eixo de rotação. Esse efeito pode ocasionar diversos problemas, como alto nível de

vibração, desgaste dos componentes da transmissão, perda de eficiência, entre outros (ABECOM, 2023).

Segundo Braga (2019), o desalinhamento pode ser de três tipos:

- Angular: As linhas centrais dos dois eixos fazem um ângulo entre si, conforme mostrado na Figura 11a;
- Paralelo: As linhas centrais dos eixos estão paralelas ao eixo horizontal do plano, mas deslocados um do outro no sentido vertical do plano, conforme mostrado de forma aumentada na Figura 11b;
- Combinado: A linha central dos eixos encontra-se tanto desalinhados em ângulo como em paralelo, conforme mostrado de forma aumentada na Figura 11a.

Figura 11 - Desalinhamento: (a) angular, (b) paralelo, (c) combinado.



Fonte: Braga (2019)

2.5.2.1 Diagnóstico de desalinhamento por meio da análise de vibração

Conforme SKF Reliability Systems (2025), no desalinhamento angular serão geradas forças de grande amplitude no sentido axial do motor, apresentando defasagem de 180° entre os lados do acoplamento. Na análise espectral, é perceptível

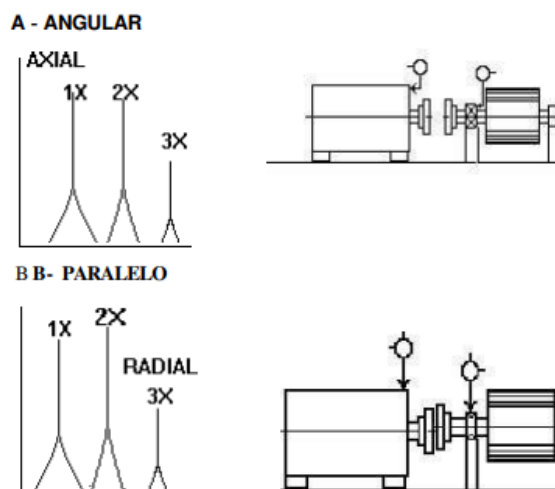
alta vibração no 1XRPM, embora não seja incomum encontrar picos dominantes em 2x RPM e até 3 RPM.

Já o desbalanceamento paralelo, apresenta alta vibração no sentido radial, também com defasagem de 180° através do acoplamento. Na análise espectral dessa falha, costuma-se observar que o pico em 2XRPM supera o de 1XRPM, sendo essa relação entre os picos harmônicos influenciada de acordo com o tipo de acoplamento. À medida que o desalinhamento tanto angular como paralelo se agrava, surgem picos de alta amplitude em harmônicos de ordem superior (4x RPM -8x RPM), muitas vezes associados à folga mecânica.

Por fim, conforme Ehrich (2004), o desalinhamento combinado gera forças vibratórias tanto no sentido axial como no sentido radial. Nesse cenário, a análise espectral revela picos dominantes em 1x RPM e 2x RPM, além de harmônicos de ordem superior até 8x RPM. A fase vibratória apresenta características mistas: no sentido axial, observa-se defasagem próxima a 180° entre os lados do acoplamento, enquanto no radial, a defasagem pode variar conforme a gravidade do desalinhamento paralelo. Estudos experimentais, como os de Patel, Darpe (2009), indicam que a relação entre as amplitudes de 1x RPM e 2x RPM tende a ser menos previsível nesse caso, pois depende da interação entre os modos de flexão, causada pelo desalinhamento paralelo, e torção do eixo, causada pelo desalinhamento angular. À medida que o desalinhamento progride, componentes em 3x RPM e 4x RPM tornam-se mais expressivos.

Na Figura 12 é representado o espectro de vibração dos desalinhamentos angular e paralelo em motores, pode-se notar que o angular é detectado por análise da vibração no sentido axial e o paralelo no sentido radial, já no caso de um desalinhamento combinado seria a junção dos dois espectros com detecção tanto na radial quanto no axial (SKF RELIABILITY SYSTEMS, 2025).

Figura 12 - Espectro de vibração para desalinhamento angular e paralelo.



Fonte: Skf Reliability Systems (2025)

2.5.3 Folga Mecânica em Máquinas Rotativas

As folgas mecânicas em motores de indução trifásicos representam um fator crítico para o desempenho e a confiabilidade dessas máquinas. Conforme Bonnett (1992), folgas excessivas em componentes como mancais, acoplamentos ou entre rotor e estator induzem vibrações anormais, desalinhamentos e perdas de eficiência energética. Tais folgas geralmente surgem devido a imperfeições de fabricação, desgaste operacional, deformações térmicas ou montagem inadequada, comprometendo a vida útil do motor.

De acordo com a norma ISO 286 (2010), que define sistemas de tolerâncias e ajustes, as dimensões reais dos componentes mecânicos sempre apresentam variações em relação às nominais. Bloch (2012), ressaltam que, durante a operação, cargas dinâmicas e expansão térmica podem ampliar folgas inicialmente mínimas, gerando impactos repetitivos entre peças. Além disso, conforme Nasar, Unnewehr (1983), por a falta de rigidez na estrutura do motor, associada a materiais de baixa resistência ao desgaste, acelera a degradação de componentes.

Para Bernard J e Hamrock (2005), folgas em mancais de rolamento, por exemplo, alteram a rigidez do sistema, permitindo movimentos relativos entre o eixo e o estator. Conforme Tavner et al. (2010), em casos mais graves, a folga no entreferro, pode causar atrito entre os componentes, elevando o consumo de energia e danificando o isolamento elétrico.

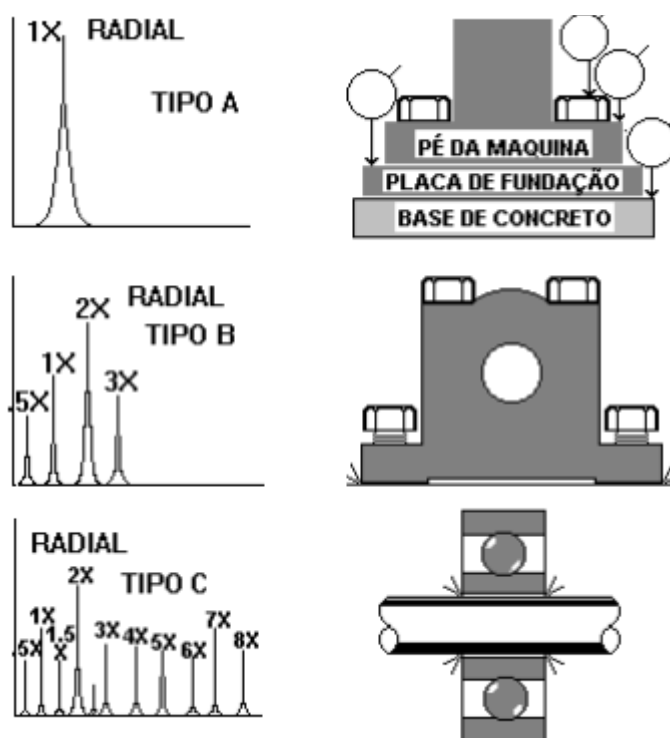
2.5.3.1 Diagnóstico de folga mecânica por meio da análise de vibração

De acordo com Skf Reliability Systems (2025), são caracterizados três tipos de espectros de frequência relacionados à folga mecânica, o tipo A, B e o C. A vibração gerada por esse tipo de falha é identificada no sentido radial do motor.

- O tipo A é causado por folgas nos apoios do equipamento – base, pés e fundação. O espectro gerado por esse tipo de falha tem um padrão, onde fica evidenciado um pico dominante em 1XRPM e apresenta uma discrepância de 180° entre as fases.
- O tipo B é causado por parafusos soltos na base do equipamento ou trincas na estrutura de sustentação. O espectro gerado por esse tipo de falha é definido por picos dominantes em 1XRPM, 2 X RPM e 3 X RPM; além disso, aparecem sub-harmônicos de 0,5 x RPM.
- O tipo C é causado pela folga entre os componentes do motor que precisam resistir às forças dinâmicas do rotor, como folga nos mancais, bucha ou rotor. No espectro desse tipo de falha é evidenciado por diversos harmônicos (1XRPM até 8 X RPM) e pela presença múltiplos sub-harmônicos em 0,5 x RPM ou 1,5 x RPM.

Na Figura 13 são representados os espectros de frequência para cada tipo de falha por folga mecânica.

Figura 13 - Representação das falhas por folga mecânica e seus espectros.



Fonte: Skf Reliability Systems (2025)

2.5.4 Falha em Mancais de Rolamentos em Máquinas Rotativas

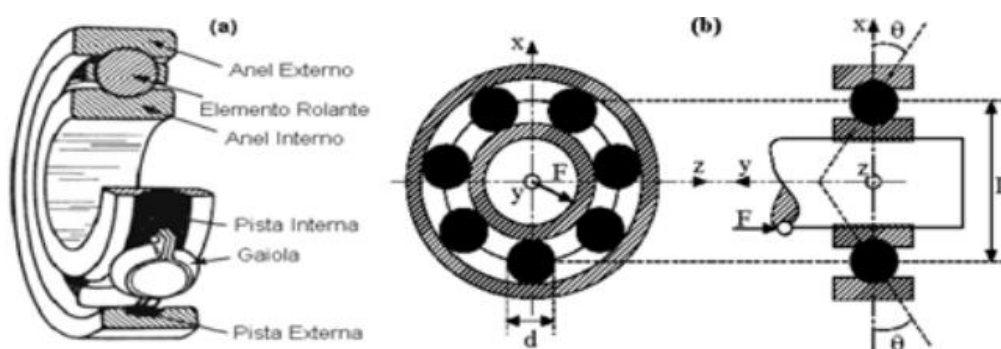
Os mancais de rolamento são componentes críticos em máquinas rotativas, responsáveis por suportar cargas radiais e axiais e manter o desalinhamento mínimo entre partes móveis (BELLINI et al., 2008). Devido à sua alta velocidade de operação e ao contato metal-metal, os rolamentos estão sujeitos a processos de fadiga superficial e subsuperficial, que iniciam microfissuras e provocam degradação ao longo do ciclo de vida do componente (PENG; CHU; HE, 2002).

Além do desgaste natural, fatores externos como lubrificação deficiente contribuem para o surgimento de falhas prematuras, ao não formar filme oleoso protetor entre as esferas e as pistas (BONNETT; SOUKUP, 1991). Como consequência, motores que operam com mancais danificados apresentam aumento

de ruído, maiores níveis de vibração e elevação contínua da temperatura de operação (CERRADA et al., 2018,LIU; BAZZI, 2017).

Conforme a Figura 14, as principais componentes de um mancal de rolamento são: pista externa, gaiola, elementos rolantes e pista interna (Gordo; Ferreira, 2025)

Figura 14 - (a) componentes de um rolamento; (b) dimensões do rolamento.



Fonte: (Brie, 2000)

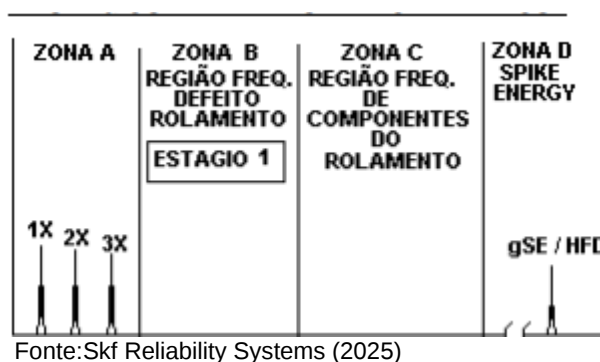
As principais falhas em mancais de rolamentos são:

- **Fadiga de Contato:** É o mecanismo de falha mais recorrente em rolamentos. Sob ciclos repetidos de carga, formam-se microtrincas na subsuperfície, que crescem até se manifestarem na superfície como trincas visíveis. A vida útil do componente depende, sobretudo, da magnitude e da variabilidade das cargas aplicadas(EL HACHEMI BENBOUZID, 2000,BELLINI et al., 2008).
- **Falhas por Lubrificação Inadequada:** A falta ou contaminação do lubrificante impede a formação de filme lubrificante hidrodinâmico, resultando em contato entres as partes do rolamento e desgaste dos componentes (BONNETT; SOUKUP, 1991).
- **Sobrecarga Mecânica:** Sobrecargas radiais ou axiais excessivas geram esforços plásticos nas pistas e nas esferas, levando à deformação do metal e formação de cavitação (NEUPANE; KIM; SEOK, 2021).

2.5.4.1 Diagnóstico de falha em mancais de rolamentos de máquinas rotativas

Segundo Skf Reliability Systems (2025) , existem quatro estágios de falhas em rolamentos. O primeiro estágio de falhas em rolamentos é definido como etapa de falha inicial, onde o rolamento mostra os primeiros sinais de falhas, nesse estágio as falhas são identificadas em frequências ultrassônicas acima de 20 kHz. Essas frequências são avaliadas através Spike Energy (gSE), medida da amplitude de pico do envelope de choques de alta frequência, expressa em múltiplos da aceleração da gravidade (g); High Frequency Detection (HFD), um canal de medição que isola vibrações de alta frequência, retifica o sinal e extrai seu envelope, convertendo a energia dos choques resultantes em um valor em g; Shock Pulse (dB), medição da intensidade dos pulsos de choque em rolamentos, obtida filtrando-se uma faixa estreita de alta frequência, extraíndo-se o envelope dos picos e expressando-o em decibéis. No primeiro estágio, os picos chegam a 0,25 gSE, podendo variar a depender do ponto de medição. Na Figura 15 é representado o espectro das frequências durante o primeiro estágio.

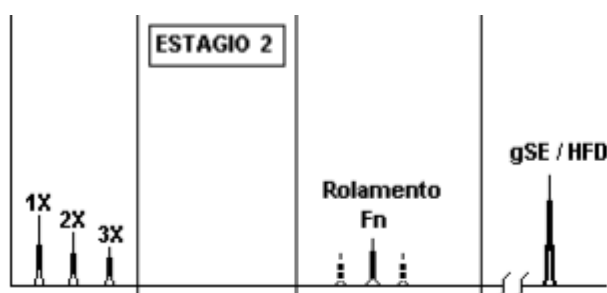
Figura 15 - Espectro de falha em rolamentos no estágio 1.



O segundo estágio das falhas é determinado por pequenas fissuras, início de cristas ou rachaduras no anel ou nos roletes. O defeito cria bandas laterais pela modulação das amplitudes em volta da frequência natural dos componentes do rolamento. Esse estágio acontece entre 30 KHz a 120 KHz e o parâmetro Spike

Energy dobra, por exemplo, de 0,25 gSE para 0,5 gSE. Na Figura 16 é representado o espectro das frequências durante o segundo estágio.

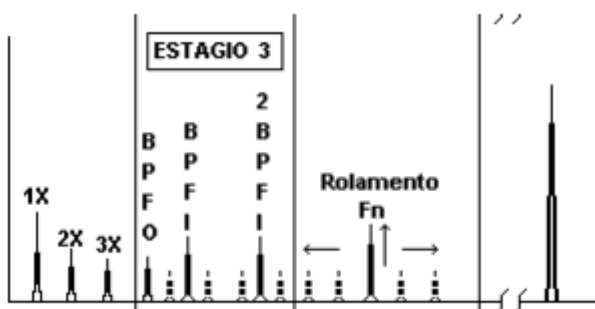
Figura 16 - Espectro de falha em rolamentos estágio 2.



Fonte: Skf Reliability Systems (2025)

No terceiro estágio, surgem as frequências de falhas no rolamento e seus harmônicos. Quanto maior o desgaste do componente, aparecem mais harmônicos da frequência e aumentam as bandas laterais, ambas em volta da frequência natural do rolamento e da frequência de defeito. Os picos de gSE continuam a aumentar nessa etapa, chegando a passar de 1 gSE. O desgaste agora é visível no rolamento, sendo possível inspecionar e identificar o dano, recomenda-se nesse estágio a substituição do rolamento. Na Figura 17 é representado o espectro das frequências durante o terceiro estágio.

Figura 17 - Espectro de falhas em rolamentos no estágio 3.



Fonte: Skf Reliability Systems (2025)

A equação 5, 6, 7 e 8 caracterizam os cálculos para encontrar as frequências de falhas em rolamento que serão visíveis no estágio três, a frequência de rotação

dos elementos de rolamento depende do tipo de falha e da geometria do rolamento, com isso:

$$f_{BPFO} = \frac{n}{2} * f_r * (1 - \frac{d}{D} \cos \beta) \quad (5)$$

$$f_{BPFI} = \frac{n}{2} * f_r * (1 + \frac{d}{D} \cos \beta) \quad (6)$$

$$f_{BSF} = \frac{D}{2 * d} * f_r * (1 - (\frac{d}{D}) * \cos \beta)^2) \quad (7)$$

$$f_{FTF} = \frac{1}{2} * f_r * (1 - (\frac{d}{D}) * \cos \beta) \quad (8)$$

n = numero de corpos rolantes

d = diâmetro dos corpos rolantes

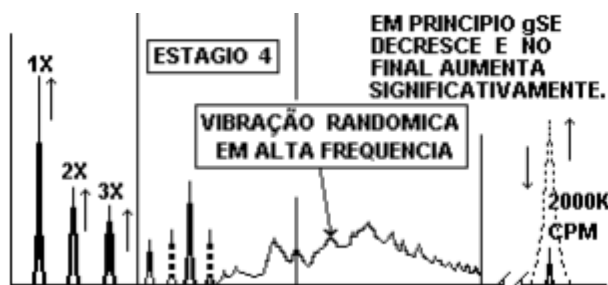
D = diâmetro primitivo do rolamento

β = ângulo de contato

f_r = frequencia de rotação do eixo

No quarto estágio, a falha no rolamento afeta a frequência de rotação (1XRPM), que apresenta um aumento significativo na amplitude e normalmente surgem vários harmônicos da velocidade de rotação. Os sinais limpos com os picos bem definidos desaparecem nesse estágio, pois o espectro fica preenchido por ruídos de alta frequência. Quando o rolamento se aproxima da falha funcional, os componentes que fazem parte do rolamento começam a se soltar, rachar ou colapsam internamente. Essa degradação dos componentes pode resultar no desaparecimento de certas frequências, ocasionando a diminuição da vibração global, podendo dar uma falsa impressão acerca do estado do equipamento, porém pouco antes do rolamento colapsar totalmente é possível observar altos níveis de aceleração gSE, esse será o último aviso antes do travamento total do rolamento. Na Figura 18 é representado o espectro das frequências durante o quarto estágio.

Figura 18 - Espectro de falha em rolamento no estágio 4.



Fonte: Skf Reliability Systems (2025)

2.6 INTERNET DAS COISAS (IOT)

Atzori; Iera; Morabito (2010), definem IoT como um novo padrão no qual objetos físicos, dotados de identificação única, capacidades de comunicação e, frequentemente, de processamento inteligente, se conectam à Internet, permitindo a troca contínua de dados e a automação de processos em ambientes tão diversos quanto cidades, indústrias e residências.

Gubbi et al. (2012), conceitua IoT como uma rede de sensores e atuadores que se integra de forma contínua ao ambiente, compartilhando informações em plataformas de nuvem para criar uma visão operacional comum. Segundo esses

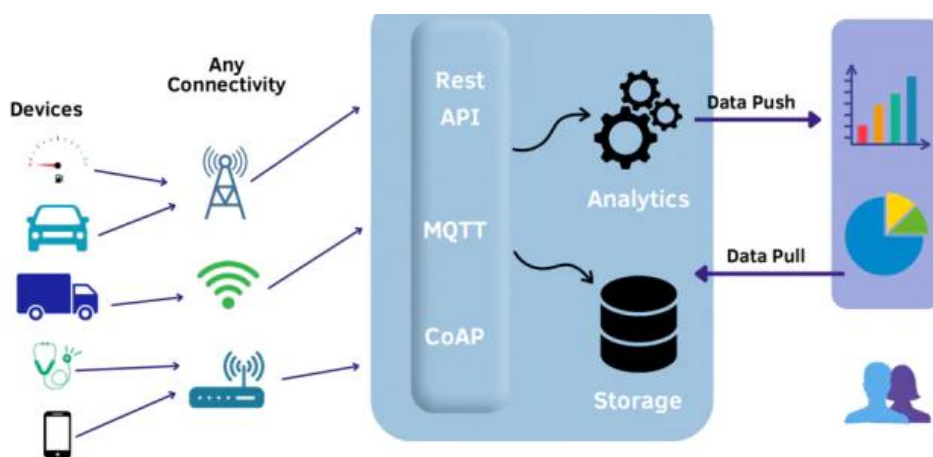
autores, o IoT surge da convergência de tecnologias como RFID, NFC e redes de sensores sem fio, promovendo universal captação de dados e permitindo que sensores e atuadores se misturem ao nosso entorno, com as informações sendo compartilhadas entre diferentes plataformas a fim de desenvolver uma visão operacional comum.

2.6.1 Arquitetura IoT

Segundo Mrabet et al. (2020) os sistemas IoT são divididos em várias camadas claras: começando com a camada de percepção, onde sensores e atuadores capturam dados do mundo real; seguindo pela camada de rede, que leva esses dados para frente; depois a camada de dados e serviços em nuvem, na qual entram os bancos de dados, responsáveis por armazenar grandes volumes de informação e processá-los em tempo real; e, por fim, a camada de interface, que apresenta resultados aos usuários de forma simples e direta.

Na Figura 19 é apresentada uma representada de arquitetura IoT, onde os dispositivos que estão conectados a camada de rede, enviam dados para algum serviço na nuvem que armazena e analisa, para depois estar disponível na camada de interfase, que seria a aplicação final que entra em contato direto com o usuario.

Figura 19 - Diagrama de arquitetura IoT.



Fonte: Sayanekar (2024)

2.6.2 Sensor

Conforme Wendling (2010), sensor é um termo empregado para designar dispositivos sensíveis à alguma forma de energia do ambiente que pode ser luminosa, térmica, cinética, relacionando informações sobre uma grandeza física que precisa ser mensurada, como: temperatura, pressão, velocidade, corrente, aceleração, posição, etc.

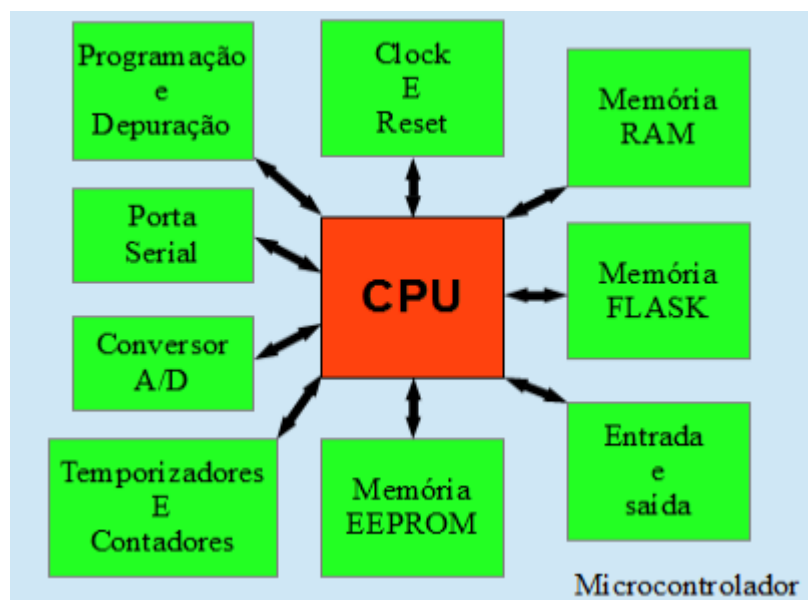
Segundo Fraden (2010), sensores podem ser classificados pelo princípio de transdução em diferentes grupos: mecânicos (como strain gauges e acelerômetros), térmicos (termopares e RTDs), ópticos (fotodiodos e sensores de fibra óptica), químicos (sensores eletroquímicos) e biológicos, cada um com características próprias de sensibilidade, faixa de operação e tempo de resposta.

