

FACULDADE DE TECNOLOGIA DE SÃO PAULO
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

GABRIEL DA SILVA ALVES DE SOUZA
ROBSON LIMA DIAS

DESENVOLVIMENTO DE UM SENSOR INTELIGENTE PARA
DIAGNÓSTICO DE FALHAS EM ROLAMENTOS DE MOTORES
ELÉTRICOS

São Paulo - SP

2025

GABRIEL DA SILVA ALVES DE SOUZA
ROBSON LIMA DIAS

**DESENVOLVIMENTO DE UM SENSOR INTELIGENTE PARA
DIAGNÓSTICO DE FALHAS EM ROLAMENTOS DE MOTORES
ELÉTRICOS**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de tecnologia de instalações elétricas da Faculdade de Tecnologia de São Paulo como requisito parcial para obtenção da graduação como tecnólogo.

Orientador: Prof. Dr. Helvio Fregolente Júnior

São Paulo, 09 de novembro de 2025

São Paulo
2025

DEDICATÓRIA

Dedicamos este trabalho aos familiares e amigos, pelo apoio incondicional e pelas palavras de incentivo que nos motivaram a seguir em frente.

Aos nossos colegas de curso, por terem compartilhado conosco a exaustiva, mas gratificante, rotina da Fatec. Pelas madrugadas de estudos, pela troca de conhecimento e pela amizade que tornou os desafios muito mais leves e as conquistas, mais prestigiosas.

E, com imensa gratidão, aos professores da Faculdade de Tecnologia de São Paulo, que não apenas transmitiram o conhecimento técnico, mas também nos inspiraram com sua dedicação e rigor, pavimentando o caminho para o nosso crescimento profissional e pessoal.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos às nossas famílias por todo o suporte, paciência e por acreditarem no nosso potencial desde o início da jornada.

Aos colegas de classe e de trabalho, pela troca de ideias, pelo companheirismo e por contribuírem para um ambiente de aprendizado coletivo.

A todos os professores, que, com sua orientação e conhecimento, foram peças-chave para a realização deste trabalho.

E, de forma especial, ao Prof. Me. Helvio Fregolente Júnior e ao Prof. Me. Gilson J. Francischetti, pelo apoio e pela confiança depositada no projeto.

A todos que, de alguma forma, estiveram conosco, nosso profundo e sincero agradecimento.

RESUMO

A confiabilidade operacional de motores de indução trifásicos é um fator crítico para a eficiência dos processos industriais, sendo as falhas em rolamentos uma das suas principais causas. A manutenção preditiva, particularmente pela análise de vibrações, destaca-se como metodologia eficaz para a detecção precoce dessas falhas. Contudo, os sistemas comerciais de monitoramento frequentemente apresentam custo elevado e assinatura mensal de serviço, tornando-se inacessíveis para pequenas e médias empresas. Diante deste cenário, este trabalho propõe o desenvolvimento e a validação de um protótipo de sensor inteligente de baixo custo para diagnóstico de falhas em rolamentos. O sistema foi constituído pela integração do microcontrolador ESP32, responsável pela aquisição e pelo processamento inicial dos dados, com o sensor de vibração MPU-6050, um módulo RTC (DS3231) para registro temporal preciso e um módulo de cartão SD para armazenamento robusto e autônomo dos dados. Para a análise, foi desenvolvida uma interface gráfica customizada (Gui_monitor) em Python, que permite a visualização dos sinais no domínio do tempo e a geração de espectros de frequência via Transformada Rápida de Fourier (FFT). A metodologia de validação consistiu na comparação do desempenho do protótipo utilizando dois motores de indução trifásico em duas condições: uma em estado moderado e outro em um estágio avançado de uso. Os resultados demonstraram que o protótipo foi capaz de adquirir os sinais de vibração com fidelidade e, por meio da análise espectral, identificar claramente o aumento de amplitude na frequência característica de um dos motores. Conclui-se que a solução desenvolvida é técnica e economicamente viável, apresentando-se como uma alternativa acessível para a implantação de estratégias de manutenção preditiva e para o ensino de técnicas de monitoramento de condição, cumprindo com os objetivos estabelecidos de desenvolvimento e validação do sensor inteligente.