2.6.3 Microcontroladores

De acordo com Kerschbaumer (2013), o microcontrolador é composto por circuitos integrados que possuem em seu interior todos os componentes necessários para o seu funcionamento, dependendo unicamente da fonte de alimentação externa. Na Figura 20 ilustra-se os componentes presentes em um microcontrolador.

Um sistema microprocessado é composto por uma unidade central de processamento CPU e um conjunto de periféricos necessários para o seu funcionamento. Dentre estes periféricos podemos destacar a memória de dados, a memória de programa e o circuito de clock. Os microcontroladores diferem dos sistemas tradicionais por já integrarem os seus periféricos dentro do próprio componente (KERSCHBAUMER, 2013).

Figura 20 - Componentes de um microcontrolador.



Fonte: Kerschbaumer (2013)

Os microcontroladores são muito utilizados pela sua versatilidade, pois seu comportamento depende principalmente do *software* que nele é gravado. Assim um mesmo microcontrolador pode ser utilizado para uma infinidade de aplicações bastando apenas mudar o seu *software*. Outra vantagem é a possibilidade de atualização de um produto através da atualização do *software*, o que não é possível com circuitos analógicos ou digitais tradicionais.

Na Figura 21 é expressa por meio de tabelas a comparação entre os diferentes tipos de microcontroladores.

Figura 21 - Tabela comparativa entre microcontroladores.

Chip (Módulo)	Arduino UNO	PIC 18F4520	ESP32 (ESP-WROOM-32)	Kit DSP - TMS320F28379D	FPGA-BeMicro Max 10
DETALHES:					
Arquitetura de processamento – CPU	Atmel AVR – 8Bit – Harvard	Harvard	Tensilica X tensa LX6 32 bit Dual-Core e 160/240 MHz – Harvard	2x C28x 2x CLA Harvard - 32Bit	Processamento paralelo/ Sequencial
SRAM	2 kb	1,5 kb	520 KB	–	–
FLASH	32 kb	32 kb	2MB (máx. 64MB)	1024 kb	256 kb
Clock máx. (MHz)	16	40	160/240	200	50 (pode-se multiplicar ou dividir)
Tensão	5 V	3,3 V	2,2 V à 3,6 V	3,3 V	3,3 V
Corrente de operação	40 mA	20 mA	80 mA	20 mA	20 mA
Programação	C, C++ e Wiring	Assembly	Free (C, C++, Lua, etc.)	C, C++ e Assembly	VHDL, HDL, verilog, binária
Código aberto	Sim	–	Sim	–	–
CONECTIVIDADE:					
Wi-Fi	–	–	802,11 b/g/n	–	–
Bluetooth	–	–	4.2 BR/EDR + BLE	–	–
UART	Sim	Sim	3	Sim	–
E/S					
GPIO	14	36	32	97/169	250
SPI	Sim	Sim	4	3	6
I2C	Sim	Sim	2	2	4
PWM	6	Sim	8	24	–
ADC	6 (10-bit)	13(10-bit)	18 (12-bit)	4 (12/16-bit)	18 (12-bits)
Frequência Max. de conversão ADC	0,2 MSPS	-	2 MSPS	3,5 MSPS	1 MSPS
DAC	2	Sim	2 (8-bit)	3	Sim (8-bits)
Tamanho(mm)	68x53x10	53x16x5	25,5x18,0x2,8	130x59x11	90x48x11,6

Fonte: Maier; Sharp; Vagapov (2018)

2.6.4 MQTT

O Message Queue Telemetry Transport (MQTT) é um protocolo de comunicação leve baseado em mensagens, é ideal para conexão que tenham pouca largura de banda, alta latência ou redes instáveis, além disso tem como requisitos baixo consumo de energia, aumentando o tempo que o microcontrolador ficara ativo sem a intervenção para a troca de bateria, por conta disso é o protocolo mais utilizado em sistemas IoT (HIVEMQ, 2024).

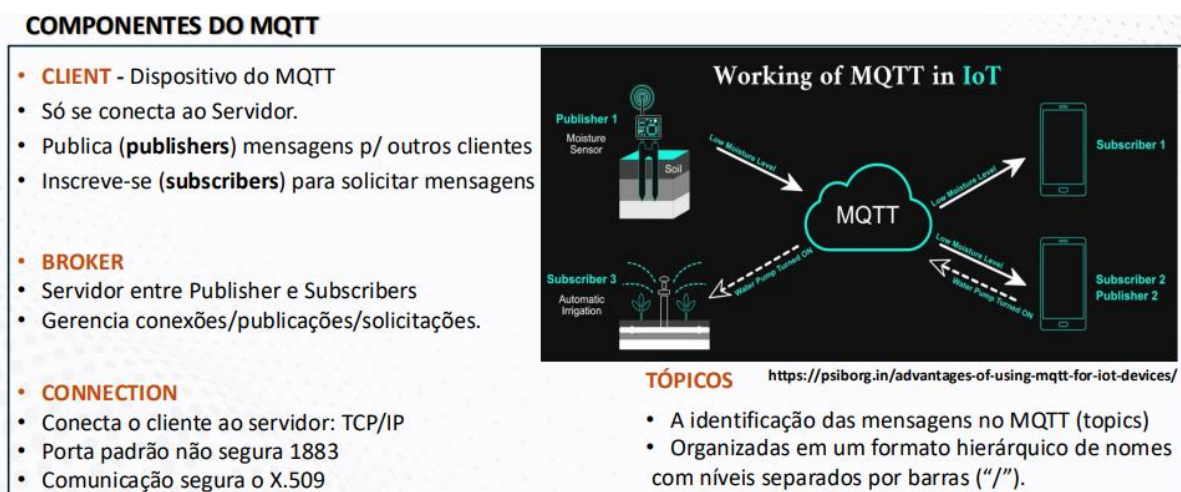
A Organization for the Advancement of Structured Information Standards (OASIS, 2019), define o MQTT como um protocolo publish/subscribe, com cabeçalhos reduzidos para otimizar o uso de rede em ambientes de baixa largura de banda. Além disso, o protocolo oferece três níveis de Qualidade de Serviço (QoS 0, 1 e 2), permitindo ao desenvolvedor escolher entre comunicações não confirmáveis, ao menos uma vez ou exatamente uma vez, conforme as necessidades de confiabilidade

O MQTT adota um modelo de publicação/assinatura que separa os emissores (publishers) dos receptores (subscribers) por meio de um elemento central, o broker, que funciona como um gerenciador de mensagens e encaminha as mensagens com base em “tópicos” organizados em níveis. Existem apenas três entidades fundamentais no protocolo (HIVEMQ, 2024):

- **Publisher:** cliente que publica mensagens em um tópico específico.
- **Subscriber:** cliente que se inscreve em tópicos de interesse e recebe mensagens passivamente.
- **Broker:** servidor central que recebe publicações, filtra pelos tópicos correspondentes e encaminha as mensagens aos assinantes adequados.

Na Figura 22, está representada a estrutura organizacional do protocolo MQTT

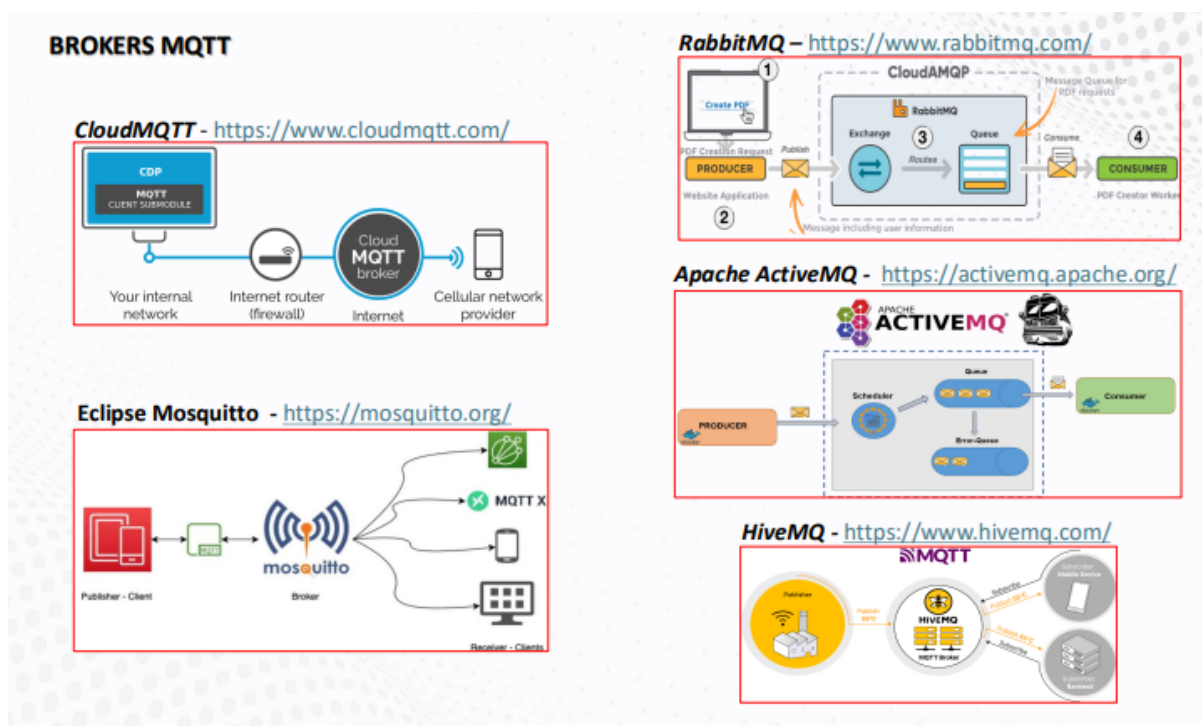
Figura 22 - Exemplo de agricultura inteligente baseado em IoT e MQTT.



Fonte: Gupta (2025)

Na Figura 23, são apresentados os principais brokers utilizados no protocolo MQTT.

Figura 23 - Principais brokers utilizados para MQTT.



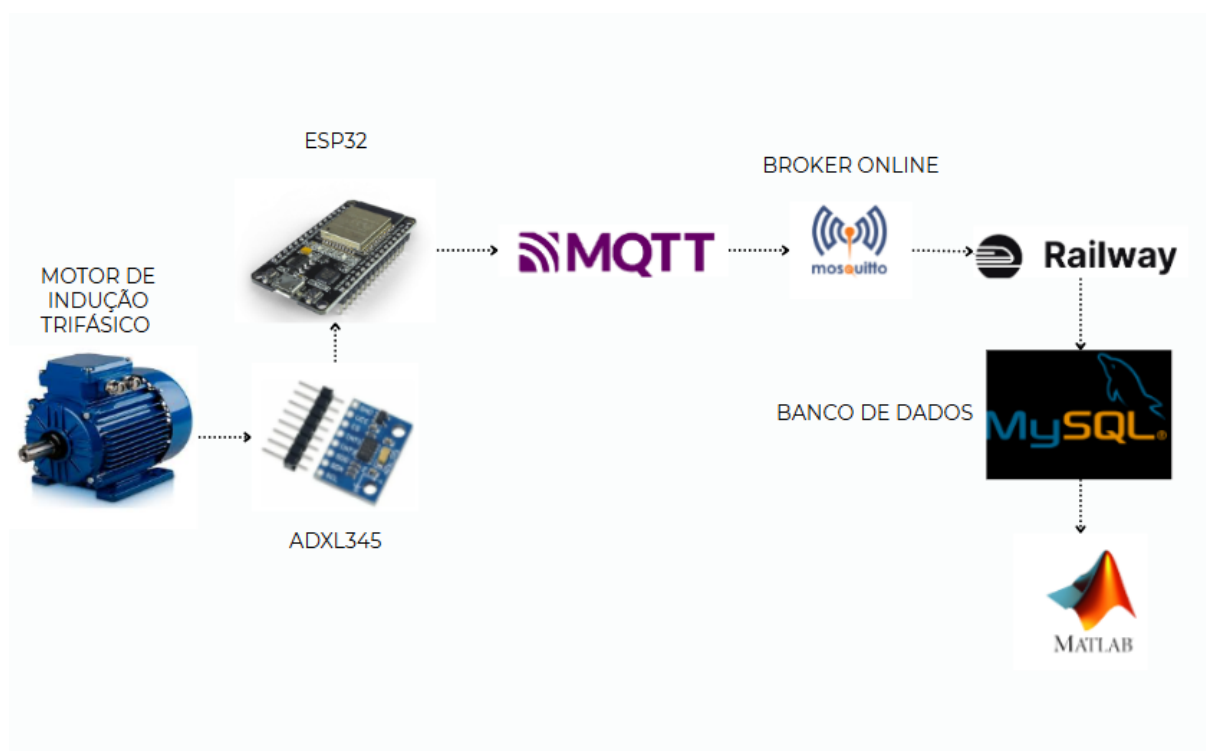
Fonte: Embarcotech (2024)

3 MATERIAS E MÉTODOS

Neste tópico serão abordados os materiais e métodos utilizados no desenvolvimento desse trabalho. Descrevendo a ordem de execução e o que cada etapa representa no projeto.

Para auxiliar a visualização, a Figura 24 representa o diagrama de funcionamento de todo o sistema de monitoramento e análise de vibração desenvolvido neste trabalho.

Figura 24 - Diagrama do sistema de monitoramento de vibração.



Fonte: Autoria própria (2025)

O sistema consiste em instalar sensores em três pontos do motor, todos no lado acoplado: um no sentido radial vertical, outro no sentido radial horizontal e o terceiro no lado axial, ao longo do eixo. Esses sensores coletam acelerações nos três eixos (X, Y e Z) a 800 amostras por segundo. A cada cinco medições, o microcontrolador armazena os valores e envia o pacote ao Mosquitto Broker. Durante esse processo, o serviço Railway se inscreve para receber as mensagens do broker e, sempre que uma chega, registra os dados em uma tabela MySQL. Posteriormente,

esses dados são baixados em formato planilha (CSV) e analisados num algoritmo em MATLAB, que interpreta os resultados e gera o diagnóstico do motor.

Esse trabalho foi desenvolvido para diagnosticar as seguintes condições de vibração:

- Desalinhamento;
- Desbalanceamento;
- Folga mecânica;
- Falhas de rolamentos;
- Nível elevado de vibração (RMS).

3.1 DEFINIÇÃO DE *HARDWARE*

3.1.1 Microcontrolador ESP32

O ESP32, representado na Figura 26, foi selecionado para este trabalho em função de sua excelente relação custo-benefício, do baixo consumo de energia, essencial para sistemas embarcados, e da elevada capacidade de processamento, muito útil para projetos mais complexos que envolvam um alto volume de tráfego de dados e operações matemáticas (ESPRESSIF SYSTEMS, 2025).

Figura 25 - Microcontrolador ESP32.



Fonte: Ardurobotica (2025)

3.1.2 Acelerômetro ADXL345

O ADXL345 é um acelerômetro triaxial que é utilizado para medir tanto a aceleração estática da gravidade quanto a aceleração dinâmica resultante do movimento, ele pode se comunicar via I2C e SPI, permitindo uma fácil interação com os microcontroladores (ANALOG DEVICES, 2013).

Nesse trabalho, emprega-se o barramento serial I2C para a leitura dos valores de aceleração do motor, permitindo que esses dados sejam usados posteriormente para análise de vibração e detecção de falhas.

Na Tabela 1, serão representadas as especificações do sensor, onde a principal vantagem dele em relação a outros sensores é a frequência de aquisição máxima de 3200 Hz que permite ter uma coleta de dados mais abrangente, podendo assim identificar falhas em alta frequência (ANALOG DEVICES, 2013).

Tabela 1 - Especificações do acelerômetro ADXL345.

Alimentação e energia	2,0 a 3,6 VCC
Frequência de aquisição máxima	3200 Hz
Frequência de aquisição utilizada	800 Hz
Consumo de energia	23 μ A
Interface	SPI/I2C
Quantidade de eixos	3
Sensibilidade	± 2 g/ ± 4 g/ ± 8 g/ ± 16 g

Fonte: Analog Devices (2013)

A conexão de pino foi feita de acordo com o protocolo de comunicação serial I2C (SDA, SCL, VCC e GND), conforme detalhado na Tabela 2.

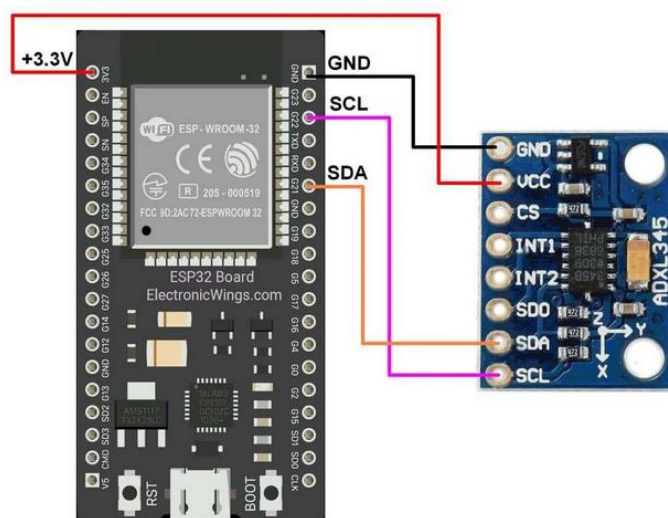
Tabela 2 - Conexão do ESP32 com o acelerômetro ADXL345.

ESP32	ADXL345
VCC	VCC
GND	GND
G21	SDA
G22	SCL

Fonte: Autoria própria (2025)

Na Figura 25, representando o diagrama da interface do sistema, que integra o ESP32 e o ADXL345.

Figura 26 - Diagrama da interface do ESP32 com o ADXL345.



Fonte: Autoria própria (2025)

Esse dispositivo coleta os dados de aceleração nos três eixos X, Y e Z, sendo esses dados enviados via Wi-Fi, pelo protocolo de comunicação MQTT para o Mosquitto Broker.

3.2 COMUNICAÇÃO DOS DISPOSITIVOS IOT

A comunicação entre os dispositivos desse projeto ocorre por meio de diferentes protocolos, garantindo a coleta e o envio dos dados. Os principais protocolos utilizados são I2C, Wi-Fi e MQTT, cada um desempenhando um papel na integração entre o sensor, microcontrolador e servidor.

3.2.1 Comunicação I2C (*Inter-Integrated Circuit*)

O protocolo I2C é utilizado para a comunicação entre o ESP32 e o sensor de vibração ADXL345. Esse protocolo permite a transmissão de dados utilizando apenas duas linhas:

- *SDA (Serial Data Line)* – linha de dados.
- *SCL (Serial Clock Line)* – linha de *clock*.

A escolha do I2C se deve à sua simplicidade e eficiência na comunicação com sensores, permitindo que o ESP32 receba as medições da aceleração em tempo real sem necessidade de muitos pinos de conexão.

3.2.2 Comunicação Wi-Fi

O ESP32 se conecta à rede local por meio de Wi-Fi, possibilitando o envio dos dados de aceleração para um servidor remoto. A comunicação via Wi-Fi foi selecionada para esse projeto pois oferece as seguintes vantagens (SILVA, 2024):

- Baixo custo de infraestrutura, aproveitando redes já existentes.
- Alta taxa de transmissão, garantindo a atualização contínua dos dados.
- Facilidade de integração com serviços em nuvem.

A configuração da conexão Wi-Fi é realizada por meio da biblioteca `WiFi.h`, permitindo que o ESP32 estabeleça a comunicação com o broker MQTT.

3.2.3 Comunicação MQTT (*Message Queuing Telemetry Transport*)

O protocolo MQTT é utilizado para a transmissão dos dados coletados pelo sensor para um servidor remoto. O ESP32 atua como um cliente MQTT, enviando periodicamente os valores para um broker MQTT, que, neste caso, é o Mosquitto Broker.

Optou-se pelo protocolo MQTT devido às suas características que se adequam perfeitamente a esse projeto, possui uma baixa latência e nível de Qualidade do Serviço (QoS0) que dificulta a perda de pacotes. Além disso ele é ideal para condições onde a rede Wi-Fi é instável, para esse projeto esse fator é muito importante, pois os motores ficam localizados em regiões de difícil acesso dentro da empresa e por vezes a rede de internet pode sofrer oscilações devido às interferências na localização.

3.3 DEFINIÇÃO DE SOFTWARE

O uso de *softwares* foi imprescindível para o desenvolvimento desse trabalho. O código foi desenvolvido com o programa Arduino IDE, que é utilizado para fazer a importação do código na placa (ESP32). O código foi projetado para executar a aquisição, e transmissão dos dados coletados pelo sensor ADXL345, garantindo comunicação eficiente com o Mosquitto Broker via protocolo MQTT.

Além disso, foi desenvolvido um script em python que é executado usando o programa Railway, que roda o código continuamente, sem precisar de intervenção para inicializá-lo. No Railway o código executado, coleta os dados enviados para o broker e armazena em no banco de dados (MySQL). Esses dados foram baixados no formato CSV que posteriormente foram analisados usando as ferramentas matemáticas do MATLAB.

No MATLAB foi desenvolvido um algoritmo que ao importar o arquivo CSV ele faz o tratamento e processamento dos dados. Quando o MATLAB termina de executar o código ele plota os principais gráficos da análise de vibração, juntamente com o diagnóstico permitindo a identificação de possíveis falhas no motor monitorado.

3.3.1 Desenvolvimento do Código para o ESP32

O código foi desenvolvido na linguagem C++ utilizando o *software* Arduino IDE. A escolha desse *software* se deu devido a grande compatibilidade com o ESP32 e pela facilidade de aplicação das bibliotecas tanto para o ADXL345 quanto para os protocolos usados nesse trabalho.

3.3.1.1 Bibliotecas utilizadas

Para o desenvolvimento do *firmware*, *software* que fica gravado na memória do *hardware*, foram empregadas diversas bibliotecas com funções específicas para comunicação, aquisição e envio dos dados. As principais bibliotecas utilizadas foram:

- Wire.h – Responsável pela comunicação via protocolo I2C entre o ESP32 e o acelerômetro ADXL345.
- WiFi.h – Permite a conexão do ESP32 à rede Wi-Fi, possibilitando a transmissão dos dados para a nuvem.
- PubSubClient.h – Implementa o protocolo MQTT, possibilitando a comunicação entre o ESP32 e o servidor remoto.
- Adafruit_Sensor.h e Adafruit_ADXL345_U.h – Bibliotecas utilizadas para a leitura e manipulação dos dados fornecidos pelo sensor ADXL345.

3.3.1.2 Lógica de funcionamento do firmware na placa ESP32

O código desenvolvido para o ESP32 segue uma estrutura lógica que abrange desde a inicialização do *hardware* até a coleta e envio dos dados para o broker. A seguir, são descritas as principais etapas desse processo.

3.3.1.3 Inicialização do Sistema

Na fase de inicialização, são realizadas as seguintes configurações:

- Configuração do barramento I2C e inicialização do acelerômetro ADXL345 para aquisição dos dados de vibração.
- Estabelecimento da conexão com a rede Wi-Fi, garantindo a comunicação do ESP32 com o servidor remoto.
- Configuração do cliente MQTT, permitindo o envio dos dados processados para a nuvem.

3.3.1.4 Coleta e envio dos dados

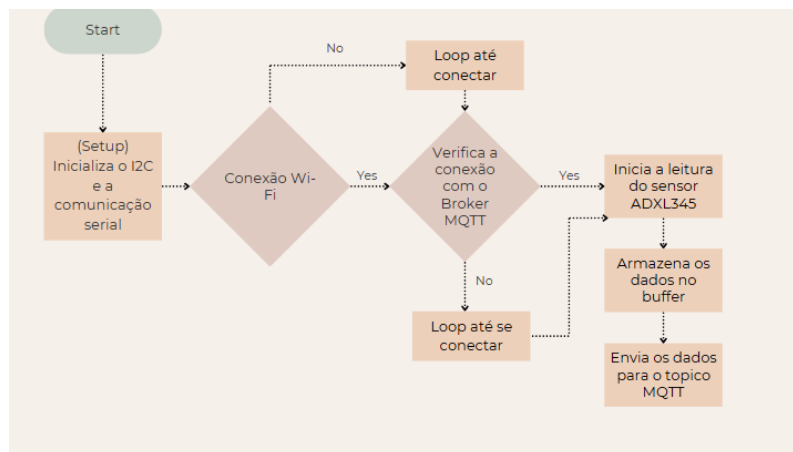
Após a inicialização do sistema, os dados são coletados em uma taxa de 800 amostras por segundo e transmitidas para um servidor remoto utilizando o protocolo MQTT. O broker MQTT adotado nesse trabalho é o Mosquitto, que gerencia a comunicação entre o ESP32 e o banco de dados.