Palavras-chave: Manutenção Preditiva. Análise de Vibrações. Sensor Inteligente. ESP32. Rolamentos. Falhas em Motores.

ABSTRACT

The operational reliability of three-phase induction motors is a critical factor for industrial process efficiency, with bearing failures being one of their main causes. Predictive maintenance, particularly through vibration analysis, stands out as an effective methodology for the early detection of such faults. However, commercial monitoring systems often involve high acquisition costs and recurring service fees, making them inaccessible for small and medium-sized enterprises. This work proposes the development and validation of a low-cost, intelligent sensor prototype for diagnosing bearing faults. The system was built by integrating an ESP32 microcontroller, responsible for data acquisition and initial processing, with an MPU-6050 vibration sensor, a DS3231 RTC module for precise timestamping, and an SD card module for robust, autonomous data storage. For analysis, a custom graphical interface (Gui_monitor) was developed in Python, allowing for time-domain signal visualization and frequency spectrum generation via Fast Fourier Transform (FFT). The validation methodology consisted of comparing the prototype's performance using two three-phase induction motors under different conditions: one in moderate condition and the other in an advanced stage of wear. The results showed that the prototype was capable of accurately acquiring vibration signals and, through spectral analysis, clearly identifying the amplitude increase at the characteristic frequency of one of the motors. It is concluded that the developed solution is technically and economically viable, presenting itself as an accessible alternative for implementing predictive maintenance strategies and for teaching condition monitoring techniques, thereby fulfilling the established objectives of developing and validating the intelligent sensor.

Keywords: Predictive Maintenance. Vibration Analysis. Intelligent Sensor. ESP32. Bearings. Motor Faults.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Determinação do sentido do fluxo do campo magnético em um condutor através da regra da mão direita.	20
Figura 2 - Campo girante	20
Figura 3 - Interação do campo girante com o rotor	21
Figura 4 - Parte ativa do estator, composta pelos enrolamentos e núcleo magnético	23
Figura 5 - Rotor gaiola.....	24
Figura 6 - Chapa de rotor e ranhuras	25
Figura 7 - Rotor bobinado	25
Figura 8 - Curvas típicas de conjugado versus velocidade para diversas classes de rotores	28
Figura 9 – Diagrama de força para partida direta de um motor trifásico	30
Figura 10 - Diagrama de força para partida estrela triângulo de um motor trifásico ..	31
Figura 11- Rolamento rígido de uma carreira de esferas com rasgos de entrada	32
Figura 12 - Rolamentos de rolos cilíndricos	33
Figura 13 - Demonstração do efeito de descascamento na superfície do anel interno de um rolamento	34
Figura 14 - Curva P-F (Potential Failure - Functional Failure) ilustrando a progressão de uma falha e a janela de oportunidade para detecção.	41
Figura 15 - Diagrama de blocos do sistema de aquisição e processamento de dados	56
Figura 16 - Ligação física dos componentes	63
Figura 17 - Dados do rolamento inseridos no software	64
Figura 18 - Motor WEG 0,75 kW	65
Figura 19 - Motor WEG 1,5 kW	65
Figura 20 - Interface Gui_monitor com dados do motor WEG de 0,75 kW no eixo vertical.....	67
Figura 21 - Interface Gui_monitor com dados do motor WEG de 1,5 kW no eixo vertical	69

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Correlação entre Modos de Falha, Sintomas e Técnicas de Monitoramento em Rolamentos	40
Tabela 2 - Frequências Características de Falhas em Rolamentos	42
Tabela 3 - Especificação dos principais materiais e componentes.....	54
Tabela 4 - Mapa de ligações.....	62

ABREVIATURAS E SIGLAS

AC – Corrente Alternada (Alternating Current)
ADC – Conversor Analógico-Digital (Analog-to-Digital Converter)
ARM – Arquitetura de Microprocessador (Advanced RISC Machine)
ASTM – Sociedade Americana para Testes e Materiais (American Society for Testing and Materials)
AVR – Arquitetura de Microcontrolador (Alf and Vegard's RISC processor)
BPFI – Frequência de Passagem das Esferas na Pista Interna (Ball Pass Frequency Inner)
BPFO – Frequência de Passagem das Esferas na Pista Externa (Ball Pass Frequency Outer)
BSF – Frequência de Rotação das Esferas (Ball Spin Frequency)
CMG – Campo Magnético Girante
CPU – Unidade Central de Processamento (Central Processing Unit)
DC – Corrente Contínua (Direct Current)
EPRI – Instituto de Pesquisa em Energia Elétrica (Electric Power Research Institute)
ESP32 – Microcontrolador com Wi-Fi e Bluetooth
FEM – Força Eletromotriz
FFT – Transformada Rápida de Fourier (Fast Fourier Transform)
FTF – Frequência Fundamental da Gaiola (Fundamental Train Frequency)
GPIO – Porta de Entrada/Saída de Propósito Geral (General Purpose Input/Output)
GUI – Interface Gráfica do Usuário (Graphical User Interface)
Hz – Hertz
I²C – Circuito Inter-Integrado (Inter-Integrated Circuit)
IDE – Ambiente de Desenvolvimento Integrado (Integrated Development Environment)
IoT – Internet das Coisas (Internet of Things)
IP – Protocolo de Internet (Internet Protocol)
ISO – Organização Internacional para Padronização (International Organization for Standardization)
MCSA – Análise de Assinatura de Corrente do Motor (Motor Current Signature Analysis)
MEMS – Sistemas Microeletromecânicos (Micro-Electro-Mechanical Systems)
MPU-6050 – Sensor inercial de 6 eixos (acelerômetro + giroscópio)
NLGI – Instituto Nacional de Lubrificantes de Graxa (National Lubricating Grease Institute)
PCB – Placa de Circuito Impresso (Printed Circuit Board)
P-F – Falha Potencial - Falha Funcional (Potential Failure - Functional Failure)
PPM – Partes por Milhão (Parts Per Million)
PWM – Modulação por Largura de Pulso (Pulse Width Modulation)
RAM – Memória de Acesso Aleatório (Random Access Memory)

REST – Transferência de Estado Representacional (Representational State Transfer)
RMS – Valor Quadrático Médio (Root Mean Square)
ROM – Memória Somente de Leitura (Read-Only Memory)
RPM – Rotações por Minuto (Revolutions Per Minute)
RTC – Relógio de Tempo Real (Real-Time Clock)
SD – Cartão de Memória (Secure Digital)
SPI – Interface Periférica Serial (Serial Peripheral Interface)
UART – Receptor-Transmissor Assíncrono Universal (Universal Asynchronous Receiver-Transmitter)
VFD – Acionamento de Frequência Variável (Variable Frequency Drive)
Wi-Fi – Tecnologia de rede sem fio (Wireless Fidelity)

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1	Velocidade Síncrona (N_s).....	26
Equação 2	Vida Nominal do Rolamento L_{10}	35
Equação 3	Frequência de Rotação f_r	43
Equação 4	Frequência Fundamental da Gaiola (FTF).....	43
Equação 5	Frequência de Passagem das Esferas na Pista Interna (BPFI)..	43
Equação 6	Frequência de Passagem das Esferas na Pista Externa (BPFO).....	43
Equação 7	Frequência de Rotação das Esferas (BSF).....	44
Equação 8	Transformada de Fourier Contínua $X(f)$	45
Equação 9	Transformada Discreta de Fourier $X[k]$	45
Equação 10	Frequência Máxima de Análise f_{max}	45
Equação 11	Resolução Espectral Δf	46
Equação 12	Tempo de Aquisição.....	46
Equação 13	Frequência de Barras Quebradas f_{bb}	47