O envio dos dados ocorre da seguinte forma:

- Os valores de aceleração nos três eixos (X, Y e Z) são formatados em JSON (JavaScript Object Notation) usado para armazenar e transmitir dados estruturados, e depois os dados são armazenados em um buffer, área temporária de armazenamento usada para acumular dados antes de enviá-los.
- As mensagens armazenadas no buffer são publicadas no tópico MQTT designado para a transmissão dos dados.
- O ESP32 verifica a integridade da conexão com o Mosquitto Broker e, em caso de falha no envio, um mecanismo de reconexão automática é acionado para garantir a publicação dos dados.

Para compreender a lógica implementada no firmware do ESP32, a Figura 27 apresenta o fluxo de execução do código. O diagrama descreve as principais etapas, desde a inicialização dos dispositivos até a aquisição e envio dos dados para o Mosquitto Broker.

Figura 27 - Fluxograma de execução do firmware no ESP32.



Fonte: Autoria própria (2025)

3.3.2 Integração entre MQTT e Banco de Dados

Após a execução do código no ESP32, os dados são transmitidos via MQTT para um broker, e processados em um servidor e armazenados em um banco de dados para posterior análise.

3.3.2.1 Mosquitto Broker

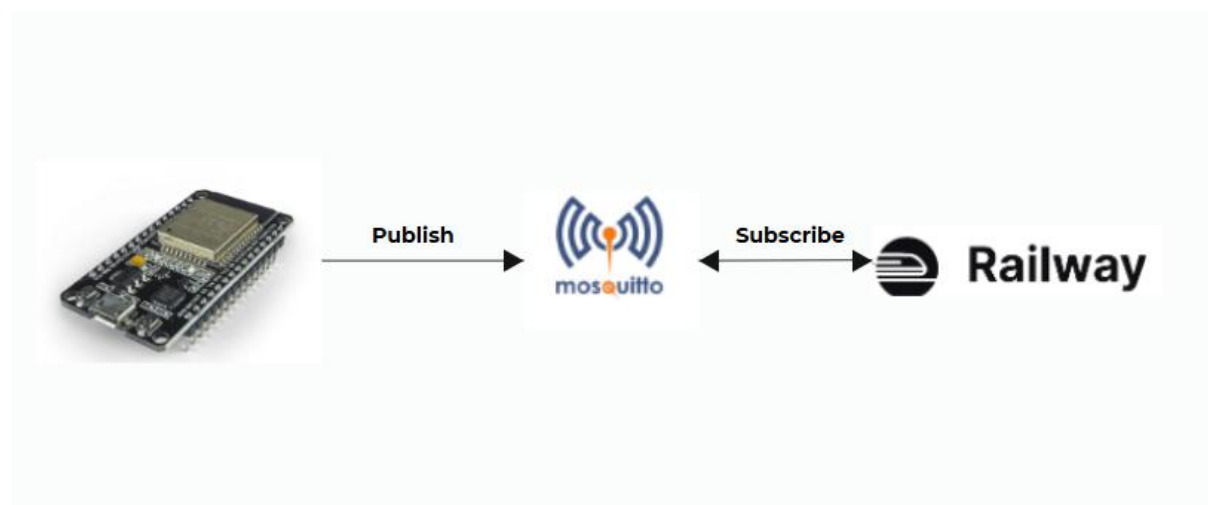
O Eclipse Mosquitto foi utilizado como broker MQTT, responsável por gerenciar a comunicação entre o ESP32 e o servidor na nuvem. O broker recebe as mensagens publicadas pelo microcontrolador e as disponibiliza para os clientes interessados.

O Mosquitto foi escolhido por ser um broker leve, de código aberto e compatível com diversas plataformas. Ele permite a implementação de um sistema assíncrono e eficiente, garantindo a entrega confiável dos dados (MOSQUITTO, 2025).

Na Figura 28 é demonstrado como funciona o mosquitto Broker dentro desse projeto, no diagrama o ESP32 juntamente com o sensor, vão funcionar como clientes do broker, publicando as mensagens em um tópico, especificado na programação da placa. O Railway também é um cliente do broker, mas funciona como um assinante,

que é configurado para receber as mensagens do mesmo tópico onde estão sendo publicadas as mensagens contendo os dados.

Figura 28 - Diagrama de funcionamento do Mosquitto Broker.



Fonte: Autoria própria (2025)

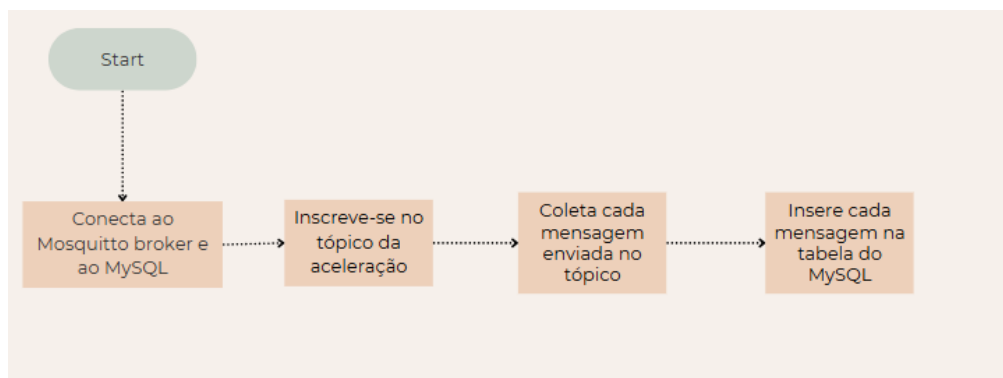
3.3.2.2 Coleta e Processamento no Railway

Para processar os dados enviados pelo ESP32, foi desenvolvido um script em Python hospedado na plataforma Railway, que atua como um cliente MQTT. Esse script se conecta ao Mosquitto Broker, assina o tópico onde os dados são publicados e coleta as informações de vibração em tempo real.

A escolha do Railway se deve por ele ser uma plataforma na nuvem que permite hospedar e executar aplicações de forma contínua e pela sua facilidade de implementação e escalabilidade (RAILWAY, 2025).

Para facilitar a visualização, na Figura 29, é apresentado o diagrama de funcionamento do script hospedado dentro do Railway.

Figura 29 - Diagrama de execução do script no Railway.



Fonte: Autoria própria (2025)

3.3.2.3 Armazenamento no Banco de Dados MySQL

Após a coleta dos dados, o script Python se conecta ao servidor MySQL e armazenadas em uma tabela de dados. O MySQL é hospedado dentro do Railway, onde ele fica indefinidamente ativo, pronto para receber os dados.

O MySQL foi escolhido devido à sua confiabilidade e suporte a consultas estruturadas, facilitando a organização e recuperação dos dados para futuras análises. Os dados armazenados incluem os valores de aceleração nos três eixos (X, Y e Z) e a data da coleta (OPENLOGIC, 2025).

3.3.3 Diagnóstico de Falhas com Ferramenta de Análise de Sinais

A análise dos dados de vibração coletados é realizada no MATLAB, onde são identificadas anomalias associadas a falhas no motor, como desalinhamento, desbalanceamento, falha em rolamentos e folgas mecânicas.

O MATLAB é uma plataforma amplamente reconhecida para operações matemáticas e análise de sinais, oferecendo um ambiente interativo que facilita o processamento de dados de vibração. Ele possui um pacote de funções especializados, com funções pré-definidas para análise de vibração (FFT, análise modal e order analysis) que aceleram o desenvolvimento de algoritmos (MATHWORKS, 2011).

Por esses motivos, o MATLAB foi a escolha ideal para o desenvolvimento desse trabalho de análise de vibração, pois oferece rotinas pré-construídas para o processamento de dados, confiabilidade comprovada em aplicações industriais e a facilidade de integração com visualizações gráficas avançadas.

Os dados, inicialmente armazenados no banco MySQL, são exportados no formato de planilha (CSV) e processados no MATLAB por meio de um script que segue as seguintes etapas:

3.3.3.1 Definição de Parâmetros de Aquisição e Pré-processamento

Conforme a Figura 30, essa primeira parte do código estão descritos os principais parâmetros de aquisição e pré-processamento da análise de vibração como:

- `params.dataFile` indica o arquivo Excel com os dados brutos de vibração a ser carregado;
- `params.Fs` especifica a frequência de amostragem em Hz;
- `params.hpCutoff` define o corte do filtro passa-alta, aplicado para remover componentes de baixas frequências que podem interferir na análise;
- `params.bandWidth` determina a largura de cada banda para cálculo de RMS via integração trapezoidal no domínio da frequência, isso serve para dividir o espectro de frequência em “fatias” de largura fixa (em Hz) e, em cada uma dessas fatias, calcular o valor RMS do sinal.

Figura 30 - Parâmetros de aquisição e pré-processamento.

```
%% ----- 1) Parâmetros principais de aquisição e pré-processamento -----
% params.dataFile      : nome do arquivo de dados (XLSX)
% params.Fs            : taxa de amostragem em Hz
% params.hpCutoff      : frequência de corte do filtro high-pass em Hz
% params.bandWidth     : largura de banda (Hz) para cálculo de RMS por faixa
params.dataFile       = 'mbagsr_09_lav_480_0kvelocity.xlsx';
params.Fs              = 480;      % Hz - taxa de amostragem
params.hpCutoff        = 5;        % Hz - filtro passa-alta
params.bandWidth       = 2;        % Hz - largura de banda para RMS
```

Fonte: Autoria própria (2025)

De acordo com a Figura 31, a segunda parte o código define parâmetros para a rotação do motor, como:

- `params.f_rot` fixa a frequência de rotação do motor em 29 Hz, referencial para análises espectrais síncronas. Os campos
- `params.rotBandWidth` e `params.harmWindow` definem tolerâncias em torno de `f_rot` e de seus harmônicos para busca de picos.

Figura 31 - Parâmetros de rotação do motor.

```
%% ----- 2) Parâmetros de análise espectral e rotação -----
% params.f_rot      : frequência de rotação do motor (Hz)
% params.rotBandWidth : tolerância da banda para buscar harmônicos
% params.harmWindow  : janela para busca de harmônicos (Hz)
params.f_rot        = 29;      % Hz - frequência de rotação
params.rotBandWidth = 5;      % Hz - tolerância para harmônicos
params.harmWindow   = 5;      % Hz - janela para busca de harmônicos
```

Fonte: Autoria próprio

Segundo a Figura 32, a terceira parte define os parâmetros para rolamento, que contém dados geométricos (número de esferas, diâmetros e ângulo de contato) necessários para calcular frequências teóricas de falhas (BPFO, BPFI, BSF, FTF).

Figura 32 - Parâmetros para rolamentos.

```
%% ----- 3) Parâmetros do rolamento -----
% params.bearing.nBalls : número de esferas
% params.bearing.ballDia : diâmetro da esfera (m)
% params.bearing.pitchDia : diâmetro de passo (m)
% params.bearing.contactAng : ângulo de contato (graus)
% params.rotFreq           : igual a f_rot (Hz)
params.bearing.nBalls      = 8;      % número de esferas
params.bearing.ballDia     = 0.0111; % m - diâmetro da esfera
params.bearing.pitchDia    = 0.045;  % m - diâmetro de passo
params.bearing.contactAng  = 0;      % graus - ângulo de contato
params.rotFreq             = params.f_rot; % Hz
```

Fonte: Autoria própria (2025)

3.3.3.2 Limiares de Diagnóstico

Na quarta etapa, de acordo com a Figura 33, são definidos os limites para o diagnóstico de falha, permitindo categorizar defeitos de desbalanceamento, desalinhamento, folga mecânicas e anomalias de rolamento. Além disso, são definidos os limites estatísticos para o RMS. Na definição dos limites de RMS, é possível especificar a potência do motor, de forma a adequar-se aos limites da norma. Na Tabela 3 estão especificados os limites para a definição das falhas.

Figura 33 - Limiares de diagnóstico.

```

%% ----- 4) Limiares de diagnóstico (ISO 20816, espectrais, estatísticos etc.) -----
% Desbalanceamento se  $A_2/A_1 < \text{params.ratio12}$ 
% Desalinhamento se  $A_2/A_1 > \text{params.ratio12max}$ 
params.ratio12    = 0.2;    % desbalanceamento
params.ratio12max = 0.8;    % desalinhamento

% RMS de baixa frequência (folga mecânica)
params.limLowFreqRMS = 0.8;

% Limiares de falhas em rolamentos (mm/s)
params.limBPFO      = 0.8;
params.limBPFI      = 0.8;
params.limBSF       = 0.8;
params.limFTF       = 0.8;

% Norma RMS global (por potência em CV)
params.powerCV      = 7.5;
params.normRMS_CV20 = [2.8, 4.5];
params.normRMS_high = [4.5, 7.1];

```

Fonte: Autoria própria (2025)

Tabela 3 - Limites de diagnóstico por defeito.

Tipo de Defeito	Condição	Limite
Desbalanceamento	$A_2/A_1 < \text{params.ratio12}$	$A_2/A_1 < 0,20$
Desalinhamento	$A_2/A_1 > \text{params.ratio12max}$	$A_2/A_1 > 0,80$
Folga Mecânica	Todos os sub-harmônicos ($0,5\times$, $1,5\times$, $2,5\times$) têm amplitude $> 0,8 \cdot A_1$	$A_{\text{sub}(k)} > 0,8 \times A_1$ ($\forall k \in \{0,5; 1,5; 2,5\}$)
Falha no anel externo (BPFO)	$\text{bandData.bpfo_amp} > \text{params.limBPFO}$	$> 0,8 \text{ mm/s}$

Falha no anel interno (BPFI)	bandData.bpfi_amp params.limBPFI	>	> 0,8 mm/s
Falha de esferas (BSF)	bandData.bsf_amp params.limBSF	>	> 0,8 mm/s
Falha no trem (FTF)	bandData.ftf_amp > params.limFTF		> 0,8 mm/s

Fonte: Autoria própria (2025)

O primeiro harmônico (A_1) representa a frequência de rotação do motor, enquanto o segundo harmônico (A_2) é avaliado para presença de desbalanceamento e desalinhamento no motor. Já os sub-harmônicos ($0,5 \times \text{RPM}$, $1,5 \times \text{RPM}$, $2,5 \times \text{RPM}$) são utilizados para detecção de folgas mecânicas.

Segundo o manual da SKF Reliability Systems (2025), para análise de vibrações em motores, define-se como motor desalinhado quando a relação entre o segundo harmônico está superior a 80% e para desbalanceamento essa relação deve estar abaixo de 20%. Dessa forma, por esse análise, para ser considerado condição aceitável de operação, a relação do segundo harmônico e o primeiro, fica entre 20% a 80%.

Já para a análise dos sub-harmônicos o manual define que para que haja a identificação desse defeito, precisa-se que os sub-harmônicos tenha grandes amplitudes em relação ao primeiro harmônico de rotação. Nesse caso considera-se falha de folga mecânica quando a relação entre o primeiro harmônico e os sub-harmônicos ($0,5 \times \text{RPM}$, $1,5 \times \text{RPM}$ e $2,5 \times \text{RPM}$) ultrapassa 80%.

Na análise espectral para caracterizar uma falha nos rolamentos, é necessário que a frequência característica do rolamento (FTF, BFS, BPFO e BPFI) apresente amplitude maior que 0,8 mm/s.

3.3.3.3 Linha de Processamento

Figura 34 - Etapa de processamento dos dados.

```
%% ----- Pipeline de processamento -----
[v_global, t] = read_and_preprocess(params);
stats        = time_domain_stats(v_global, t, params);
[fftData, bandData] = compute_fft_band_rms(v_global, params);
rotData      = rotation_analysis(v_global, fftData, bandData, params);
diagnosisText = make_diagnosis(stats, rotData, bandData, params);
fprintf('\n--- Diagnóstico Final ---\n%s\n', diagnosisText);
plot_and_save_results(t, v_global, stats, fftData, bandData, rotData, params);
```

Fonte: Autoria própria (2025)

Conforme a Figura 34, a primeira etapa de processamento se inicia com a função `read_and_preprocess`, que lê os dados de aceleração (a_x , a_y e a_z) e os converte em velocidade, multiplicado pelo intervalo de amostragem, conforme a equação 9. Em seguida, combina as três componentes para obter a velocidade global ilustrado na equação 10 e aplica filtro passa-alta de 2ª ordem para atenuar baixas frequências, para garantir o critério de Nyquist essa frequência resultante é dividida pela metade.

$$V(n) = a(n) \cdot \Delta t \quad (9)$$

$$V_{global}(n) = \sqrt{vx(n)^2 + vy(n)^2 + vz(n)^2} \quad (10)$$

Na segunda etapa foi utilizado a função `time_domain_stats` que calcula o RMS no domínio do tempo.

Na terceira etapa, a função `compute_fft_band_rms` aplica janela de Hann (hann), que atenua suavemente as amostras nas extremidades, preservando a maior parte da energia no centro, calcula a FFT, de acordo com a equação 11. Por fim, na equação 12, divide o espectro em bandas de largura definida por `params.bandwidth` e usa a função `trapz` para integrar o quadrado das amplitudes do espectro em cada faixa para obter o valor correspondente de RMS.

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} (x(n) \cdot w(n)) \cdot e^{-\frac{j2\pi kn}{N}} \quad (11)$$

$$RMS_{banda} = \sqrt{\int_{f_i}^{f_{i+1}} |X(f)|^2 df} \quad (12)$$

Na quarta etapa é feita uma análise de rotação e harmônicos com a função `rotation_analysis` que filtra banda em torno de frequência de rotação definida, computa RMS via FFT e busca picos em múltiplos da frequência de rotação dentro da janela definida.

Na quinta etapa a função `make_diagnosis` compara métricas obtidas com os limiares em `params`, monta listas de defeitos e alertas, e avalia o estado RMS global conforme as ISO 20816 e ISO 10816.

Na sexta etapa a função `plot_and_save_results` gera e salva quatro gráficos:

- espectro com harmônicos e sub-harmônicos;
- espectro de rolamento;
- RMS por faixa de frequência;
- sinal no tempo com linha de RMS.

3.3.3.4 Geração do Relatório

Por fim, o script imprime no console o texto de diagnóstico (`diagnosisText`) com detalhes de defeitos e estado geral, fornecendo um laudo para manutenção preditiva.

3.4 VALIDAÇÃO DO SISTEMA EM AMBIENTE REAL

De acordo com as Figura 35 e 36, para validar a eficácia do sistema de monitoramento preditivo de baixo custo desenvolvido neste trabalho, foram realizados testes em um centro comercial na área de refrigeração. Três motores elétricos de bombeamento de fluidos fabricados pela WEG, previamente avaliados com o uso do analisador de vibração da SKF pela empresa que presta serviço de análise de

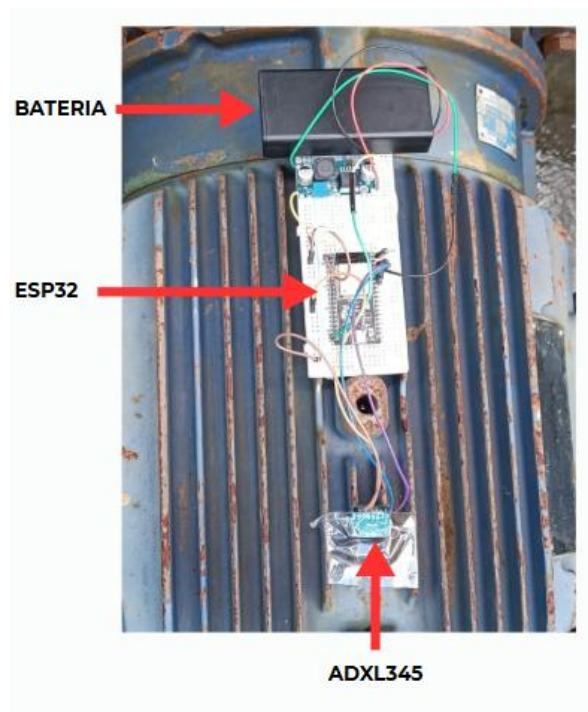
vibração, serviram como casos de teste. Conforme a Tabela 4, cada equipamento apresentava condições operacionais distintas, variando de estado considerado normal até sinais iniciais de falha.

Figura 35 - Localização dos motores analisados.



Fonte: Autoria própria (2025)

Figura 36 - Etapa de coleta dos sinais de vibração.



Fonte: Autoria própria (2025)

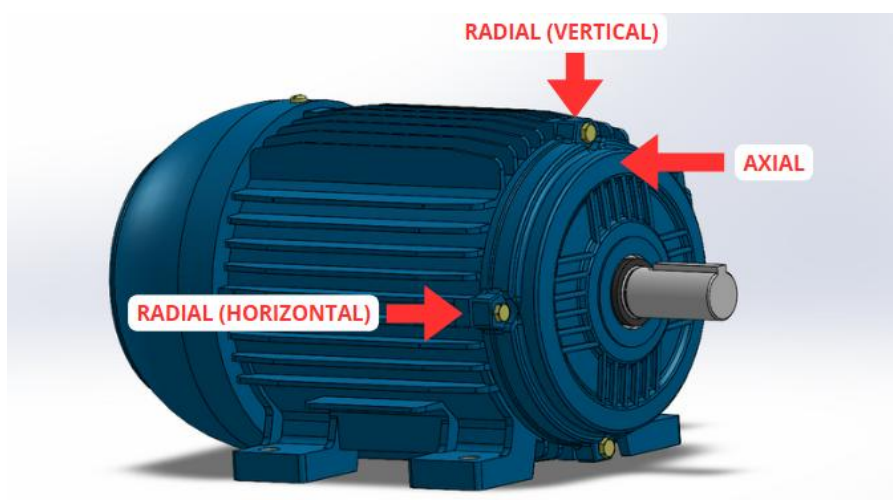
Tabela 4 - Especificação dos três motores analisados.

Motor	Potência (CV)	RPM	TIPO DE ROLAMENTO	CONDIÇÃO
A	40	1760	6308 ZZ	NORMAL
B	7,5	1760	6308 ZZ	FOLGA MECÂNICA
C	10	1760	6308 ZZ	FALHA NO ROLAMENTO

Fonte: Autoria própria (2025)

Conforme a Figura 37, durante os ensaios, instalou-se o acelerômetro acoplado em três diferentes posições nos motores, coletando amostras de aceleração nos três eixos (X, Y e Z). Os três pontos de fixação do sensor no motor foram todos instalados no lado acoplado do motor: primeiro, em orientação radial vertical, captando oscilações perpendiculares ao eixo no plano vertical; o segundo, em orientação radial horizontal, registrando vibrações também perpendiculares, porém no plano horizontal; e o terceiro, em orientação axial, alinhado ao eixo de rotação para monitorar deslocamentos ao longo do próprio eixo.

Figura 37 - Posições de fixação do sensor.



Fonte: Autoria própria (2025)

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo mostra os resultados dos testes realizados em um sistema de refrigeração de centro comercial. Foram avaliados três motores elétricos, em condições operacionais distintas:

- Caso A: motor em condição normal;
- Caso B: motor com folga mecânica;
- Caso C: motor com falha no rolamento.

Durante o processo de coleta e envio de dados dos casos estudados, foi possível observar que o sistema de monitoramento não conseguiu enviar todos as amostras coletados devido a latência e oscilações da rede Wi-fi. Como a frequência de envio de dados era mais rápida que a largura de banda, principalmente em motores localizados dentro das casas de máquinas, onde o sinal de rede era mais fraco pela interferência das paredes. Consequentemente, o número de amostras armazenadas ficou abaixo da quantidade programada.