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
2	OBJETIVOS	16
2.1	Objetivo geral.....	16
2.1.1	Objetivos específicos.....	16
3	JUSTIFICATIVA	17
4	ESTRUTURA DO TRABALHO	18
5	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	19
5.1	Princípio do eletromagnetismo	19
5.1.1	<i>O Eletromagnetismo (Criação de Campo Magnético pela Corrente Elétrica):</i>	19
5.1.2	<i>A indução eletromagnética (Geração de corrente por campo magnético variante):</i>	21
5.2	Funcionamento e constituição de motores de indução trifásicos.....	22
5.2.1	<i>Constituição básica: estator</i>	22
5.2.2	<i>Constituição básica: rotor</i>	23
5.2.3	<i>Tipos de rotor (Gaiola de esquilo vs. bobinado)</i>	25
5.3	Princípio de funcionamento e escorregamento.....	26
5.3.1	<i>Curva conjugado x velocidade</i>	27
5.3.2	<i>Métodos de partida</i>	29
5.4	Rolamentos: função, tipos e modos de falha	31
5.4.1	<i>Falhas por fadiga</i>	34
5.4.2	<i>Falhas por contaminação</i>	36
5.4.3	<i>Falhas por lubrificação Inadequada</i>	37
5.5	Monitoramento de condição em rolamentos: Da falha à detecção	38
5.6	Técnicas de manutenção preditiva	41
5.6.1	<i>Análise de vibrações</i>	42
5.6.2	<i>Frequências características de falhas em rolamentos</i>	42
5.6.3	<i>Aplicação prática e monitoramento contínuo</i>	44
5.7	Análise espectral por transformada rápida de Fourier (FFT)	44
5.7.1	<i>Fundamentos da transformada rápida de Fourier (FFT)</i>	44
5.7.2	<i>A transformada rápida de Fourier (FFT)</i>	45
5.7.3	<i>Parâmetros críticos para análise de vibração</i>	45

5.7.4	<i>Implementação no projeto</i>	46
5.8	<i>Análise de corrente elétrica</i>	47
5.9	<i>Conceitos de eletrônica embarcada</i>	48
5.9.1	<i>Fundamentos de sistemas embarcados</i>	48
5.9.2	<i>Arquitetura e funcionamento de microcontroladores</i>	48
5.9.3	<i>Plataformas de prototipagem de baixo custo</i>	49
5.9.4	<i>Seleção da plataforma para o projeto</i>	49
5.10	<i>Sensores de vibrações: Tipos e princípio de operações</i>	50
5.10.1	<i>Fundamento da aquisição de vibrações</i>	50
5.10.2	<i>Princípio de operação de acelerômetros piezoelétricos</i>	51
5.10.3	<i>Parâmetros técnicos para seleção e especificação do MPU-6050</i>	51
6	MATERIAIS E MÉTODOS	53
6.1	<i>Tipo de pesquisa e abordagem metodológica</i>	53
6.2	<i>Especificações e seleção de materiais e componentes</i>	53
6.3	<i>Arquitetura do sistema e desenvolvimento do protótipo</i>	55
6.3.1	<i>Arquitetura geral do sistema</i>	55
6.3.2	<i>Especificações e integração dos componentes</i>	57
6.3.3	<i>Desenvolvimento do firmware e integração</i>	58
6.3.4	<i>Arquitetura e bibliotecas</i>	58
6.3.5	<i>Configuração e desempenho do sensor</i>	58
6.3.6	<i>Estrutura de dados e robustez</i>	59
6.3.7	<i>Desenvolvimento do software e interface gráfica (Gui_monitor)</i>	59
6.4	<i>Integração física e ligação dos componentes</i>	60
6.4.1	<i>Estratégia de comunicação e barramentos</i>	61
6.4.2	<i>Esquema de alimentação e compatibilidade elétrica</i>	61
6.5	<i>Inicialização e configuração de conectividade</i>	63
6.6	<i>Metodologia experimental</i>	63
6.6.1	<i>Configuração do teste</i>	64
6.7	<i>Abordagem de análise de dados</i>	66
7	Resultados e discussões	67
7.1.1	<i>Análise do motor de 0,75 kW</i>	67
7.1.2	<i>Análise do motor WEG de 1,5 kW</i>	68
7.2	<i>Discussão dos resultados</i>	70
8	CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS	71

8.1	Conclusão.....	71
8.2	Trabalhos futuros.....	72
9	REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	73
	Apêndice A – ARQUITETURA DO SISTEMA	76
A.1	Estrutura do sistema de monitoramento	76
A.1.1	Módulo Python – GUI Monitor.....	76
A.1.2	Módulo ESP32 – Firmware de aquisição	76
A.2	Fluxo de processamento de dados	76
A.2.1	<i>Aquisição no ESP32</i>	<i>76</i>
A.2.2	<i>Análise no Python</i>	<i>77</i>
A.3	Algoritmos principais implementados.....	77
A.3.1	<i>Cálculo de frequências características</i>	<i>77</i>
A.3.2	<i>Detecção automática de falhas.....</i>	<i>78</i>
A.4	Especificações técnicas	79
A.4.1	<i>Requisitos do sistema Python.....</i>	<i>79</i>
A.4.2	<i>Configurações do firmware ESP32.....</i>	<i>79</i>
A.5	Instruções de uso básicas.....	79
A.5.1	<i>Coleta de dados.....</i>	<i>79</i>
A.5.2	<i>Análise de dados</i>	<i>80</i>
	ANEXO A – ENDEREÇO ELETRÔNICO DO CÓDIGO FONTE	81

1 INTRODUÇÃO

Os motores elétricos desempenham papel central em processos industriais, comerciais e de serviços, sendo responsáveis pela conversão de energia elétrica em energia mecânica em diversas aplicações. De acordo com estimativas do Electric Power Research Institute - EPRI (2018) mais de 40% do consumo global de eletricidade esteja associado a sistemas motrizes, o que reforça sua importância para a eficiência energética e a continuidade operacional das empresas. Nesse contexto, a confiabilidade desses equipamentos torna-se crucial, uma vez que falhas inesperadas são capazes de provocar paradas não programadas, elevar os custos de manutenção e comprometer significativamente a produtividade.

Entre os componentes mais expostos a danos estão os rolamentos, responsáveis por sustentar o eixo e permitir a rotação. A literatura especializada indica que danos em rolamentos representam uma das principais causas de indisponibilidade de motores elétricos, podendo ter origem por diferentes fatores, como desgaste natural, falta de lubrificação, desalinhamento, esforços excessivos e contaminação por partículas (EPRI, 2018). Quando não detectadas em estágio inicial, tais problemas tendem a evoluir rapidamente, resultando em danos catastróficos ao equipamento.

Para reduzir custos, a manutenção preditiva tem se consolidado como estratégia eficaz, permitindo monitorar parâmetros de operação e identificar indícios de degradação antes que ocorram falhas graves. Entre as diferentes técnicas disponíveis, a análise de vibração se destaca pela sensibilidade e pela capacidade de detectar defeitos incipientes em rolamentos, oferecendo diagnósticos precisos e antecipados (RANDALL, 2021).

Diante desse desafio, surge a necessidade de desenvolvimento de soluções acessíveis, confiáveis e com conectividade, alinhando-se às diretrizes da Indústria 4.0, onde sensores inteligentes e sistemas de monitoramento em tempo real desempenham papel fundamental na otimização dos processos produtivos.