Por conta dessa variação na taxa de amostragem, para cada motor será especificado o número de coletas por segundo, e as análise serão realizadas com base nesses valores. Dessa forma, a Tabela 5 apresenta as taxas de amostragem para cada posição coletada em cada motor.

Tabela 5 - Taxas de amostragem para cada um dos motores em número de coletas por segundo.

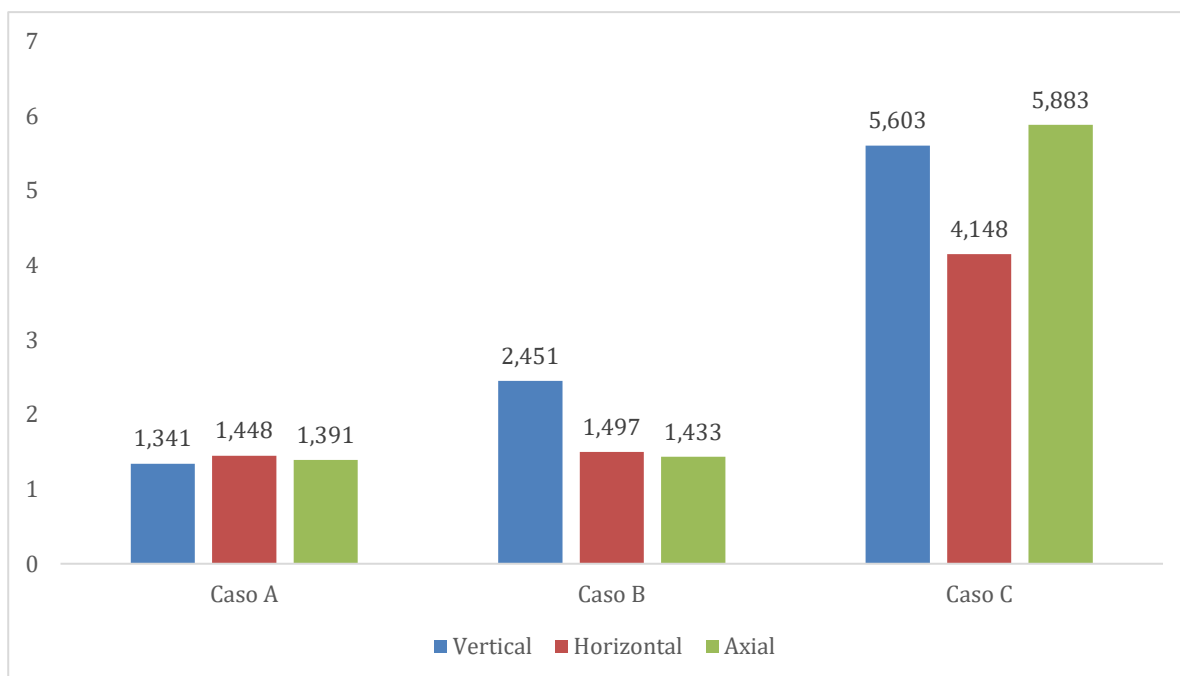
Caso	Vertical	Horizontal	Axial
A	471	510	485
B	510	505	525
C	480	480	485

Fonte: Autoria própria (2025)

4.1 ANÁLISES NO DOMÍNIO DO TEMPO

Para análise no domínio do tempo, conforme ilustrando na Figura 38, foram obtidos os seguintes valores para de RMS. Esse parâmetro foi calculado para as três posições de medição analisadas.

Figura 38 - Valores de RMS (mm/s) por posição e condição do motor.



Fonte: Autoria própria (2025)

Ao analisar os valores de RMS e compara-los com os limites das normas ISO 20816-1 (2016) e ISO 10816-3 (2009), observa-se que para os casos A e B, as três posições dos motores estão abaixo da classificação de alerta. Contudo, no caso B, o valor apresentado na posição vertical é mais elevado, indicando uma evolução no nível de vibração podendo sinalizar uma possível falha. Já para o caso C, os níveis de vibração estão em estado crítico de acordo com a norma, sinalizando uma falha em estado avançado, podendo resultar na falha funcional do equipamento, para esses casos recomenda-se a parada do equipamento para a manutenção corretiva de emergência.

4.2 ANÁLISE NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA

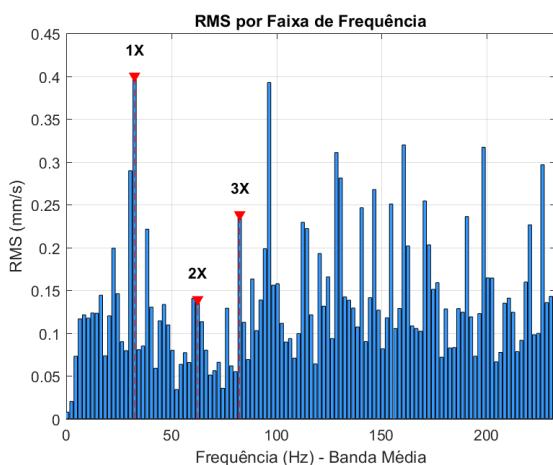
Para análise no domínio da frequência, foram gerados três espectros em RMS por faixa de frequência: espectro de harmônicos e sub-harmônicos e espectro de falhas em rolamentos. Esses gráficos foram gerados para as três posições de medição analisadas no motor.

4.2.1 Análise Espectral do Caso A: Motor em Condição Normal

4.2.1.1 Espectro dos harmônicos e sub-harmônicos da frequência de rotação

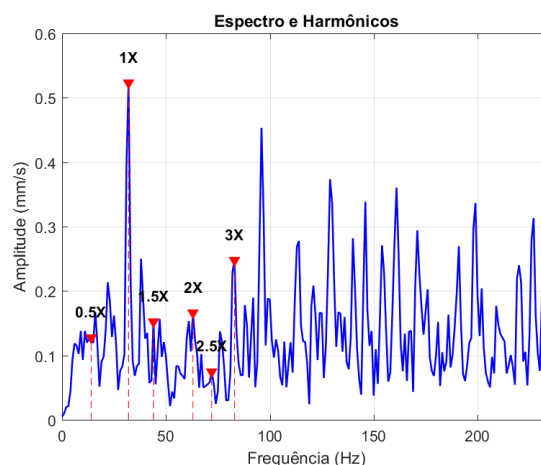
Nas Figuras 39, 41 e 43 são ilustrados os espectros de harmônicos da frequência de rotação do motor caso A, para todas as posições analisadas. Por sua vez, as Figuras 40, 42 e 44 apresentam os espectros completos, incluindo harmônicos e sub-harmônicos da frequência de rotação.

Figura 39 - Espectro de harmônicos, posição vertical, caso A



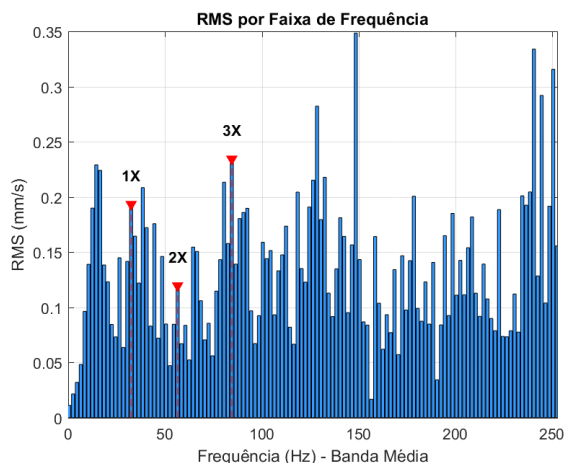
Fonte: Autoria própria (2025)

Figura 40 - Espectro de harmônicos e sub-harmônicos, posição vertical, caso A.



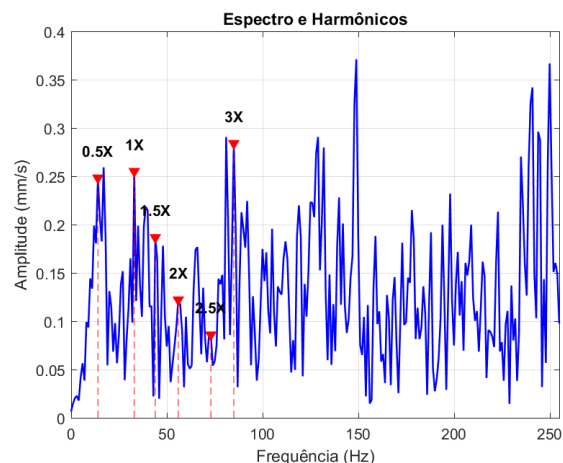
Fonte: Autoria própria (2025)

Figura 41 - Espectro de harmônicos, posição horizontal, caso A.



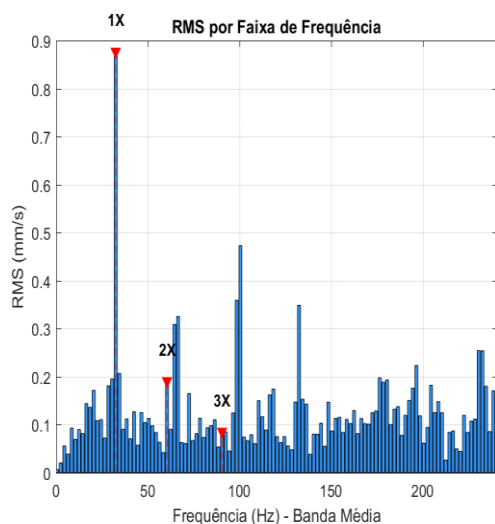
Fonte: Autoria própria (2025)

Figura 42 - Espectro de harmônicos e sub-harmônicos, posição horizontal, caso A.



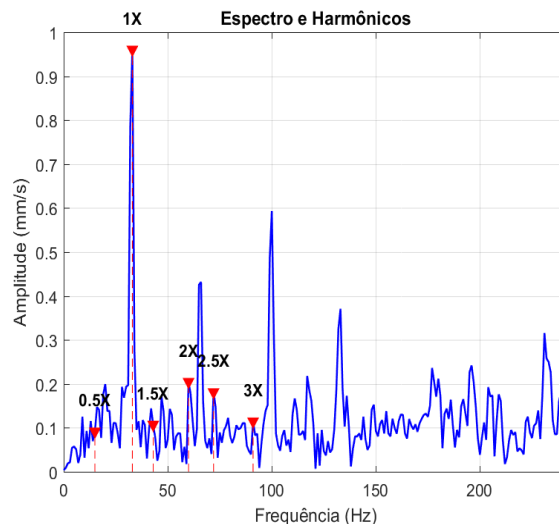
Fonte: Autoria própria (2025)

Figura 43 - Espectro de harmônicos, posição axial, caso A.



Fonte: Autoria própria (2025)

Figura 44 - Espectro de harmônicos e sub-harmônicos, posição axial, caso A.



Fonte: Autoria própria (2025)

Os valores de frequência, amplitude e relação de harmônicos estão representados na Tabela 6.

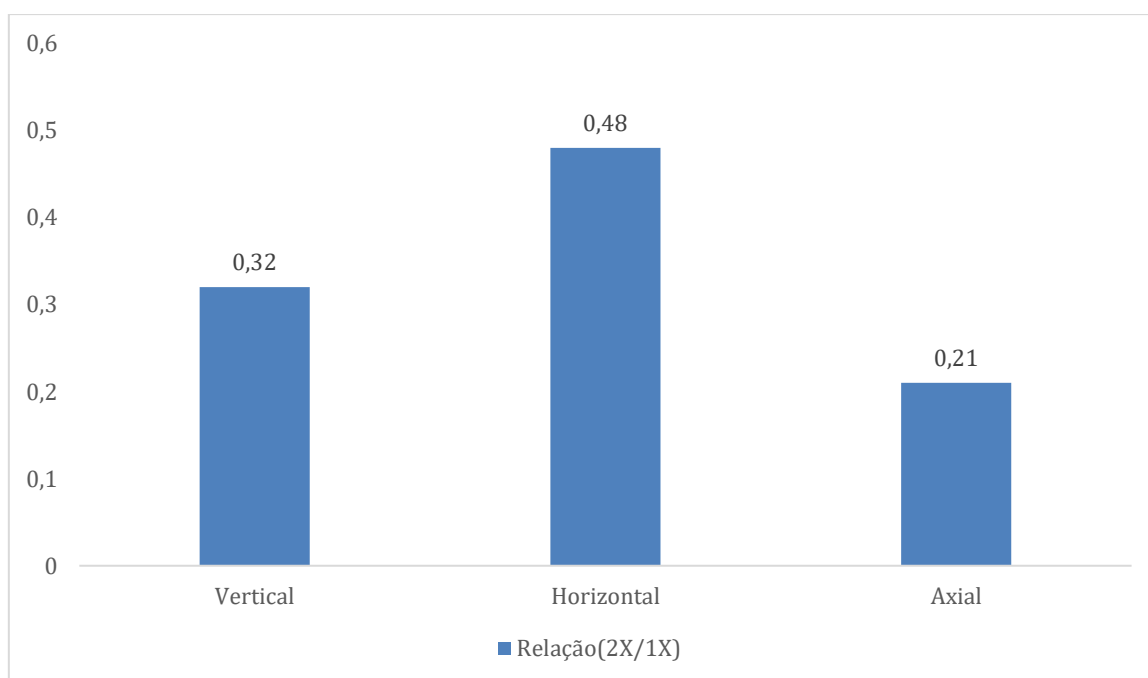
Tabela 6 - Frequências, amplitudes e relação entre harmônicos nas posições vertical, horizontal e axial, caso A.

Posição	1º Harmônico (Hz / mm/s)	2º Harmônico (Hz / mm/s)	Relação (2X/1X)
Vertical	32 Hz / 0,52 mm/s	63 Hz / 0,17 mm/s	0,32
Horizontal	33 Hz / 0,26 mm/s	56 Hz / 0,12 mm/s	0,48
Axial	33 Hz / 96 mm/s	60 Hz / 20 mm/s	0,21

Fonte: Autoria própria (2025)

Na Figura 45 é apresentada a relação graficamente entre os harmônicos da frequência para o motor caso A, por posição.

Figura 45 - Gráfico da relação entre os harmônicos do motor caso A, por posição.



Fonte: Autoria própria (2025)

Na análise dos harmônicos nas Figuras 39, 41 e 43, foi possível observar que para as posições vertical, horizontal e axial, há presença de harmônicos da frequência

de rotação. Nos resultados visualizados através da Tabela 6 e da Figura 45, a relação entre os dois harmônicos ficou dentro do intervalo normal de vibração. Assim, a análise dos harmônicos constata que não há evidências de desalinhamento ou desbalanceamento.

Os valores de frequência, amplitude e da relação entre os sub-harmônicos e o primeiro harmônico estão representados na Tabela 7.

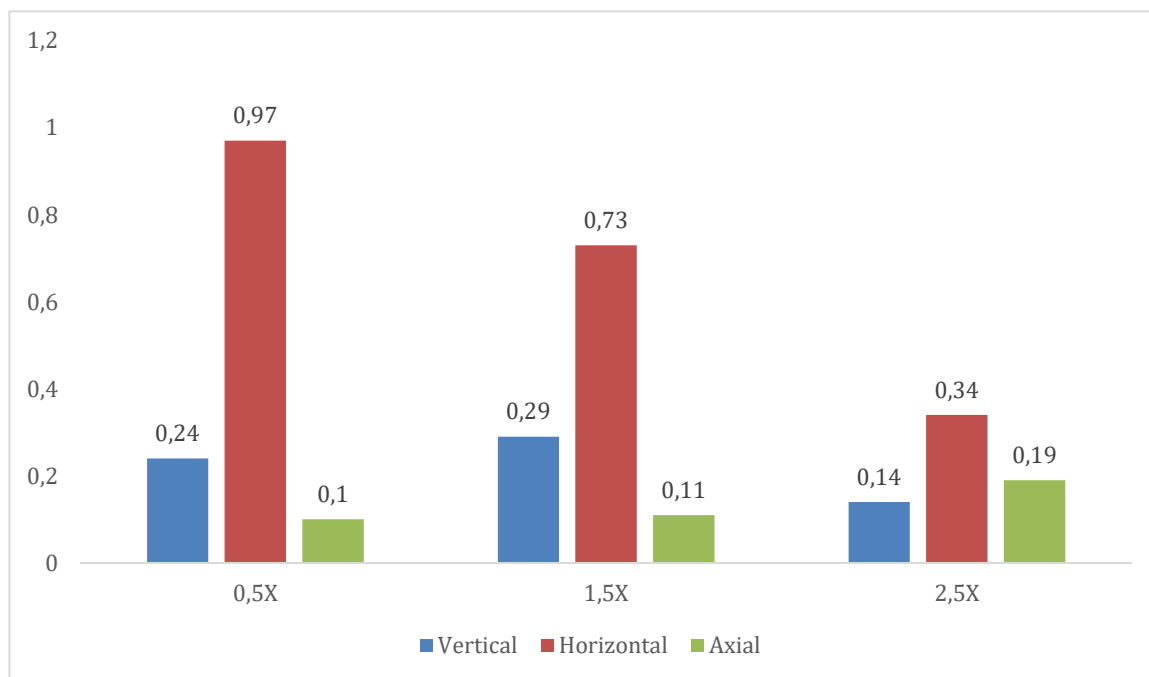
Tabela 7 - Sub-harmônicos por Posição de Medição: Frequência, Amplitude e Relação com 1XRPM, caso A.

Sub-harmônico	Posição	Frequência (Hz)	Amplitude (mm/s)	Relação com 1X
0,5X	Vertical	14	0,13	0,24
	Horizontal	14	0,25	0,97
	Axial	15	0,09	0,10
1,5X	Vertical	44	0,15	0,29
	Horizontal	44	0,19	0,73
	Axial	43	0,11	0,11
2,5X	Vertical	72	0,07	0,14
	Horizontal	73	0,09	0,34
	Axial	72	0,18	0,19

Fonte: Autoria própria (2025)

Na Figura 46 é apresentado graficamente a relação entre os sub-harmônicos com a frequência de rotação do motor caso A, para cada posição analisada.

Figura 46 - Gráfico com a relação dos sub-harmônicos com a frequência de rotação do motor caso A, por posição.



Fonte: Autoria própria (2025)

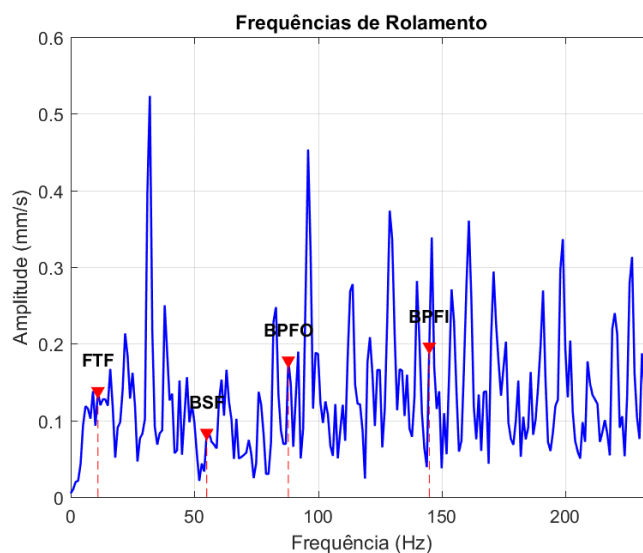
A análise dos sub-harmônicos nas Figuras 40, 42 e 44 permitiu identificar os sub-harmônicos que são representados por 0,5XRPM, 1,5XRPM e 2,5XRPM.

Com esses resultados obtidos, através da Figura 46 e da Tabela 7, pode-se inferir que o limite de 0,8 para a relação de sub-harmônicos e o primeiro harmônico foi atingido apenas na posição horizontal, e somente no sub-harmônico 0,5XRPM. No entanto, para que a condição de folga mecânica seja atingida é necessário que o limite seja atingido em mais de um sub-harmônico. Dessa forma conclui-se que não há presença de folgas mecânicas no motor analisado. Contudo o valor elevado na frequência de 0,5XRPM pode ser interpretado como um início de folga mecânica.

4.2.1.2 Espectro de falha nos rolamentos

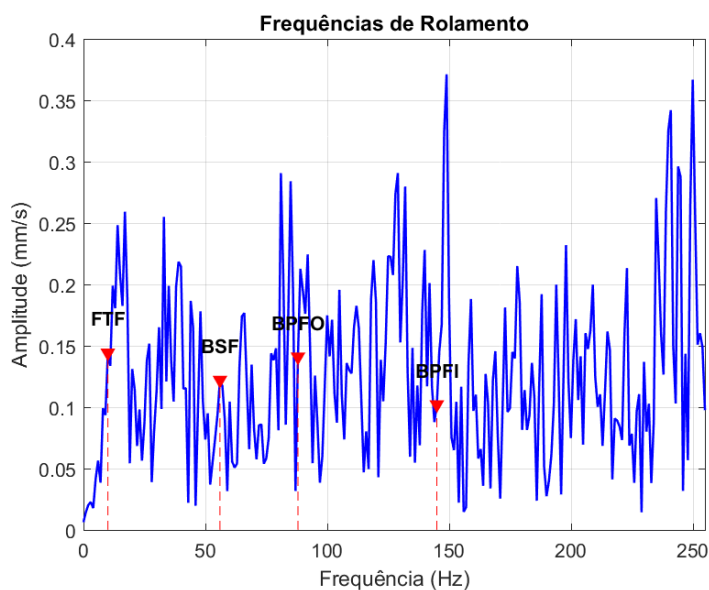
Nas Figuras 47, 48 e 49 são apresentados os espectros para frequência de falha nos rolamentos, para todas as posições analisadas do motor caso A.

Figura 47 - Espectro de falha em rolamentos, posição vertical, caso A.



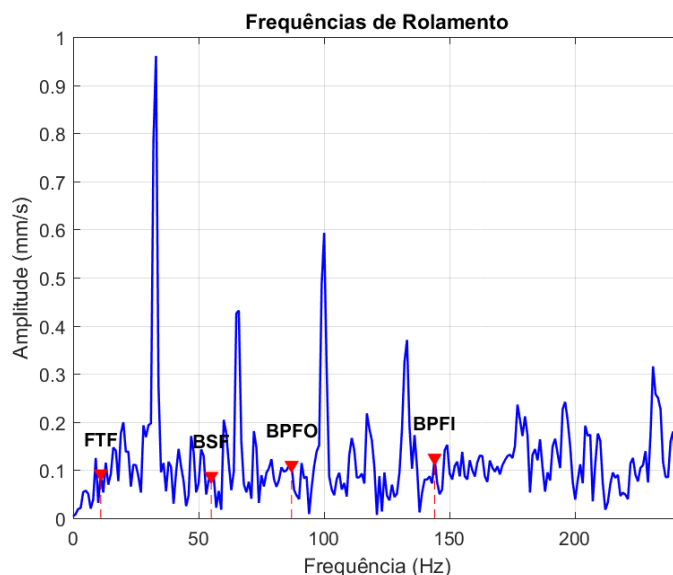
Fonte: Autoria própria (2025)

Figura 48 - Espectro de falha em rolamentos, posição horizontal, caso A.



Fonte: Autoria própria (2025)

Figura 49 - Espectro de falha em rolamentos, posição axial, caso A.



Fonte: Autoria própria (2025)

Na Tabela 8 são mostrados os valores de frequências de falha nos rolamentos e suas amplitudes para as posições analisadas do motor caso A.