Assim, este trabalho propõe o desenvolvimento de um protótipo de sensor inteligente para diagnóstico de falhas em rolamentos de motores elétricos, utilizando a medição de vibração como principal parâmetro de análise.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Desenvolver e validar um protótipo de sensor inteligente para monitoramento de motores elétricos, integrando medições de vibração com capacidade de diagnóstico de falhas iniciais.

2.1.1 *Objetivos específicos*

- Selecionar e integrar sensores de vibração a uma plataforma de processamento embarcada em Arduino;
- Implementar algoritmos de análise de sinais e desenvolver interface de visualização dos dados;
- Validar o protótipo em motores elétricos de laboratório, comparando resultados com métodos diferentes motores;
- Avaliar a viabilidade do dispositivo como solução de manutenção preditiva de baixo custo.

3 JUSTIFICATIVA

A escolha do tema se justifica pela crescente demanda industrial por manutenção preditiva acessível, que permita aumentar a confiabilidade dos ativos sem depender exclusivamente de soluções comerciais de alto custo. O desenvolvimento de um sensor inteligente próprio, ainda que em protótipo, representa um diferencial acadêmico e prático, pois combina conhecimentos de eletrônica, instrumentação, processamento de sinais e instalações elétricas. Além disso, o projeto está alinhado com a Indústria 4.0, que valoriza sistemas de monitoramento em tempo real e conectividade para otimização de processos produtivos.

4 ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho será organizado da seguinte forma:

Capítulo 1 – Introdução

Capítulo 2 – Objetivos

Capítulo 3 – Justificativa

Capítulo 4 – Estrutura do trabalho

Capítulo 5 – Fundamentação teórica

Capítulo 6 – Materiais e métodos

Capítulo 7 – Resultados e discussões

Capítulo 8 – Conclusão e trabalhos futuros

Referências

5 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo apresenta os conceitos teóricos essenciais que fundamentam o desenvolvimento deste trabalho. Serão abordados os princípios de funcionamento dos motores elétricos e de seus rolamentos, as principais técnicas de manutenção preditiva e os conceitos de aquisição e processamento de sinais que permitirão o diagnóstico de falhas.

5.1 Princípio do eletromagnetismo

O eletromagnetismo, ramo da física que estuda as relações entre a eletricidade e o magnetismo, constitui a base teórica fundamental para o funcionamento de equipamentos elétricos, em especial das máquinas rotativas. Seus princípios, consolidados no século XIX por cientistas como Ørsted, Faraday, Lenz e Maxwell, demonstram que os campos elétrico e magnético são manifestações de um único fenômeno (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2016).

O funcionamento de um motor elétrico é uma aplicação direta deste fenômeno, que será explicado nos próximos dois subtópicos.

5.1.1 O Eletromagnetismo (*Criação de Campo Magnético pela Corrente Elétrica*):

Conforme demonstrado por Ørsted, observa-se que o fluxo de corrente elétrica através de um condutor gera um campo magnético concêntrico ao seu redor. A intensidade desse campo é diretamente proporcional à corrente, e sua direção pode ser determinada pela Regra da Mão Direita (HALLIDAY; RESNICK; WALKER, 2016) (Veja figura 1).

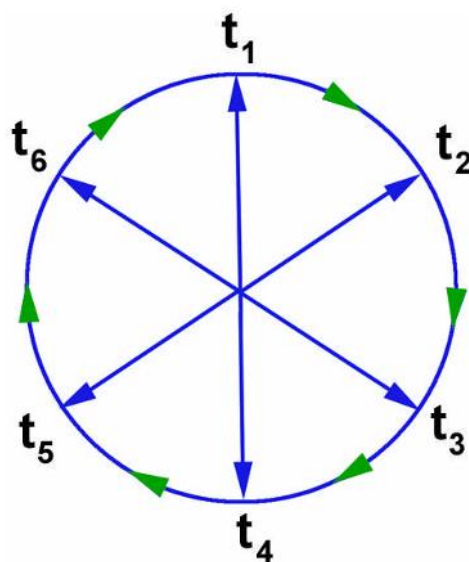
Esse princípio fundamenta o funcionamento dos enrolamentos (ou bobinas) presentes no estator do motor. Quando alimentados por uma corrente alternada trifásica, esses enrolamentos produzem o Campo Magnético Girante (CMG) visto na figura 2, responsável pelo acionamento do motor (CHAPMAN, 2013).