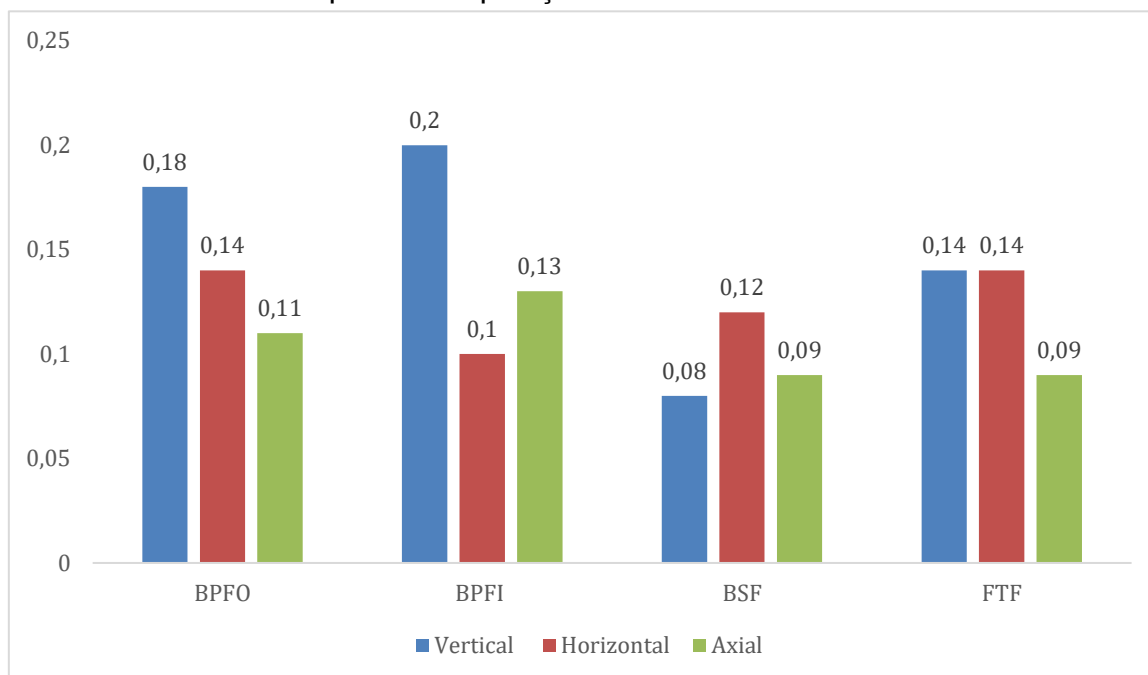
Tabela 8 - Frequências características do rolamento e suas amplitudes por posição de medição, caso A.

Frequência	Axial (Hz / amp)	Vertical (Hz / amp)	Horizontal (Hz / amp)
BPFO	87,00 / 0,11	88,00 / 0,18	88,00 / 0,14
BPFI	144,00 / 0,13	145,00 / 0,20	145,00 / 0,10
BSF	55,00 / 0,09	55,00 / 0,08	56,00 / 0,12
FTF	11,00 / 0,09	11,00 / 0,14	10,00 / 0,14

Fonte: Autoria própria (2025)

Para auxiliar a visualização, a Figura 50 apresenta as frequências de falha em rolamentos e suas amplitudes para cada posição no motor caso A.

Figura 50 - Gráfico de frequência de falha nos rolamentos e suas amplitudes para cada posição no motor caso A.



Fonte: Autoria própria (2025)

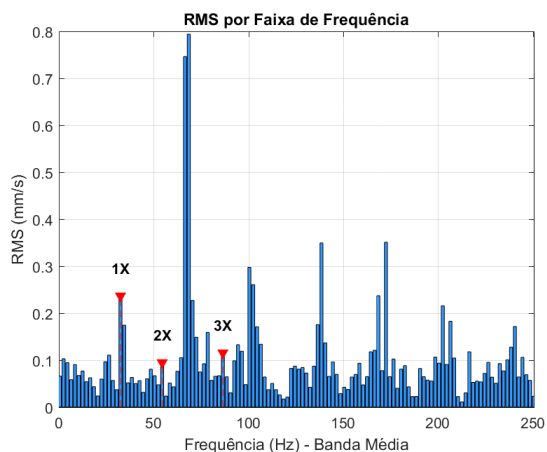
Ao analisar as Figuras 47, 48 e 49, e a mais detalhadamente na Figura 50 e Tabela 9, observa-se que, em nenhuma dessas três posições, as frequências dos rolamentos ultrapassam o limite estabelecido de amplitude 0,8mm/s, portanto, entende-se que esse motor não apresenta indícios de falha nos rolamentos.

4.2.2 Análise Espectral do Caso B: Motor com Folga Mecânica

4.2.2.1 Espectro dos harmônicos e sub-harmônicos da frequência de rotação

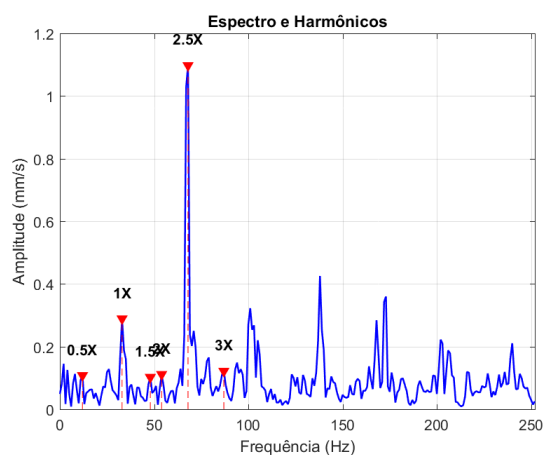
Nas Figuras 51, 53 e 55 são mostrados os espectros dos harmônicos da frequência de rotação do motor caso B, para todas as posições estudadas. Já para as Figuras 52, 54 e 56 apresentam espectros tanto com a indicação de harmônicos quanto a de sub-harmônicos.

Figura 51 - Espectro de harmônicos, posição vertical, caso B.



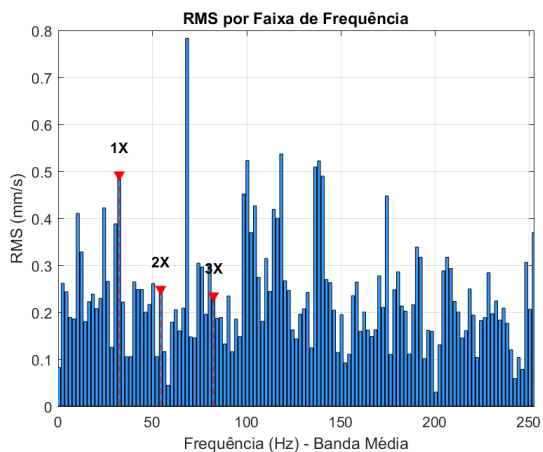
Fonte: Autoria própria (2025)

Figura 52 - Espectro de harmônicos e sub-harmônicos, posição vertical, caso B.



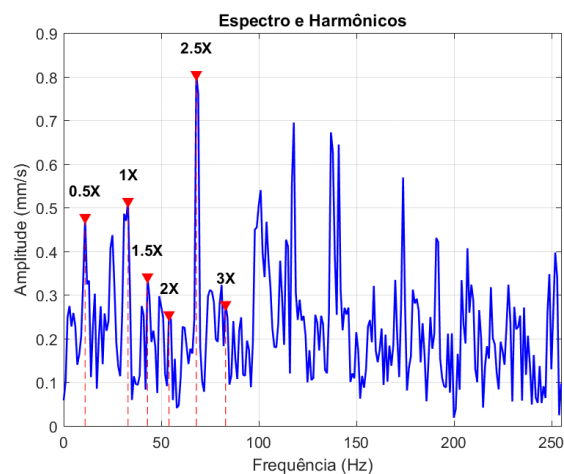
Fonte: Autoria própria (2025)

Figura 53 - Espectro de harmônicos, posição horizontal, caso B.



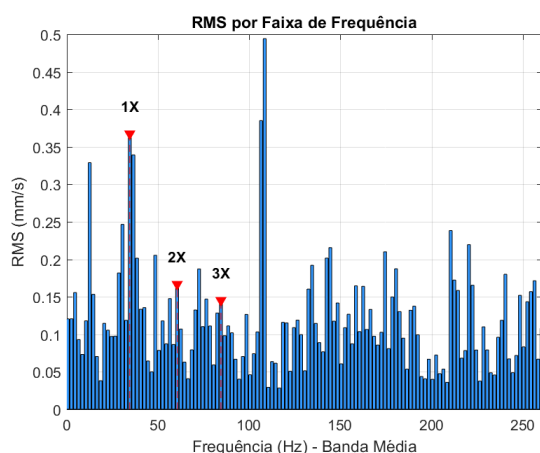
Fonte: Autoria própria (2025)

Figura 54 - Espectro de harmônicos e sub-harmônicos, posição horizontal, caso B.



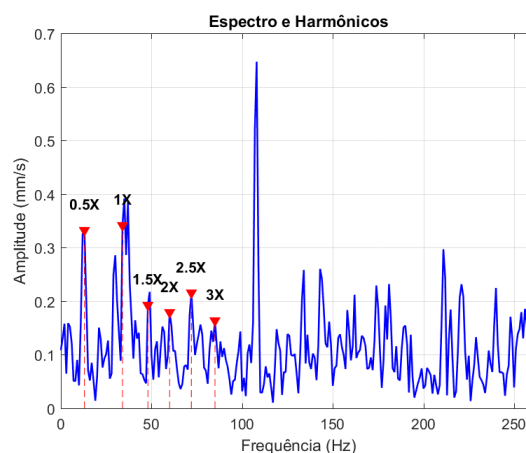
Fonte: Autoria própria (2025)

Figura 55 - Espectro de harmônicos, posição axial, caso B.



Fonte: Autoria própria (2025)

Figura 56 - Espectro de harmônicos e sub-harmônicos, posição axial, caso B.



Fonte: Autoria própria (2025)

A Tabela 9, apresenta os valores de frequência dos harmônicos, suas respectivas amplitudes e amplitudes e a relação entre harmônicos.

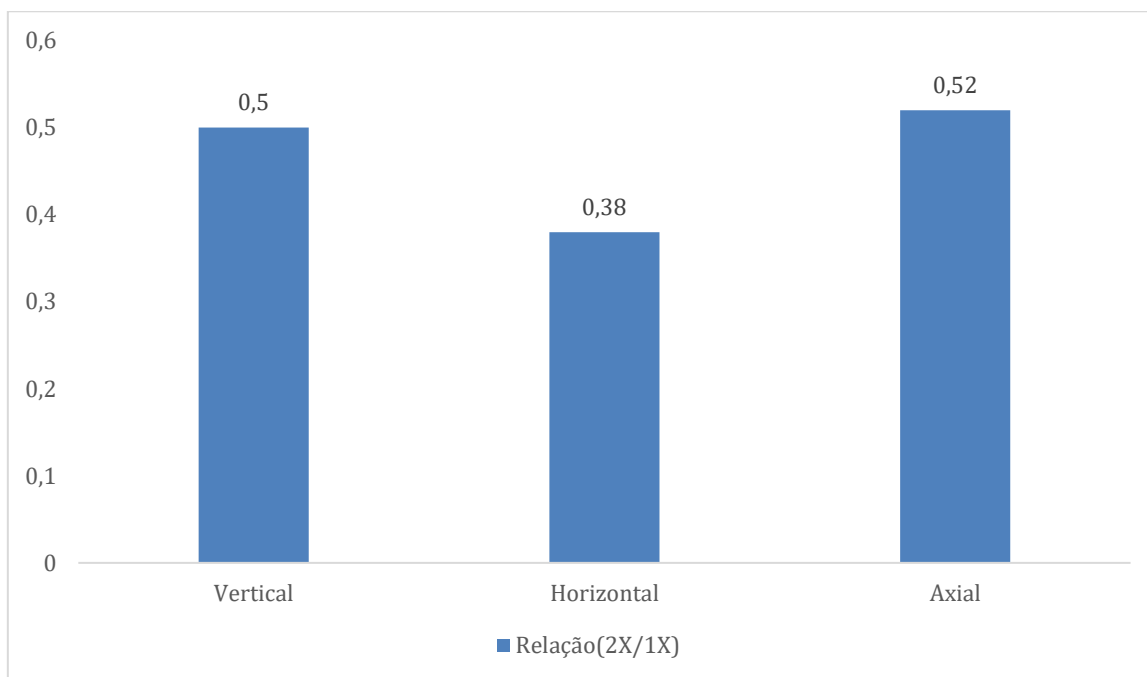
Tabela 9 - Frequências, amplitudes e relação entre harmônicos nas posições vertical, horizontal e axial, caso B.

Posição	1º Harmônico (Hz / mm/s)	2º Harmônico (Hz / mm/s)	Relação (2X/1X)
Vertical	33 Hz / 0,51 mm/s	54 Hz / 0,25 mm/s	0,50
Horizontal	33 Hz / 0,29 mm/s	54 Hz / 0,11 mm/s	0,38
Axial	34 Hz / 0,34 mm/s	60 Hz / 0,18 mm/s	0,52

Fonte: Autoria própria (2025)

Na Figura 57 é apresentada a relação graficamente entre os harmônicos da frequência de rotação do motor caso B, por posição.

Figura 57 - Gráfico da relação entre os harmônicos do motor caso B, por posição.



Fonte: Autoria própria (2025)

Ao analisar os harmônicos da frequência de rotação nas Figuras 51, 53 e 55, observa-se que o pico dominante está sendo representado pela frequência de rotação, sem apresentar indícios de possíveis falhas.

Nos resultados obtidos, através da Tabela 9 e Figura 57, a relação entre os dois harmônicos (2XRPM/1XRPM) ficou dentro do intervalo considerado normal de vibração em todas as posições testadas. Portando ao analisar os harmônicos, constatou que o motor está em condição normal de operação, sem indícios de desbalanceamento ou desalinhamento.

Na Tabela 10 são apresentados os valores das frequências, amplitudes e das relações dos sub-harmônicos com a frequência de rotação do motor.

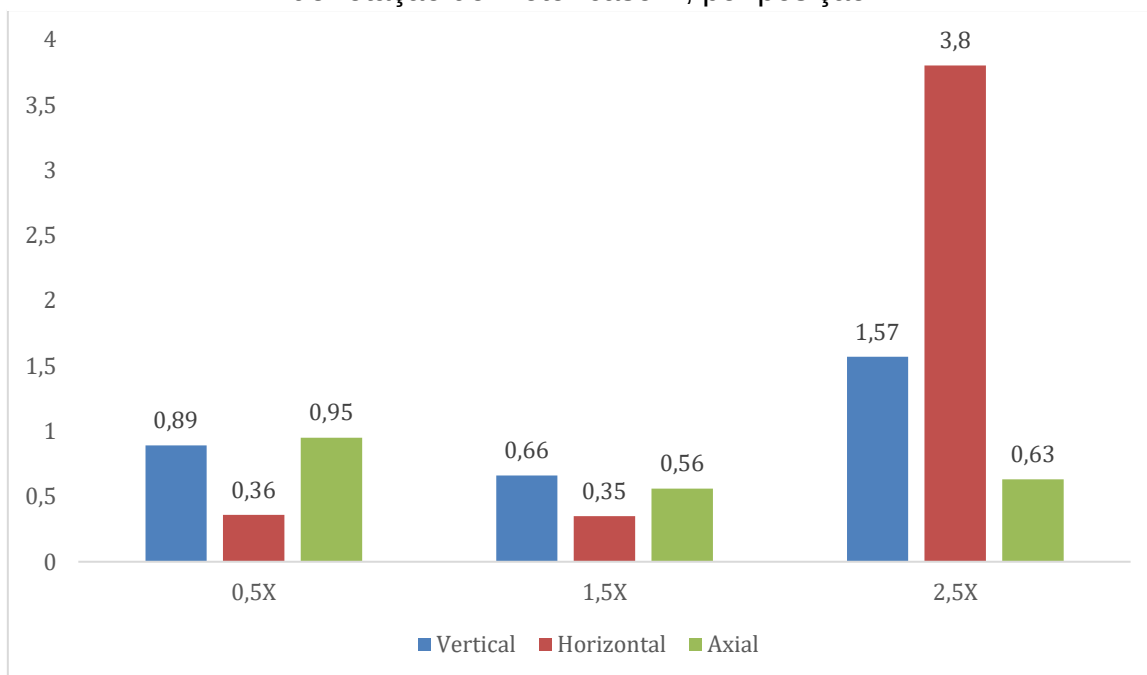
Tabela 10 - Sub-harmônicos por Posição: Frequência, Amplitude e Relação com 1XRPM, caso B.

Sub-harmônico	Posição	Frequência (Hz)	Amplitude (mm/s)	Relação com 1X
0,5X	Vertical	11	0,46	0,89
	Horizontal	12	0,10	0,36
	Axial	13	0,33	0,95
1,5X	Vertical	43	0,34	0,66
	Horizontal	48	0,10	0,35
	Axial	48	0,19	0,56
2,5X	Vertical	68	0,80	1,57
	Horizontal	68	1,10	3,80
	Axial	72	0,22	0,63

Fonte: Autoria própria (2025)

Na Figura 58 é apresentado graficamente a relação entre os sub-harmônicos com a frequência de rotação do motor caso B, para cada posição.

Figura 58 - Gráfico com a relação dos sub-harmônicos com a frequência de rotação do motor caso B, por posição.



Fonte: Autoria própria (2025)

A análise dos sub-harmônicos, representado nas Figuras 52, 54 e 56, e detalhada na Tabela 10 e Figura 58, demonstra que os critérios para detecção de folga

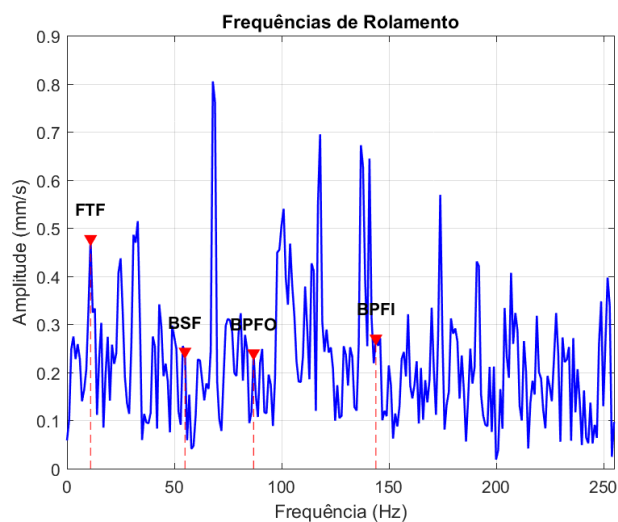
mecânica foram atingidos para todas as posições, exclusivamente nos sub-harmonicos (0,5XRPM e 2,5XRPM).

Destaca-se, a medição na posição horizontal (2,5XRPM), cuja a amplitude alcançou 3,8mm/s, representando uma contribuição significativa para o índice global de vibração do motor. Dessa forma conclui-se que há índices claros da presença de folgas mecânicas nesse motor.

4.2.2.2 Espectro de falha nos rolamentos

Nas Figuras 59, 60 e 61 são exibidos os espectros das frequências de falha nos rolamentos, para as posições analisadas do motor caso B.

Figura 59 - Espectro de falha em rolamentos, posição vertical, caso B.



Fonte: Autoria própria (2025)

Figura 60 - Espectro de falha em rolamentos, posição horizontal, caso B.

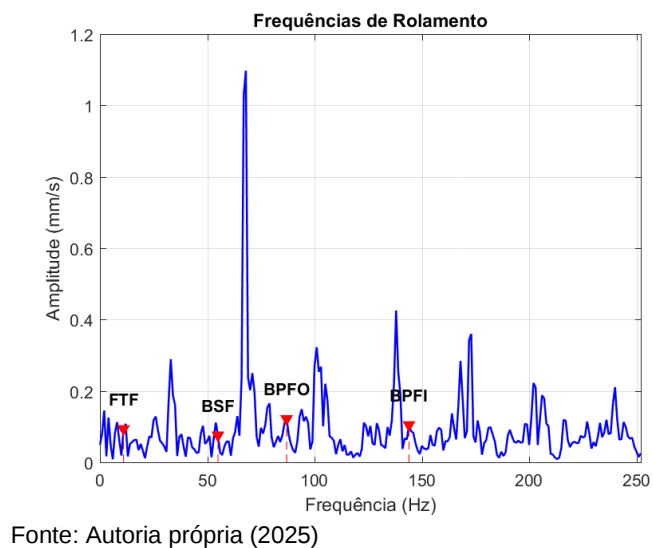
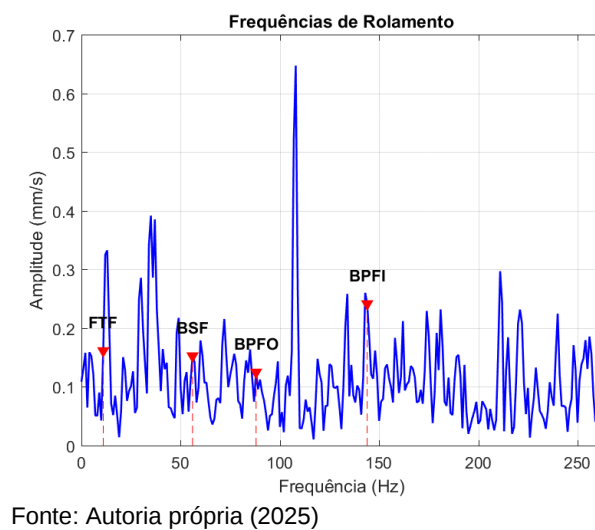


Figura 61 - Espectro de falha em rolamentos, posição axial, caso B.



Na Tabela 11, são detalhados os valores de amplitude e frequências para a falha nos rolamentos, dividido por posição de medição.

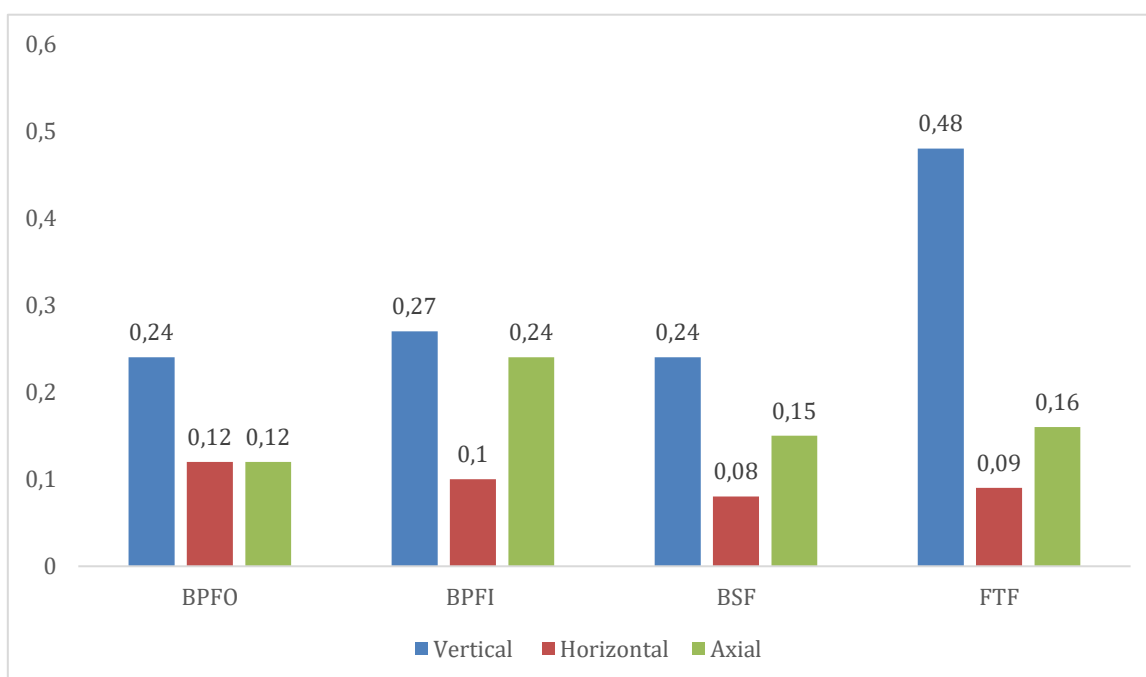
Tabela 11 - Frequências características do rolamento e suas amplitudes por posição de medição, caso B.

Frequência	Axial (Hz / amp)	Vertical (Hz / amp)	Horizontal (Hz / amp)
BPFO	88,00 / 0,12	87,00 / 0,24	87,00 / 0,12
BPFI	144,00 / 0,24	144,00 / 0,27	144,00 / 0,10
BSF	56,00 / 0,15	55,00 / 0,24	55,00 / 0,08
FTF	11,00 / 0,16	11,00 / 0,48	11,00 / 0,09

Fonte: Autoria própria (2025)

A Figura 62 apresenta as frequências de falha em rolamentos e suas amplitudes para cada posição no motor caso B.

Figura 62 - Gráfico de frequência de falha nos rolamentos e suas amplitudes para cada posição no motor caso B.



Fonte: Autoria própria (2025)

Ao realizar a análise de falha para rolamentos nas Figuras 59, 60 e 61, e os valores detalhados na Tabela 11 e Figura 62, observa-se que as frequências

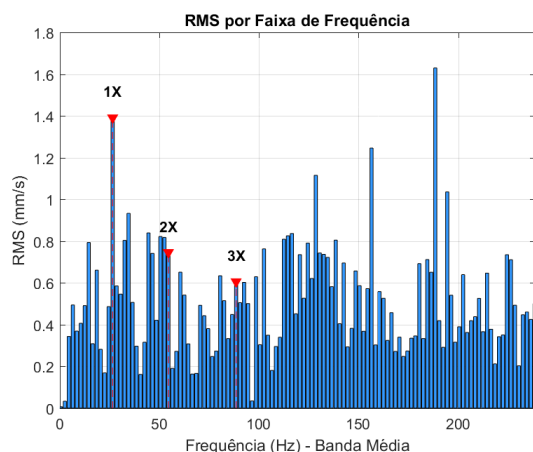
características de falha nos rolamentos, apresentaram moderada a baixa amplitude. Portanto, não ultrapassam o limite de para caracterização de falha com amplitude superior a 0,8mm/s. Nesse caso, entende-se que esse motor não apresenta indícios de falha nos rolamentos.

4.2.3 Análise Espectral do Caso C: Motor Falha nos Rolamentos

4.2.3.1 Espectro dos harmônicos e sub-harmônicos da frequência de rotação no motor caso C

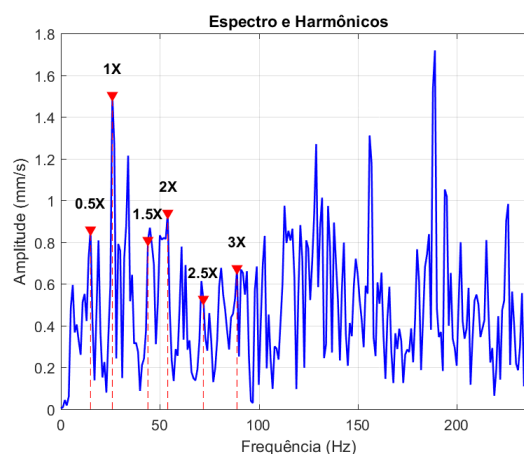
Nas Figuras 63, 65 e 67 são exibidos os espectros dos harmônicos da frequência de rotação do motor caso C, para todas as posições analisadas. Em contrapartida para as Figuras 64, 66 e 68 apresentam espectros tanto com a indicação de harmônicos quanto a de sub-harmônicos.

Figura 63 - Espectro de harmônicos, posição vertical, caso C.



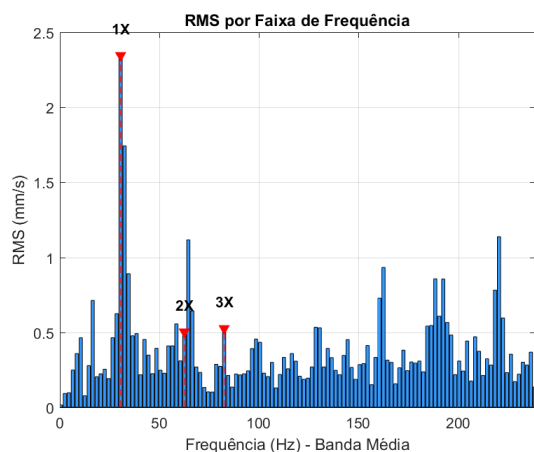
Fonte: Autoria própria (2025)

Figura 64 - Espectro de harmônicos e sub-harmônicos, posição vertical, caso C.



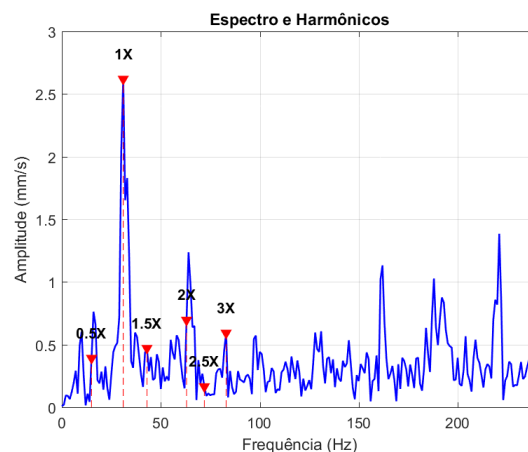
Fonte: Autoria própria (2025)

Figura 65 - Espectro de harmônicos, posição horizontal, caso C.



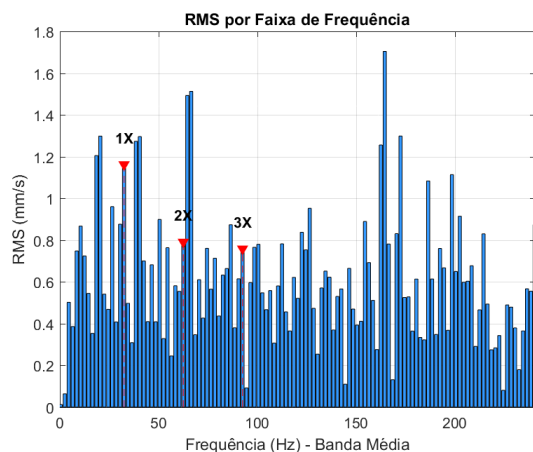
Fonte: Autoria própria (2025)

Figura 66 - Espectro de harmônicos e sub-harmônicos, posição horizontal, caso C.



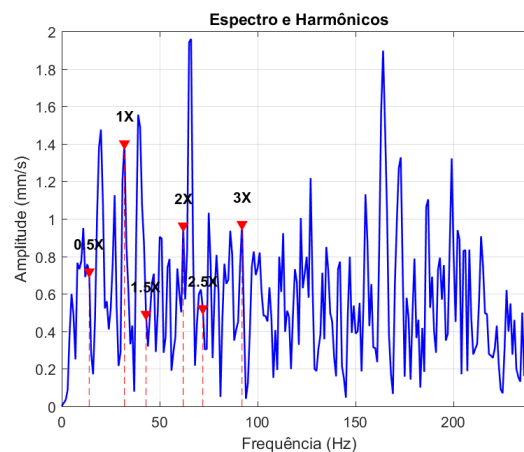
Fonte: Autoria própria (2025)

Figura 67 - Espectro de harmônicos, posição axial, caso C.



Fonte: Autoria própria (2025)

Figura 68 - Espectro de harmônicos e sub-harmônicos, posição axial, caso C.



Fonte: Autoria própria (2025)

Na Tabela 12 são apresentados os valores para frequências dos harmônicos e suas amplitudes, juntamente com a relação entre os harmônicos que caracterizam as falhas.

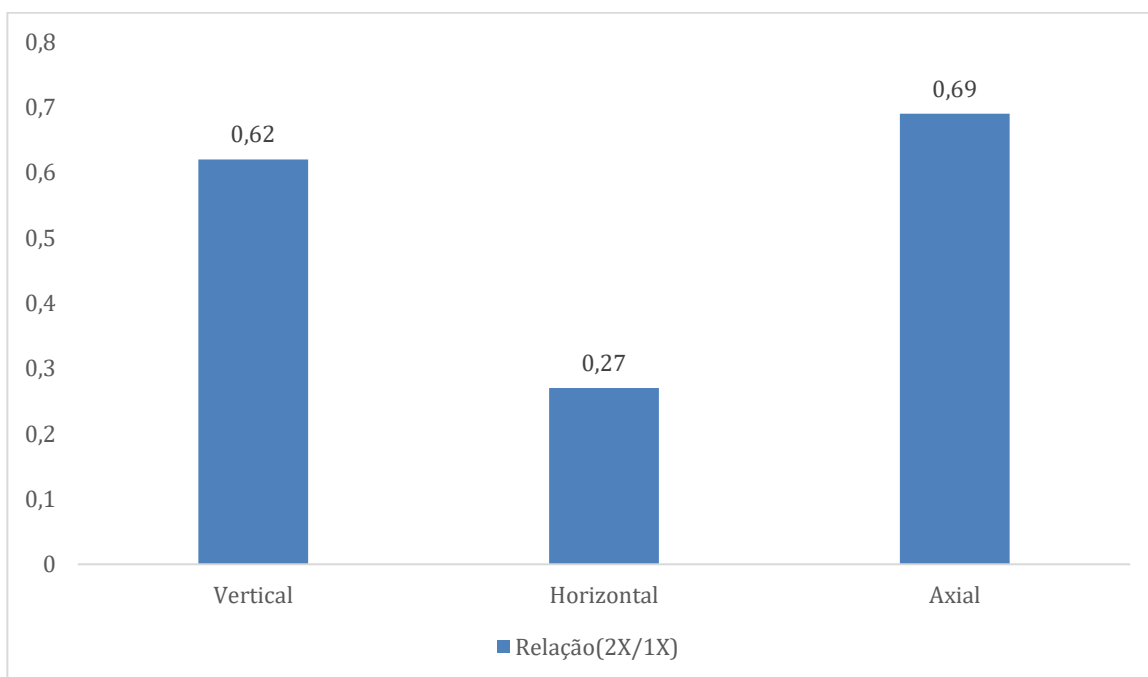
Tabela 12 - Frequências, amplitudes e relação entre harmônicos nas posições vertical, horizontal e axial, caso C.

Posição	1º Harmônico (Hz / mm/s)	2º Harmônico (Hz / mm/s)	Relação (2X/1X)
Vertical	26 Hz / 1,50 mm/s	54 Hz / 0,94 mm/s	0,62
Horizontal	31 Hz / 2,62 mm/s	63 Hz / 0,70 mm/s	0,27
Axial	32 Hz / 1,40 mm/s	62 Hz / 0,96 mm/s	0,69

Fonte: Autoria própria (2025)

Na Figura 69 é apresentada a relação graficamente entre os harmônicos da frequência de rotação do motor caso C, para cada posição analisada.

Figura 69 - Gráfico da relação entre os harmônicos do motor caso C, por posição.



Fonte: Autoria própria (2025)

Ao avaliar os harmônicos das frequências de rotação do caso do motor C, por meio das Figuras 63, 65 e 67, pode-se notar que os harmônicos apresentaram amplitudes de vibração bastante elevadas, caracterizando uma possível falha.

Nos resultados obtidos, visualizados por meio da Tabela 12 e Figura 69, verifica-se que, a relação entre os harmônicos se manteve dentro do intervalo aceitável, eliminando a hipótese da presença de desalinhamento ou desbalanceamento.

Na Tabela 13 são apresentados os dados em relação aos sub-harmônicos por posição com os valores de frequência, amplitude e a relação com a frequência de rotação.

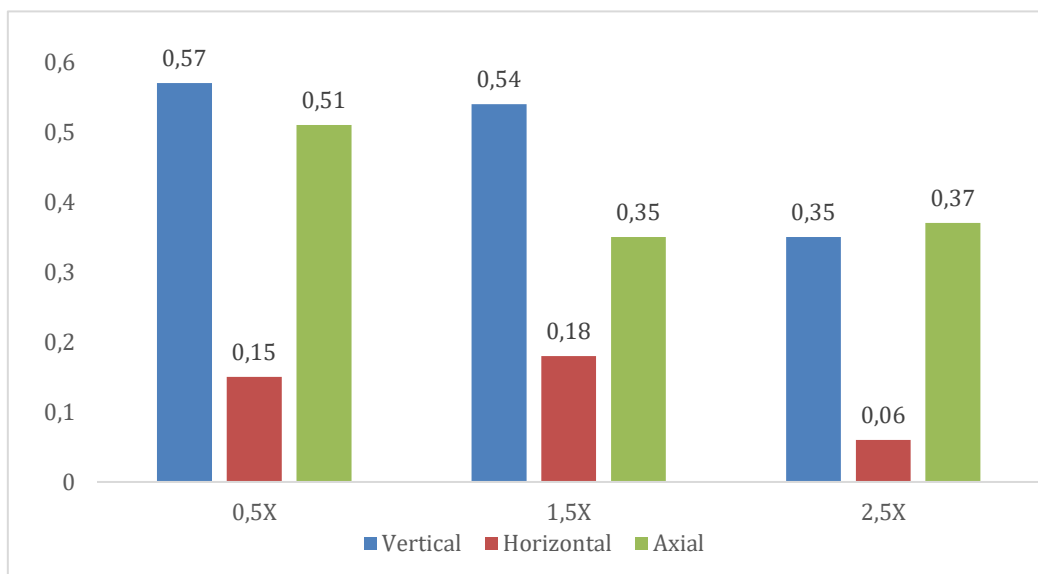
Tabela 13 - Sub-harmônicos por Posição: Frequência, Amplitude e Relação com 1XRPM, caso C.

Sub-harmônico	Posição	Frequência (Hz)	Amplitude (mm/s)	Relação com 1X
0,5X	Vertical	15	0,86	0,57
	Horizontal	15	0,39	0,15
	Axial	14	0,72	0,51
1,5X	Vertical	44	0,81	0,54
	Horizontal	43	0,47	0,18
	Axial	43	0,49	0,35
2,5X	Vertical	72	0,53	0,35
	Horizontal	72	0,16	0,06
	Axial	72	0,52	0,37

Fonte: Autoria própria (2025)

A Figura 70 ilustra graficamente a relação dos sub-harmônicos com a frequência de rotação do motor caso C, por posição.

Figura 70 - Gráfico com a relação dos sub-harmônicos com a frequência de rotação do motor caso C, por posição.



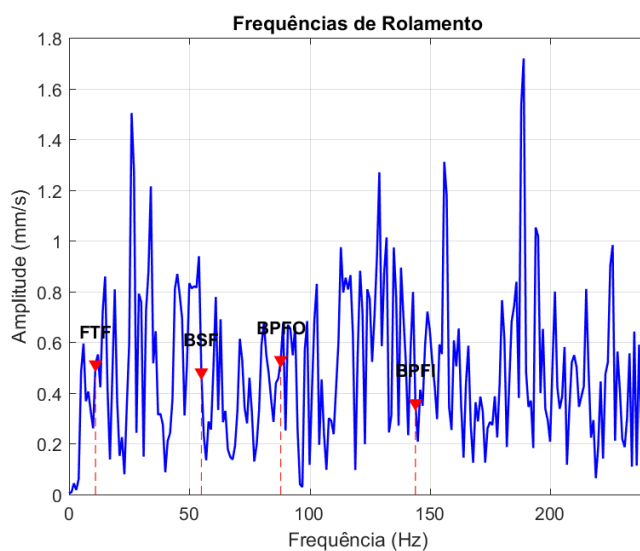
Fonte: Autoria própria (2025)

No estudo dos sub-harmônicos, representados pelas Figuras 64, 66 e 68, com os valores detalhados para cada posição na Tabela 13 e Figura 70, nota-se que os valores obtidos da relação entre os sub-harmônicos e o primeiro harmônico permanecem abaixo do valor limite de 0,8mm/s que caracteriza a folga mecânica. Portanto não há indícios da presença de folgas mecânicas para esse caso.

4.2.3.2 Espectro de falha nos rolamentos

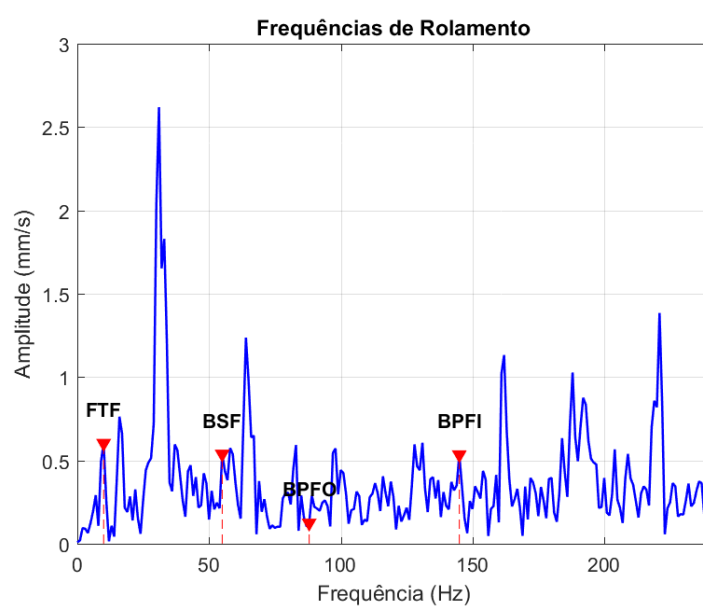
Nas Figuras 71, 72 e 73 são exibidos os espectros das frequências de falha nos rolamentos, para as posições analisadas do motor caso C.

Figura 71 - Espectro de falha em rolamentos, posição vertical, caso C.



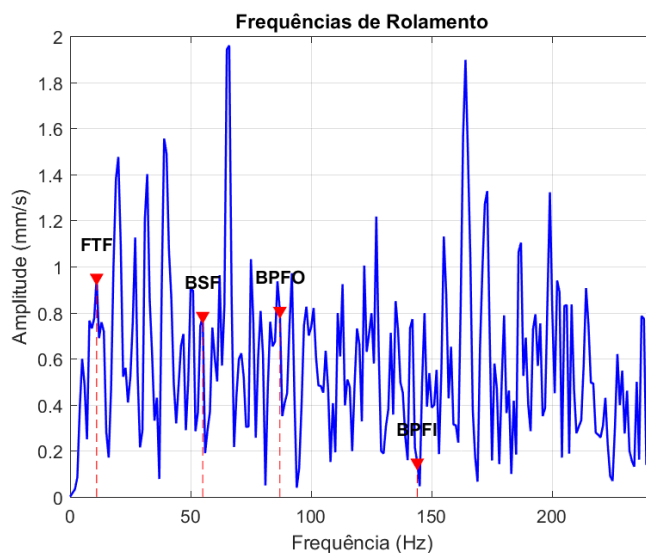
Fonte: Autoria própria (2025)

Figura 72 - Espectro de falha em rolamentos, posição horizontal, caso C.



Fonte: Autoria própria (2025)

Figura 73 - Espectro de falha em rolamentos, posição axial,
caso C.



Fonte: Autoria própria (2025)

Na Tabela 14, são apresentados os valores de amplitude para cada frequência característica dos rolamentos nas posições avaliadas.

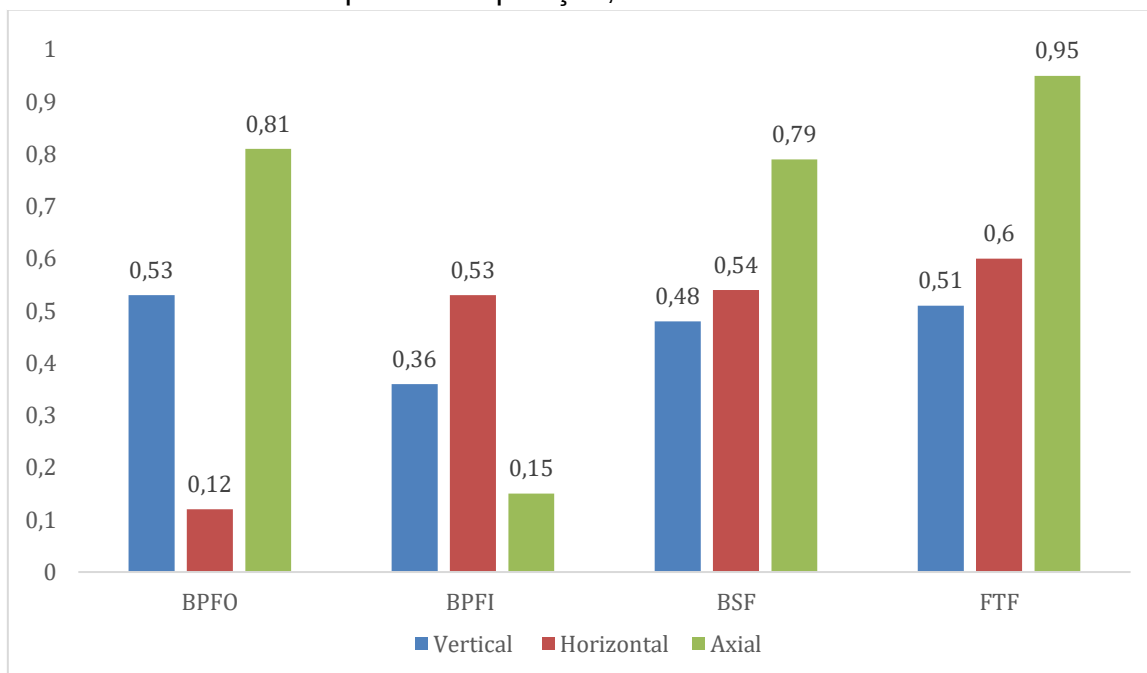
Tabela 14 - Frequências características do rolamento e suas amplitudes por posição de medição, motor caso C.

Posição	BPFO (Hz/ amp)	BPFI (Hz / amp)	BSF (Hz / amp)	FTF (Hz / amp)
Vertical	88,00 / 0,53	144,00 / 0,36	55,00 / 0,48	11,00 / 0,51
Horizontal	88,00 / 0,12	145,00 / 0,53	55,00 / 0,54	10,00 / 0,60
Axial	87,00 / 0,81	144,00 / 0,15	55,00 / 0,79	11,00 / 0,95

Fonte: Autoria própria (2025)

Para auxiliar a visualização, a Figura 74 apresenta as frequências de falha em rolamentos e suas amplitudes para o motor caso C.

Figura 74 - Gráfico de frequência de falha nos rolamentos e suas amplitudes para cada posição, motor caso C.



Fonte: Autoria própria (2025)

Ao avaliar os espectros dos rolamentos nas Figuras 71, 72, 73 e mais detalhadamente com os valores na Tabela 14 e Figura 74, observa-se que as frequências características apresentam altos níveis de amplitude, especialmente na posição axial. Esse comportamento é esperado, uma vez que a posição axial é o ponto de medição mais sensível para se detectar falha nos rolamentos.

Na posição axial, foram identificadas frequências associadas aos defeitos de FTF, falha na gaiola do rolamento, BPFO, falha na pista externa do rolamento e o BSF, que representa falha na superfície das esferas, sendo que essa última apresenta amplitude muito próxima do limite de 0,8mm/s. Além disso, a posição axial não apresenta picos bem definidos e presença de nível elevado de ruído, característico de motores com falha nos rolamentos.

5 CONCLUSÃO

De acordo com a aplicação desenvolvida, os resultados obtidos validam a eficácia do sistema, demonstrando a capacidade de identificação da condição real dos motores avaliados. A solução proposta demonstrou-se viável e de baixo custo, com potencial de ser implementada em um sistema de manutenção preditiva para motores de indução trifásica. A integração dos componentes do sistema, juntamente com o processo de comunicação com o servidor, foram satisfatórias e garantiram o sucesso da aplicação, permitindo a coleta e interpretação de dados.

A análise dos dados, em especial a vibração RMS, foi fundamental para a verificação da severidade da vibração de modo geral. Além disso, a análise espectral se mostrou eficaz ao conseguir identificar falhas específicas, como desbalanceamento, desalinhamento, folga mecânica e falha em rolamentos, fornecendo um diagnóstico mais preciso do comportamento dos componentes do sistema.

No entanto, algumas limitações devem ser consideradas. A principal é a taxa de amostragem, resultante do uso da rede Wi-Fi como meio de transmissão de dados. Essa limitação compromete a capacidade de detectar as falhas em alta frequência, como as associadas aos rolamentos, que, nesse trabalho, só puderam ser identificados a partir do terceiro estágio de falha. Isso se deve a baixa taxa de amostragem, que impede a detecção nos estágios iniciais de falha, por não ser capaz de capturar os componentes de altas frequências.