Figura 1 - Determinação do sentido do fluxo do campo magnético em um condutor através da regra da mão direita.



Fonte: ALMEIDA (2011, p. 5).

Figura 2 - Campo girante

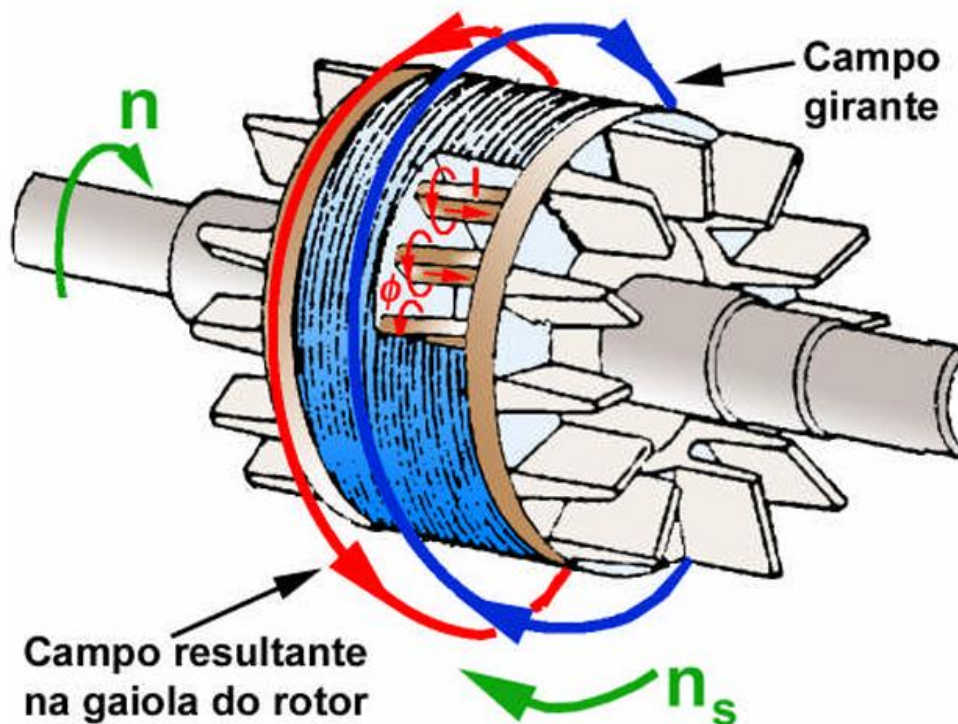


Fonte: ALMEIDA (2011, p. 22).

5.1.2 A indução eletromagnética (Geração de corrente por campo magnético variante):

Michael Faraday postulou que um campo magnético variante no tempo, ou o movimento de um condutor dentro de um campo magnético estático, induz uma Força Eletromotriz (FEM) nos terminais deste condutor. Se o circuito estiver fechado, uma corrente elétrica, chamada de corrente induzida, irá circular. Este fenômeno, demonstrado na figura 3, formalizado pela Lei de Faraday-Lenz, é o responsável por gerar correntes no rotor do motor de indução (também conhecido como rotor gaiola de esquilo), que não possui alimentação elétrica direta (GUSSOW, 2012).

Figura 3 - Interação do campo girante com o rotor



Fonte: ALMEIDA (2011, p. 22).