Outro ponto relevante foi a fragmentação do processo de análise, com uso de vários *softwares* para a recepção, armazenamento e processamentos dos dados. A integração dessas etapas em uma única plataforma com capacidade de análise em tempo real, traria maior eficiência, permitindo a otimização e a automação do processo de diagnóstico.

Dessa forma, o trabalho demonstrou que, mesmo com limitações, é possível implementar uma solução acessível e funcional para monitoramento preditivo. Além disso, o estudo deixa em aberto a possibilidade de melhorias futuras em termos de desempenho e integração para a otimização do processo.

REFERÊNCIAS

ABECOM. **Desalinhamento de eixos: O que é e como identificar?** Disponível em: <<https://www.abecom.com.br/desalinhamento-de-eixos/>>. Acesso em: 29 maio. 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Confiabilidade e manutenibilidade (NBR 5462:1994). Rio de Janeiro: ABNT, nov. 1994. Disponível em: <<https://ufsb.edu.br/propa/images/dinfra/coman/Legisla%C3%A7%C3%B5es/NBR-5462.pdf>>. Acesso em: 2 fev. 2025.

ANALOG DEVICES, Inc. ADXL345 Data Sheet: Revision B. Norwood (MA): Analog Devices, Inc., 2013. Disponível em: <<https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/adxl345-ep.pdf>> Acesso em: 27 mar. 2025.

ANTIONIOLLI, Edilar Bento. *Estudo comparativo de técnicas de medição e análise de vibrações para a manutenção preditiva em mancais de rolamentos*. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Florianópolis, 1999. Disponível em: <http://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/81086>. Acesso em: 27 mar. 2025.

ARDUROBOTICA. **ESP32 ESP-32 ESP-WROOM-32**. Disponível em: <https://www.ardurobotica.com.br/MLB-1058633344-esp32-esp-32-esp-wroom-32-pronto-entrega-_JM>. Acesso em: 7 maio. 2025.

ATZORI, Luigi; IERA, Antonio; MORABITO, Giacomo. The Internet of Things: A survey. **Computer Networks**, v. 54, n. 15, p. 2787–2805, out. 2010.

BELLINI, A. *et al.* Advances in Diagnostic Techniques for Induction Machines. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 55, n. 12, p. 4109–4126, dez. 2008.

BERNARD, J.; HAMROCK, B. J. Fundamentals of Machine Elements. New York: McGraw-Hill, 2005. Disponível em: <https://api.pageplace.de/preview/DT0400.9781482247503_A37871613/preview-9781482247503_A37871613.pdf>. Acesso em: 2 mar. 2025.

BLOCH, Heinz P.; GEITNER, Fred K. **Análise e solução de problemas de falhas de máquinas: gerenciamento prático de máquinas para plantas de processo**. Butterworth-Heinemann, 2012.

BONNETT, A. H.; SOUKUP, G. C. Cause and analysis of stator and rotor failures in three-phase squirrel-cage induction motors. *IEEE Transactions on Industry Applications*, v. 28, n. 4, p. 921-937, July/Aug. 1992. DOI: 10.1109/28.148460.

BONNETT, A. K.; SOUKUP, G. C. Cause and analysis of stator and rotor failures in 3-phase squirrel cage induction motors. **Conference Record of 1991 Annual Pulp and Paper Industry Technical Conference**, p. 22–42, 1991.

BRAGA, D. **Como o Desalinhamento de Eixos Ocorre e Quais os Perigos Para o seu Equipamento**. Disponível em: <<https://dynamox.net/como-o-desalinhamento-de-eixos-ocorre-e-quais-os-perigos-para-o-seu-equipamento/>>. Acesso em: 6 jun. 2025.

BRAGA, Lucas; MARQUES, Ana. **O que é Wi-Fi? Saiba como funciona a tecnologia de rede sem fio**. Disponível em: <<https://tecnoblog.net/responde/o-que-e-wi-fi-como-funciona/>>. Acesso em: 6 jun. 2025.

BRANCO FILHO, Gil. Indicadores e Índices de Manutenção. 1. ed. São Paulo: Ciência Moderna, 2006. 160 p. ISBN 978-8573934915.

BRANCO, Gil. A Organização, o Planejamento e o Controle da Manutenção. 1. ed. São Paulo: Ciência Moderna, 2020. 280 p. ISBN 978-8573936803.

BRIE, DAVID. MODELLING OF THE SPALLED ROLLING ELEMENT BEARING VIBRATION SIGNAL: AN OVERVIEW AND SOME NEW RESULTS. **Mechanical Systems and Signal Processing**, v. 14, n. 3, p. 353–369, maio 2000.

BRZAŃKAŁA, Patryk. **ESCOLHENDO OS LIMITES CORRETOS**. Disponível em: <<https://e-learning.info-marine.com/article-list/correct-limits>>. Acesso em: 15 jun. 2025.

CERRADA, Mariela *et al.* A review on data-driven fault severity assessment in rolling bearings. **Mechanical Systems and Signal Processing**, v. 99, p. 169–196, jan. 2018.

CHAPMAN, S. J. *Electric Machinery Fundamentals*. 5. ed. Disponível em: [https://elcom-team.com/Subjects/الكتب%20و%20الحلول/آلات%20كهربية%201/201%20machine-book-\(5th-ed\)-compressed.pdf](https://elcom-team.com/Subjects/الكتب%20و%20الحلول/آلات%20كهربية%201/201%20machine-book-(5th-ed)-compressed.pdf). Acesso em: 2 jun. 2025.

CHU, Thuy; NGUYEN, Tan; YOO, Hyunsang; WANG, Jihoon. A review of vibration analysis and its applications. *Heliyon*, v. 10, n. 5, p. e26282, 2024. Disponível em:

<<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405844024023132>>. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e26282>. Acesso em: 2 jun. 2025.

COSTA, E. da S. Diagnóstico de Defeitos Mecânicos em Máquinas Rotativas Usando Lógica Fuzzy Baseada no Espectro Completo de Vibrações. **Universidade Federal do Pará – UFPA**, 2011.

SEQUEIRA, Cláudia Dias. **A análise de vibrações como ferramenta para a melhoria da manutenção em aerogeradores**. 2012. Tese de Doutorado. Universidade NOVA de Lisboa (Portugal).

EHRICH, F. F. Handbook of Rotordynamics. 1. ed. Blacklick, OH, EUA: McGraw-Hill, 1992. ISBN B004FC5KBS.

EHRICH, Fredric F. Handbook of Rotordynamics. 3. ed. rev. New York: Krieger Publishing Company, 2004. 474 p. ISBN 978-1575242569..

EL HACHEMI BENBOUZID, M. A review of induction motors signature analysis as a medium for faults detection. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 47, n. 5, p. 984–993, 2000.

EMBARCATECH. Protocolos de Comunicação em IoT. 2024. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=S9AYgEvUZzQ>>. Acesso em: 27 mar. 2025.

ESPRESSIF SYSTEMS. **ESP32 Series Datasheet**. Disponível em: <https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf>. Acesso em: 5 jul. 2025.

FRADEN, Jacob. Handbook of Modern Sensors: Physics, Designs, and Applications. New York: Springer, 2016. Disponível em: <<https://rizkia.staff.telkomuniversity.ac.id/files/2017/11/Handbook-of-modern-sensors-physics-designs-and-applications-Fraden-Jacob-Springer-2016.pdf>>. Acesso em: 2 jun. 2025.

FRANCISCO, António. Motores Elétricos. 5. ed. atual. Lisboa: LIDEL, 2013. 196 p. ISBN 978-9728480349.

FRISWELL, Michael I.; PENNY, John E. T.; GARVEY, Seamus D.; LEES, Arthur W. Dynamics of Rotating Machines. 1. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2010. ISBN 978-0-521-85016-2. Disponível em: <<https://scispace.com/papers/dynamics-of-rotating-machines-499re2kizd>>. Acesso em: 2 jul. 2025.

GALAR, Diego; SANDBORN, P.; KUMAR, U. Maintenance Costs and Life Cycle Cost Analysis. 2017. DOI: 10.1201/b20477. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/327679387_Maintenance_costs_and_life_cycle_cost_analysis>. Acesso em: 20 jun. 2025.

GORDO, Nívia; FERREIRA, Joel. Módulos Especiais Mecânica – Elementos de Máquinas. 2025. Escola SENAI “Hessel Horácio Cherkassky”. Disponível em: <https://www.academia.edu/24381822/Elementos_de_maquinas_apostila_SENAI>. Acesso em: 27 jan. 2025.

GUBBI, Jayavardhana; BUYYA, Rajkumar; MARUSIC, Slaven; PALANISWAMI, Marimuthu. Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions. Future Generation Computer Systems, v. 29, n. 7, p. 1645-1660, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.future.2013.01.010>. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167739X13000241>>. Acesso em: 27 jan. 2025.

GUPTA, Vidushi. **What are the advantages of using MQTT for IoT Devices?** Disponível em: <<https://psiborg.in/advantages-of-using-mqtt-for-iot-devices/>>. Acesso em: 5 maio. 2025.

HIVEMQ. **Introducing the MQTT Protocol – MQTT Essentials: Part 1.** Disponível em: <<https://www.hivemq.com/blog/mqtt-essentials-part-1-introducing-mqtt/>>. Acesso em: 4 maio. 2025.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). ISO 286-1:2010 – Geometrical product specifications (GPS) — ISO code system for tolerances on linear sizes — Part 1: Basis of tolerances, deviations and fits. 2. ed. Genebra: ISO, abr. 2010. 38 p. Disponível em: <<https://www.iso.org/standard/45975.html>>. Acesso em: 2 mar. 2025.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). ISO 10816-3:2009 — Mechanical vibration — Evaluation of machine vibration by measurements on non-rotating parts — Part 3: Industrial machines with nominal power above 15 kW and nominal speeds between 120 r/min and 15 000 r/min when measured in situ. 2. ed. Genebra: ISO, 1 fev. 2009. 11 p. Disponível em: <<https://cdn.standards.iteh.ai/samples/50528/6b05d5f9b499455e883a91bacff92991/ISO-10816-3-2009.pdf>>. Acesso em: 2 maio. 2025.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). ISO 20816-1:2016 — Mechanical vibration — Measurement and evaluation of machine vibration — Part 1: General guidelines. Genebra: ISO, 15 nov. 2016. 13 p. Disponível em:

<<https://cdn.standards.iteh.ai/samples/63180/ace1232a76714dc48087a6cfe49c2bda/ISO-20816-1-2016.pdf>>. Acesso em: 2 jan. 2025.

JOSÉ, David; BORLIDO, Araújo; LEITÃO, Armando. Indústria 4.0 – Aplicação a Sistemas de Manutenção. 2017. Disponível em: <<https://core.ac.uk/download/pdf/302926185.pdf>>. Acesso em: 20 fev. 2025.

KARDEC, Alan Kardec Pinto; NASCIF, Júlio de Aquino Nascif Xavier. Manutenção: função estratégica. 3. ed. rev. e atual. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2009. Disponível em: <<http://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/TM285/2015-2/Conte%FAdos/Resumo%20Livro%20Manuten%E7%E3o.pdf>>. Acesso em: 2 mai. 2025.

KERSCHBAUMER, Ricardo. Microcontroladores. 2013. Disponível em: <<https://professor.luzerna.ifc.edu.br/ricardo-kerschbaumer/wp-content/uploads/sites/43/2018/02/Apostila-Microcontroladores.pdf>>. Acesso em: 27 fev. 2025.

KREY, O. **Você sabe o que é desbalanceamento?** Disponível em: <<http://www.simetrisa.com.br/entendendo-os-tipos-de-desbalanceamento/>>. Acesso em: 20 abr. 2025.

LENZI, A. Revisão Bibliográfica sobre Técnicas de Diagnóstico de Defeitos em Máquinas. **Relatório Parcial I e II, Setembro, 1991.**

LIU, Yiqi; BAZZI, Ali M. A review and comparison of fault detection and diagnosis methods for squirrel-cage induction motors: State of the art. **ISA Transactions**, v. 70, p. 400–409, set. 2017.

MAIER, A.; SHARP, A.; VAGAPOV, Y. Comparative Analysis and Practical Implementation of the ESP32 Microcontroller Module for the Internet of Things. 2018.

MARIANO NETO, Joaquim Alves. *Implementação da manutenção preditiva: uma abordagem proativa na manutenção 4.0*. Dissertação (Curso de Estado-Maior para Oficiais Superiores) – Escola de Guerra Naval, Rio de Janeiro, 2024.

MATHWORKS. **Order Analysis of a Vibration Signal**. Disponível em: <https://www.mathworks.com/help/signal/ug/order-analysis-of-a-vibration-signal.html?utm_source>. Acesso em: 12 maio. 2025.

MEDDINS, Bob. Introduction to Digital Signal Processing. Oxford; Boston: Newnes (imprint of Butterworth-Heinemann), 2000. 175 p. ISBN 0-7506-5048-6. Material em

PDF. Disponível em: <https://dl.icdst.org/pdfs/files/828e1139e4f9a6b3e03fefc4929c8818.pdf>. Acesso em: 2 jan. 2025.

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES. Estratégia Brasileira para a Transformação Digital. Brasília, DF: MCTI, 2018. 108 p. Disponível em: <https://www.gov.br/mcti/pt-br/centrais-de-conteudo/comunicados-mcti/estrategia-digital-brasileira/estrategiadigital.pdf>. Acesso em: 2 jan. 2025.

MODULARCURSOS.COM/. **modularcursos.com/**. Disponível em: modularcursos.com/. Acesso em: 6 jun. 2025.

MOSQUITTO, Eclipse. **Mosquitto**. Disponível em: <https://mosquitto.org/>. Acesso em: 6 jun. 2025.

MRABET, Hichem *et al.* A Survey of IoT Security Based on a Layered Architecture of Sensing and Data Analysis. **Sensors**, v. 20, n. 13, p. 3625, 28 jun. 2020.

NASAR, S. A.; UNNEWEHR, L. E. Electromechanics and Electric Machines. 2. ed. New York: John Wiley & Sons Inc., 1983.

NASCIF, Júlio. Manutenção Orientada para resultados. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2009.

NBR ISO 21940-11. NBR ISO 21940-11: Vibração mecânica – Balanceamento de rotores – Parte 11: Procedimentos e tolerâncias para rotores em estado rígido. 2016.

NEOCHARGE. **COMO FUNCIONA O MOTOR DE UM CARRO ELÉTRICO**. Disponível em: <https://www.neocharge.com.br/tudo-sobre/carro-eletrico/motor-como-funciona>. Acesso em: 6 jun. 2025.

NEUPANE, Dhiraj; KIM, Yunsu; SEOK, Jongwon. Bearing Fault Detection Using Scalogram and Switchable Normalization-Based CNN (SN-CNN). **IEEE Access**, v. 9, p. 88151–88166, 2021.

ASSOCIAÇÃO PORTUGUESA DE NORMALIZAÇÃO. **NP EN 13306:2007 — Manutenção: Terminologia da manutenção**. Lisboa: IPQ, 2007.

OASIS. **MQTT Version 5.0. OASIS Standard**. Disponível em: <https://docs.oasis-open.org/mqtt/mqtt/v5.0/os/mqtt-v5.0-os.html>. Acesso em: 4 maio. 2025.

OLIVEIRA, Thiago; GOMES, GARRETO; NUNES, Carvalho. Estudos em engenharia e inovação - Volume 6. **Estudos em engenharia e inovação - Volume 6**, 31 out. 2023.

OPENLOGIC. **Visão geral do MySQL: principais recursos, benefícios e casos de uso**. Disponível em: <<https://www.openlogic.com/blog/mysql-overview>>. Acesso em: 6 jun. 2025.

PATEL, Tejas H.; DARPE, Ashish K. Experimental investigations on vibration response of misaligned rotors. **Mechanical Systems and Signal Processing**, v. 23, n. 7, p. 2236–2252, out. 2009.

PENG, Z.; CHU, F.; HE, Y. VIBRATION SIGNAL ANALYSIS AND FEATURE EXTRACTION BASED ON REASSIGNED WAVELET SCALOGRAM. **Journal of Sound and Vibration**, v. 253, n. 5, p. 1087–1100, jun. 2002.

PEREIRA, Filipe José Didelet; SENA, Francisco. Manutenção de Instalações Técnicas. Lisboa: Engebook, 2016. ISBN 978-989-723-140-7.

PETRUZELLA, Frank D. Electric Motors and Control Systems. New York: McGraw-Hill, Inc., 2009. Disponível em: <https://www.academia.edu/92738437/Electric_Motors_Control_Systems_Electric>. Acesso em: 2 jun. 2025.

RAILWAY. **Deploy infrastructure made easy**. Disponível em: <<https://railway.com/>>. Acesso em: 6 jun. 2025.

RANDALL, Robert Bond. Vibration-Based Condition Monitoring: Industrial, Aerospace, and Automotive Applications. Hoboken: John Wiley & Sons, 2011. ISBN 978-0-470-74785-8 (impresso); 978-0-470-97766-8 (online). DOI: 10.1002/9780470977668.

RAO, J. S. Vibratory Condition Monitoring of Machines. New Delhi: Narosa, 2000. 442 p. ISBN 978-0-8493-0937-3.

RAO, Singiresu S. Vibrações Mecânicas. 4. ed. São Paulo: Pearson Education, 2009. 448 p. ISBN 978-85-7605-200-5.

SAYANEKAR, Jitendra. **Building Your IoT Cloud Architecture: Guide and Strategies**. Disponível em: <<https://www.calsoftinc.com/blogs/building-your-iot-cloud-architecture-guide-and-strategies.html>>. Acesso em: 6 jun. 2025.

SENAI-SP. Manutenção. Jundiaí, SP: Escola SENAI “Conde Alexandre Siciliano”, Departamento Regional de São Paulo, 2000. Material didático em PDF (284 p.). Disponível em: <<https://bmalbert.yolasite.com/resources/Manuten%C3%A7%C3%A3o.pdf>>. Acesso em: 2 mar. 2025.

SKF RELIABILITY SYSTEMS. Vibration Diagnostic Guide. CM5003. 2000. 28 p. Disponível em: <https://www.academia.edu/13497825/SKF_Reliability_Systems_Vibration_Diagnostic_Guide_CM5003>. Acesso em: 2 set. 2025.

SKF RELIABILITY SYSTEMS. QUADRO ILUSTRATIVO DE DIAGNÓSTICOS DE VIBRAÇÃO. Disponível em: <https://www.academia.edu/35135983/SKF_Reliability_Systems_SKF_Reliability_Systems_QUADRO_ILUSTRATIVO_DE_DIAGN%C3%93STICOS_DE_VIBRA%C3%87%C3%83O_O_ESPECTRO_T%C3%8DPICO_REL%C3%87%C3%83O_DE_FASES_OBSERVA%C3%87%C3%95ES_DESBALANCEAMENTO_DE_MASSA>. Acesso em: 6 jun. 2025.

TAVNER, Peter J.; FAULSTICH, Stefan; HAHN, Berthold; VAN BUSSEL, Gerard J. W. Reliability & Availability of Wind Turbine Electrical & Electronic Components. EPE Journal, v. 20, n. 4, p. 45–50, dez. 2010. DOI: 10.1080/09398368.2010.11463777. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/48776540_Reliability_Availability_of_Wind_Turbine_Electrical_Electronic_Components>. Acesso em: 1 jun. 2025.

VERRI, Luiz Alberto. Gerenciamento pela qualidade total na manutenção industrial: aplicação prática. Revista Toro, dez. 2007. Disponível em: <<https://www.verriveritatis.com.br/Toro/dezembro2007/qualidade.pdf>>. Acesso em: 2 jun. 2025.

WEG. Motores Elétricos. Disponível em: <<https://www.weg.net>>. Acesso em: 27 fev. 2025.

WENDLING, Marcelo. Sensores. 2010. Disponível em: <<https://www.feg.unesp.br/Home/PaginasPessoais/ProfMarceloWendling/4---sensores-v2.0.pdf>>. Acesso em: 27 mar. 2025.

APÊNDICE A – FIRMWARE DO ESP32

```
#include <Wire.h>
#include <WiFi.h>
#include <WiFiClient.h>
#include <PubSubClient.h>
#include <Adafruit_ADXL345_U.h>

// Configurações Wi-Fi
const char* ssid = "Silva";
const char* password = "12345678";

// Configurações MQTT
const char* mqtt_server = "192.XXX.XX.X"; // Endereço do broker
const int mqtt_port = 1883; // Porta padrão MQTT
const char* MQTT_TOPIC_VIBRATION = "vib"; // Tópico de vibração

WiFiClient espClient;
PubSubClient client(espClient);
Adafruit_ADXL345_Unified accel = Adafruit_ADXL345_Unified(123);

// Buffer para armazenar 5 amostras
#define BUFFER_SIZE 5
String buffer[BUFFER_SIZE];
int bufferIndex = 0;

// Contagem de amostras enviadas por segundo
unsigned long lastTime = 0;
int amostrasEnviadas = 0;

void setup_wifi() {
  Serial.print("Conectando ao Wi-Fi...");
  WiFi.begin(ssid, password);
  while (WiFi.status() != WL_CONNECTED) {
    delay(500);
    Serial.print(".");
  }
  Serial.println("\n Wi-Fi conectado!");
}

void reconnect_mqtt() {
  while (!client.connected()) {
    Serial.print(" Conectando ao MQTT...");

    if (client.connect("ESP32_Client")) {
      Serial.println(" Conectado ao MQTT!");
    } else {
```

```

        Serial.print(" Falha, rc=");
        Serial.print(client.state());
        Serial.println(" Tentando novamente em 5 segundos...");
        delay(5000);
    }
}

void setup() {
    Serial.begin(115200);
    setup_wifi();
    client.setServer(mqtt_server, mqtt_port);

    if (!accel.begin()) {
        Serial.println(" Falha ao detectar o ADXL345!");
        while (1);
    }

    accel.setDataRate(ADXL345_DATARATE_800_HZ);
    accel.setRange(ADXL345_RANGE_16_G);
}

void loop() {
    if (!client.connected()) reconnect_mqtt();
    client.loop();

    sensors_event_t event;
    accel.getEvent(&event);
    unsigned long t = micros();

    buffer[bufferIndex++] = "{" + String(event.acceleration.x, 2) + "," + String(event.acceleration.y, 2) + "," + String(event.acceleration.z, 2) + "," + String(t) + "}";

    if (bufferIndex >= BUFFER_SIZE) {
        String payload = "[" + buffer[0] + "," + buffer[1] + "," + buffer[2] + "," + buffer[3] + "," + buffer[4] + "]";
        client.publish(MQTT_TOPIC_VIBRATION, payload.c_str());
        bufferIndex = 0;
        amostrasEnviadas += BUFFER_SIZE;
    }
    // Exibir número de amostras enviadas por segundo
    if (millis() - lastTime >= 1000) {
        Serial.print(" Amostras enviadas no último segundo: ");
        Serial.println(amostrasEnviadas);
        amostrasEnviadas = 0;
        lastTime = millis();
    }
}

```

APÊNDICE B – SCRIPT PARA COLETA DE DADOS DE VIBRAÇÃO VIA MQTT E INSERÇÃO EM MYSQL

```
import json
import mysql.connector
from paho.mqtt.client import Client

# Configurações do MQTT (broker local sem autenticação)
MQTT_BROKER = "192.168.18.8"
MQTT_PORT = 1883
MQTT_TOPIC = "vib"

# Configurações do Banco de Dados
DB_HOST = "autorack.proxy.rlwy.net"
DB_USER = "root"
DB_PASSWORD = "TYeigBBFXVmfrpLsoXVQyfYpRhLxjVkJ"
DB_NAME = "railway"
DB_PORT = 47777
DB_TABLE = "mqtt_data7" # Nome da tabela

# Conexão com o Banco de Dados
def connect_to_db():
    try:
        connection = mysql.connector.connect(
            host=DB_HOST,
            user=DB_USER,
            password=DB_PASSWORD,
            database=DB_NAME,
            port=DB_PORT
        )
        print("[INFO] Conexão com o banco de dados bem-sucedida.")
        return connection
    except mysql.connector.Error as err:
        print(f"[ERROR] Erro ao conectar ao banco de dados: {err}")
        return None

# Inserção de dados no Banco de Dados
def insert_data_to_db(connection, topic, data_json):
    try:
        cursor = connection.cursor()
        query = f"""
            INSERT INTO {DB_TABLE} (topic, data)
            VALUES (%s, %s)
            """
        cursor.execute(query, (topic, data_json))
        connection.commit()
        print(f"[INFO] Dados inseridos - Tópico: {topic}, Dados: {data_json}")
```

```

except mysql.connector.Error as err:
    print(f"[ERROR] Erro ao inserir dados: {err}")
finally:
    cursor.close()

# Callback para conexão MQTT
def on_connect(client, userdata, flags, rc):
    if rc == 0:
        print("[INFO] Conectado ao broker MQTT.")
        client.subscribe([(MQTT_TOPIC, 0)]) # Subscreve ao tópico vib
    else:
        print(f"[ERROR] Falha na conexão MQTT. Código: {rc}")

# Callback para mensagens MQTT
def on_message(client, userdata, msg):
    print(f"[INFO] Mensagem recebida - Tópico: {msg.topic}, Mensagem: {msg.payload.decode()}")
    try:
        payload = json.loads(msg.payload.decode())
        data_json = json.dumps(payload)
        connection = connect_to_db()
        if connection:
            insert_data_to_db(connection, topic=msg.topic, data_json=data_json)
            connection.close()
    except json.JSONDecodeError:
        print("[ERROR] Mensagem não está no formato JSON.")
    except Exception as e:
        print(f"[ERROR] Erro ao processar mensagem: {e}")

# Configuração do cliente MQTT
client = Client()
client.on_connect = on_connect
client.on_message = on_message

# Conectar ao broker e iniciar o loop
try:
    print("[INFO] Conectando ao broker MQTT...")
    client.connect(MQTT_BROKER, MQTT_PORT, 60)
    client.loop_forever()
except Exception as e:
    print(f"[ERROR] Erro ao conectar ao broker MQTT: {e}")

```

APÊNDICE C – SCRIPT PARA ANÁLISE DE VIBRAÇÃO E DIAGNÓSTICO DE FALHAS

```
% Script principal para diagnóstico de vibração de motores industriais
% Autor: [Seu Nome]
% Data: [Data]
clear; clc; close all;

%% ----- 1) Parâmetros principais de aquisição e pré-processamento --
-----
% params.dataFile      : nome do arquivo de dados (XLSX)
% params.Fs            : taxa de amostragem em Hz
% params.hpCutoff      : frequência de corte do filtro high-pass em Hz
% params.bandWidth     : largura de banda (Hz) para cálculo de RMS por faixa
params.dataFile        = 'mbagsr_09_lav_480.xlsx';
params.Fs              = 480;    % Hz - taxa de amostragem
params.hpCutoff        = 5;      % Hz - filtro passa-alta
params.bandWidth       = 2;      % Hz - largura de banda para RMS

%% ----- 2) Parâmetros de análise espectral e rotação -----
---
% params.f_rot         : frequência de rotação do motor (Hz)
% params.rotBandWidth  : tolerância da banda para buscar harmônicos
% params.harmWindow    : janela para busca de harmônicos (Hz)
params.f_rot           = 29;     % Hz - frequência de rotação
params.rotBandWidth    = 5;      % Hz - tolerância para harmônicos
params.harmWindow      = 5;      % Hz - janela para busca de harmônicos

%% ----- 3) Parâmetros do rolamento -----
% params.bearing.nBalls : número de esferas
% params.bearing.ballDia : diâmetro da esfera (m)
% params.bearing.pitchDia : diâmetro de passo (m)
% params.bearing.contactAng : ângulo de contato (graus)
% params.rotFreq        : igual a f_rot (Hz)
params.bearing.nBalls  = 8;      % número de esferas
params.bearing.ballDia = 0.0111; % m - diâmetro da esfera
params.bearing.pitchDia = 0.045; % m - diâmetro de passo
params.bearing.contactAng = 0;   % graus - ângulo de contato
params.rotFreq         = params.f_rot; % Hz

%% ----- 4) Limiares de diagnóstico (ISO 20816, espectrais,
estatísticos etc.) -----
% Desbalanceamento se A2/A1 < params.ratio12
% Desalinhamento se A2/A1 > params.ratio12max
params.ratio12        = 0.2;    % desbalanceamento
params.ratio12max     = 0.8;    % desalinhamento

% RMS de baixa frequência (folga mecânica)
params.limLowFreqRMS = 0.8;

% Limiares de falhas em rolamentos (mm/s)
params.limBPFO        = 0.8;
params.limBPFI        = 0.8;
params.limBSF         = 0.8;
params.limFTF         = 0.8;
```

```

% Norma RMS global (por potência em CV)
params.powerCV      = 7.5;
params.normRMS_CV20 = [2.8, 4.5];
params.normRMS_high = [4.5, 7.1];

%% ----- Pipeline de processamento -----
[v_global, t] = read_and_preprocess(params);
stats         = time_domain_stats(v_global, t, params);
[fftData, bandData] = compute_fft_band_rms(v_global, params);
rotData       = rotation_analysis(v_global, fftData, bandData, params);
diagnosisText = make_diagnosis(stats, rotData, bandData, params);
fprintf('\n--- Diagnóstico Final ---\n%s\n', diagnosisText);
plot_and_save_results(t, v_global, stats, fftData, bandData, rotData, params);

%% ----- Função make_diagnosis -----
function diagnosisText = make_diagnosis(stats, rotData, bandData, params)
    % Verifica harmônicos disponíveis
    if isempty(rotData.amps_harm)
        diagnosisText = 'Dados insuficientes para diagnóstico por harmônicos.';
        return;
    end

    A1 = rotData.amps_harm(1);
    if A1 == 0 || isnan(A1)
        diagnosisText = 'Amplitude de 1xRPM nula ou inválida. Diagnóstico impedido.';
        return;
    end

    defList = {};
    alertList = {};

    %% 1) Desbalanceamento e desalinhamento via harmônicos principais
    if numel(rotData.amps_harm) >= 2
        A2 = rotData.amps_harm(2);
        r21 = A2 / A1;
        % Relaciona a frequências detectadas e amplitudes
        fprintf('Frequências Harmônicas: 1x=%.2f Hz (A1=%.2f mm/s), 2x=%.2f Hz (A2=%.2f mm/s)\n', ...
            rotData.freqs_harm(1), A1, rotData.freqs_harm(2), A2);
        fprintf('Relação A2/A1 = %.2f\n', r21);

        if r21 < params.ratio12
            defList{end+1} = sprintf('Desbalanceamento: A2/A1 = %.2f < %.2f', r21, params.ratio12);
        elseif r21 > params.ratio12max
            defList{end+1} = sprintf('Desalinhamento: A2/A1 = %.2f > %.2f', r21, params.ratio12max);
        end
    end

    %% 2) Relação de sub-harmônicos e 1xRPM (Folga Mecânica)
    subOrders = [0.5, 1.5, 2.5];
    freqsSub = rotData.freqs_sub;
    ampsSub = rotData.amps_sub;
    % Imprime frequências e amplitudes dos sub-harmônicos
    for k = 1:numel(subOrders)
        if ~isnan(freqsSub(k))

```

```

        fprintf('Sub-harmônico %.1fx: f=%.2f Hz, A=%.2f mm/s\n', subOrders(k),
freqsSub(k), ampsSub(k));
        relSub = ampsSub(k) / A1;
        fprintf('Relação A_sub/A1 = %.2f\n', relSub);
    end
end
% Verifica se todos os sub-harmônicos 0.5x,1.5x,2.5x > 80% de A1
allAbove = true;
for k = 1:3
    if isnan(ampsSub(k)) || ampsSub(k) <= 0.8 * A1
        allAbove = false;
        break;
    end
end
if allAbove
    defList{end+1} = 'Folga mecânica: todos os sub-harmônicos (0.5x, 1.5x,
2.5x) > 80% de A1';
end

%% 3) Ajuste de limite de RMS global (ISO20816)
if params.powerCV <= 20
    limNorm = params.normRMS_CV20(1);
    limCrit = params.normRMS_CV20(2);
else
    limNorm = params.normRMS_high(1);
    limCrit = params.normRMS_high(2);
end

%% 4) Falhas em rolamentos
if isfield(bandData,'bpfo_amp')
    if bandData.bpfo_amp > params.limBPFO, defList{end+1} = 'Falha no anel
externo (BPFO)'; end
    if bandData.bpfi_amp > params.limBPFI, defList{end+1} = 'Falha no anel
interno (BPFI)'; end
    if bandData.bsf_amp > params.limBSF, defList{end+1} = 'Falha de esferas
(BSF)'; end
    if bandData.ftf_amp > params.limFTF, defList{end+1} = 'Falha no trem
(FTF)'; end
else
    alertList{end+1} = 'Dados de rolamentos não disponíveis.';
end

%% 5) Estado global RMS
if stats.rms_global <= limNorm
    state = 'BOA';
elseif stats.rms_global <= limCrit
    state = 'ATENÇÃO';
else
    state = 'CRÍTICO';
end

%% Monta texto de saída
if isempty(defList) && isempty(alertList) && strcmp(state,'BOA')
    diagnosisText = sprintf('\nCondições normais. RMS global = %.2f mm/s
[%s]', stats.rms_global, state);
    return;
end
lines = {};
if ~isempty(defList)

```

```

        lines{end+1} = 'Defeitos detectados: ';
        for i = 1:numel(defList)
            lines{end+1} = [' - ' defList{i}];
        end
    end
    if ~isempty(alertList)
        lines{end+1} = '';
        lines{end+1} = 'Alertas: ';
        for i=1:numel(alertList)
            lines{end+1} = [' - ' alertList{i}];
        end
    end
    lines{end+1} = sprintf('\nRMS global = %.2f mm/s [%s]', stats.rms_global,
state);
    diagnosisText = strjoin(lines, '\n');
end

%% ----- Função compute_fft_band_rms -----
function [fftData, bandData] = compute_fft_band_rms(v_global, params)
    % Calcula FFT, RMS por banda e dados de falhas em rolamentos
    % Retorna:
    %   fftData.f e fftData.P1_corr
    %   bandData.freq_band, bandData.rms_band
    %   bandData.bpfo_amp, bandData.bpfo_freq, etc.

    % Tolerância de frequência para busca de falhas
    if isfield(params, 'freqTol')
        tol = params.freqTol;
    else
        tol = 1; % Hz
    end

    N = length(v_global);
    Fs = params.Fs;

    % Janela Hanning e correção de ganho
    win = hann(N);
    gain_factor = 1/mean(win);
    vw = v_global .* win;

    % FFT
    Y = fft(vw);
    P2 = abs(Y/N);
    P1 = P2(1:floor(N/2)+1);
    P1(2:end-1) = 2*P1(2:end-1);
    P1_corr = P1 * gain_factor;

    % Frequências correspondentes
    f = Fs*(0:floor(N/2)) / N;
    fftData.f = f;
    fftData.P1_corr = P1_corr;

    % RMS por banda de frequência
    bw = params.bandwidth;
    numBands = ceil(f(end)/bw);
    bandData.freq_band = zeros(numBands,1);
    bandData.rms_band = zeros(numBands,1);
    for i = 1:numBands
        f_low = (i-1)*bw;

```

```

    f_high = i*bw;
    idx = f >= f_low & f < f_high;
    if any(idx)
        bandData.freq_band(i) = mean(f(idx));
        bandData.rms_band(i) = sqrt(trapz(f(idx), (P1_corr(idx)).^2));
    else
        bandData.freq_band(i) = (f_low + f_high)/2;
        bandData.rms_band(i) = 0;
    end
end

% RMS de baixa frequência (0.5 a 10 Hz)
lf_idx = f >= 0.5 & f <= 10;
if any(lf_idx)
    bandData.lofreq_rms = sqrt(trapz(f(lf_idx), (P1_corr(lf_idx)).^2));
else
    bandData.lofreq_rms = NaN;
end

% --- Frequências teóricas de falha de rolamento ---
b = params.bearing;
n = b.nBalls;
d = b.ballDia;
D = b.pitchDia;
phi = deg2rad(b.contactAng);
fr = params.rotFreq;

freq_theo.BPFO = (n/2)*(1 - (d/D)*cos(phi))*fr;
freq_theo.BPFI = (n/2)*(1 + (d/D)*cos(phi))*fr;
freq_theo.BSF = (D/(2*d))*(1 - (d/D)^2*cos(phi)^2)*fr;
freq_theo.FTF = (1/2)*(1 - (d/D)*cos(phi))*fr;

% Exibe frequências teóricas e janelas
fprintf('\n--- Frequências Teóricas de Falha e Janelas (±%.2f Hz) ---\n', tol);
fields = fieldnames(freq_theo);
for k = 1:numel(fields)
    fld = fields{k};
    f0 = freq_theo.(fld);
    fprintf('%s: teórica = %.2f Hz, janela = [%.2f, %.2f] Hz\n', fld, f0, f0-
tol, f0+tol);
end

% Busca máximos dentro da janela e armazena
fprintf('\n--- Frequências Detectadas e Amplitudes ---\n');
for k = 1:numel(fields)
    fld = fields{k};
    f0 = freq_theo.(fld);
    idxW = f >= (f0 - tol) & f <= (f0 + tol);
    if any(idxW)
        [~, rel] = max(P1_corr(idxW));
        inds = find(idxW);
        idxMax = inds(rel);
        ampVal = P1_corr(idxMax);
        freqVal = f(idxMax);
    else
        ampVal = NaN;
        freqVal = NaN;
    end
end
% Armazena no bandData

```

```

        bandData([lower(fld) '_amp']) = ampVal;
        bandData([lower(fld) '_freq']) = freqVal;
        fprintf('%s detectada em = %.2f Hz (amp = %.2f mm/s)\n', fld, freqVal,
ampVal);
    end
end

%% ----- Função read_and_preprocess (ATUALIZADA) -----
function [v_global_filtered, t] = read_and_preprocess(params)
    % Verifica existência do arquivo
    if exist(params.dataFile, 'file') ~= 2
        error('Arquivo de dados não encontrado: %s', params.dataFile);
    end

    % Leitura dos dados (assumindo colunas: ax, ay, az, vx, vy, vz)
    dados = readmatrix(params.dataFile);
    if size(dados,2) < 3
        error('O arquivo %s deve conter pelo menos 3 colunas (ax, ay, az).',
params.dataFile);
    end
    ax = dados(:,1);
    ay = dados(:,2);
    az = dados(:,3);

    % Tempo entre amostras (ms)
    dt_ms = 1000 / params.Fs;

    % Converte aceleração (m/s^2) em velocidade (mm/s) por integração simples
    vx = ax * dt_ms;
    vy = ay * dt_ms;
    vz = az * dt_ms;

    % Velocidade global (mm/s)
    v_global = sqrt(vx.^2 + vy.^2 + vz.^2);

    % Filtro high-pass de 2ª ordem (Butterworth)
    Wn_low = params.hpCutoff / (params.Fs/2);
    if Wn_low <= 0 || Wn_low >= 1
        error('Frequência de corte alto-pass inválida: %f Hz', params.hpCutoff);
    end
    [b,a] = butter(2, Wn_low, 'high');
    v_global_filtered = filtfilt(b, a, v_global);

    % Vetor de tempo (s)
    N = length(v_global_filtered);
    t = (0:N-1) / params.Fs;
end

%% ----- Função rotation_analysis -----
function rotData = rotation_analysis(v_global, fftData, bandData, params)
    Fs = params.Fs;
    f0 = params.f_rot;
    f = fftData.f;
    P = fftData.P1_corr;
    maxH = floor(f(end) / f0);
    tol = 1; % Hz para sub-harmônicos

    % RMS rotacional no domínio do tempo (filtro banda-passante)

```

```

low_cut = max(f0 - params.rotBandWidth, eps);
high_cut = min(f0 + params.rotBandWidth, Fs/2 - eps);
[bp_b,a_bp] = butter(2, [low_cut high_cut]/(Fs/2), 'bandpass');
v_rot_time = filtfilt(bp_b, a_bp, v_global);
rotData.rms_rot_time = sqrt(mean(v_rot_time.^2));

% RMS rotacional via FFT por banda
[~, idxBand] = min(abs(bandData.freq_band - f0));
if ~isempty(idxBand)
    rotData.rms_rot_fft = bandData.rms_band(idxBand);
else
    rotData.rms_rot_fft = NaN;
end

% Harmônicos k×f0
rotData.freqs_harm = nan(1, maxH);
rotData.amps_harm = nan(1, maxH);
for k = 1:maxH
    tgt = k * f0;
    f_low = max(tgt - params.rotBandWidth, 0);
    f_high = min(tgt + params.rotBandWidth, f(end));
    idx = find(f >= f_low & f <= f_high);
    if any(idx)
        [amp, loc] = max(P(idx));
        idAll = idx(loc);
        rotData.freqs_harm(k) = f(idAll);
        rotData.amps_harm(k) = amp;
    end
end

% Sub-harmônicos (k - 0.5)×f0
rotData.freqs_sub = nan(1, maxH);
rotData.amps_sub = nan(1, maxH);
for k = 1:maxH
    tgt = (k - 0.5) * f0;
    if tgt > 0 && tgt <= f(end)
        idx = find(f >= (tgt - tol) & f <= (tgt + tol));
        if ~isempty(idx)
            [amp, loc] = max(P(idx));
            idAll = idx(loc);
            rotData.freqs_sub(k) = f(idAll);
            rotData.amps_sub(k) = amp;
        end
    end
end

% Razão 2×/1× (caso exista)
if numel(rotData.amps_harm) >= 2
    rotData.ratio_2_1 = rotData.amps_harm(2) / rotData.amps_harm(1);
else
    rotData.ratio_2_1 = NaN;
end

% Frequências e amplitudes de rolamentos de bandData
fields = {'bpfo', 'bpfi', 'bsf', 'ftf'};
for i = 1:numel(fields)
    fld = fields{i};
    rotData.(['fld', '_freq']) = bandData.(['fld', '_freq']);
    rotData.(['fld', '_amp']) = bandData.(['fld', '_amp']);
end

```

```

end
end

%% ----- Função time_domain_stats -----
function stats = time_domain_stats(v_global, t, params)
    % Calcula estatísticas no domínio do tempo
    % Retorna struct com: rms_global
    stats.rms_global = sqrt(mean(v_global.^ 2));
    % Impressão opcional
    fprintf('RMS global = %.3f mm/s\n', stats.rms_global);

end

%% ----- Função plot_and_save_results -----
function plot_and_save_results(t, v_global, stats, fftData, bandData, rotData,
params)
    % Cria pasta de resultados se não existir
    if ~exist('results', 'dir')
        mkdir('results');
    end
    ts = datestr(now, 'yyyymmdd_HHMMSS');

    f = fftData.f;
    P = fftData.P1_corr;
    yOff = 0.05 * (max(P) - min(P)); % deslocamento para texto

    %% 1) Espectro: harmônicos e sub-harmônicos
    fig1 = figure('Visible', 'off', 'Units', 'pixels', 'Position', [100 100 800
600]);
    plot(f, P, 'b', 'LineWidth', 1.2); hold on;
    xlabel('Frequência (Hz)');
    ylabel('Amplitude (mm/s)');
    title('Espectro e Harmônicos/Sub-harmônicos');
    grid on;
    xlim([0, max(f)]);

    % Harmônicos 1x, 2x, 3x
    for k = 1:3
        if k <= numel(rotData.freqs_harm)
            fk = rotData.freqs_harm(k);
            Ak = rotData.amps_harm(k);
            if ~isnan(fk)
                plot([fk fk], [0 Ak], '--r');
                plot(fk, Ak, 'rv', 'MarkerFaceColor', 'r');
                text(fk, Ak + yOff, sprintf('%dX', k), ...
                    'HorizontalAlignment', 'center', 'VerticalAlignment',
'bottom', 'FontWeight', 'bold');
            end
        end
    end

    % Sub-harmônicos 0.5x, 1.5x, 2.5x
    subOrders = [0.5 1.5 2.5];
    for i = 1:numel(subOrders)
        fk = rotData.freqs_sub(i);
        Ak = rotData.amps_sub(i);
        if ~isnan(fk)
            plot([fk fk], [0 Ak], '--r');
            plot(fk, Ak, 'rv', 'MarkerFaceColor', 'r');
        end
    end

```

```

        text(fk, Ak + yOff, sprintf('%.1fX', subOrders(i)), ...
            'HorizontalAlignment', 'center', 'VerticalAlignment', 'bottom',
            'FontWeight', 'bold');
    end
end

saveas(fig1, fullfile('results', ['spectrum_harm_sub_' ts '.png']));
close(fig1);

%% 2) Espectro: apenas frequências de rolamento
fig2 = figure('Visible', 'off', 'Units', 'pixels', 'Position', [100 100 800
600]);
plot(f, P, 'b', 'LineWidth', 1.2); hold on;
xlabel('Frequência (Hz)');
ylabel('Amplitude (mm/s)');
title('Frequências de Rolamento');
grid on;
xlim([0, max(f)]);

fields = {'bpfo', 'bpfi', 'bsf', 'ftf'};
names = {'BPFO', 'BPFI', 'BSF', 'FTF'};
for i = 1:numel(fields)
    fld = fields{i};
    fk = bandData.([fld '_freq']);
    Ak = bandData.([fld '_amp']);
    if ~isnan(fk)
        plot([fk fk], [0 Ak], '--r');
        plot(fk, Ak, 'rv', 'MarkerFaceColor', 'r');
        text(fk, Ak + yOff, names{i}, ...
            'HorizontalAlignment', 'center', 'VerticalAlignment', 'bottom',
            'FontWeight', 'bold');
    end
end

saveas(fig2, fullfile('results', ['spectrum_bearing_' ts '.png']));
close(fig2);

%% 3) Sinal no domínio do tempo com linha de RMS global
fig3 = figure('Visible', 'off', 'Units', 'pixels', 'Position', [100 100 800
600]);
plot(t, v_global, 'b', 'LineWidth', 1.2); hold on;
h = reffline(0, stats.rms_global);
h.LineStyle = '--';
h.Color = [0.85 0.33 0.10];
text(t(end) * 0.7, stats.rms_global * 1.1, ...
    sprintf('RMS = %.2f mm/s', stats.rms_global), ...
    'HorizontalAlignment', 'center', 'VerticalAlignment', 'bottom',
    'FontWeight', 'bold');
xlabel('Tempo (s)');
ylabel('Velocidade Global (mm/s)');
title('Sinal no Domínio do Tempo');
grid on;
saveas(fig3, fullfile('results', ['time_domain_' ts '.png']));
close(fig3);

%% 4) RMS por faixa de frequência com harmônicos 1x-3x destacados
if isempty(bandData.freq_band)
    warning('Não há bandas de frequência calculadas. Ignorando plot de RMS por
faixa.');
```

```

else
    fig4 = figure('Visible', 'off', 'Units', 'pixels', 'Position', [100 100
800 600]);
    bar(bandData.freq_band, bandData.rms_band, 'FaceColor', [0.2 0.6 1]); hold
on;
    xlabel('Frequência (Hz) - Banda Média');
    ylabel('RMS (mm/s)');
    title('RMS por Faixa de Frequência');
    grid on;
    xlim([0, max(bandData.freq_band)]);

    for k = 1:3
        if k <= numel(rotData.freqs_harm)
            fk = rotData.freqs_harm(k);
            if ~isnan(fk)
                [~, idx] = min(abs(bandData.freq_band - fk));
                xb = bandData.freq_band(idx);
                yb = bandData.rms_band(idx);
                plot([xb xb], [0 yb], '--r');
                plot(xb, yb, 'rv', 'MarkerFaceColor', 'r');
                text(xb, yb + 0.05 * max(bandData.rms_band), sprintf('%dX',
k), ...
                    'HorizontalAlignment', 'center', 'VerticalAlignment',
'bottom', 'FontWeight', 'bold');
            end
        end
    end

    saveas(fig4, fullfile('results', ['band_rms_harm_' ts '.png']));
    close(fig4);
end
end

```