A interação entre esses dois fenômenos é o que possibilita a conversão de energia. O Campo Magnético Girante (CMG) produzido pelo estator corta as barras condutoras do rotor, como visto anteriormente na figura 3, induzindo correntes nestas. Por sua vez, essas correntes induzidas no rotor geram seu próprio campo magnético. A interação entre o campo magnético do estator e o campo magnético induzido no

rotor cria um binário eletromagnético (torque), que força o rotor a girar, tentando "alcançar" o campo girante do estator. Este é o princípio de funcionamento do motor de indução trifásico, o tipo de motor mais utilizado na indústria e, portanto, foco central deste trabalho (FITZGERALD; KINGSLEY; UMANS, 2014).

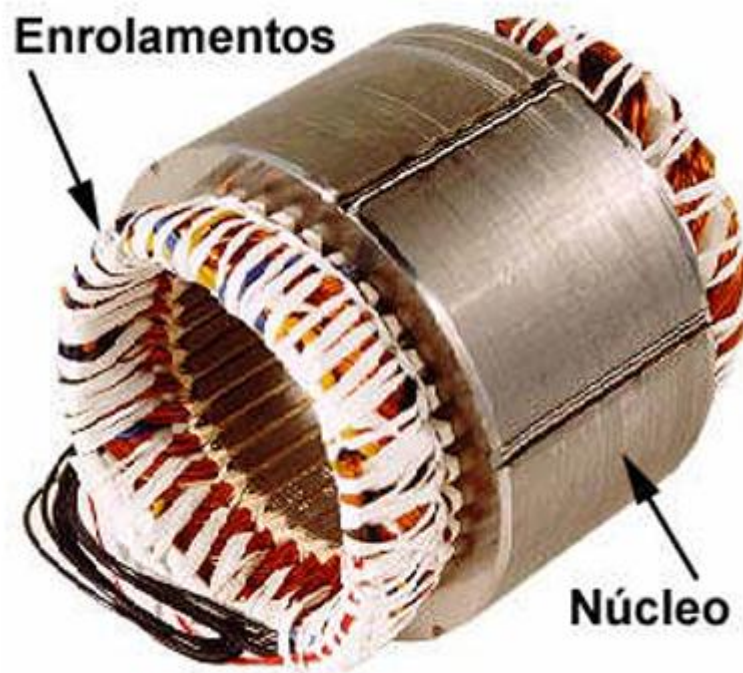
5.2 Funcionamento e constituição de motores de indução trifásicos

Os motores de indução trifásicos, também conhecidos como motores assíncronos, representam a espinha dorsal da conversão de energia elétrica em mecânica na indústria moderna. Sua predominância é atribuída à combinação de uma construção robusta, baixo custo de manutenção e fabricação, alta confiabilidade e operação direta em sistemas de corrente alternada trifásica, dispensando circuitos de controle complexos para partida e funcionamento (CHAPMAN, 2013). O princípio de funcionamento deste motor, como visto na seção anterior, baseia-se na indução eletromagnética, onde a energia é transferida do estator para o rotor sem qualquer contacto elétrico direto, o que confere a sua característica de robustez. Este tópico detalhará os principais componentes constitutivos deste tipo de máquina e o princípio que rege sua operação.

5.2.1 Constituição básica: estator

O estator, representado na figura 4, é a parte fixa do motor e tem como função principal gerar o Campo Magnético Girante (CMG). Sua estrutura é composta pela carcaça, que é uma estrutura metálica externa responsável por fornecer suporte mecânico, integrar o caminho do fluxo magnético e contribuir para a dissipação do calor gerado pelas perdas; pelo núcleo de ferro, formado por um empilhamento de lâminas de aço-silício isoladas eletricamente entre si, cuja laminação é fundamental para a redução das perdas por correntes parasitas (Foucault) e que contém ranhuras destinadas ao alojamento dos enrolamentos; e pelos enrolamentos trifásicos, constituídos por bobinas de fio de cobre esmaltado, distribuídas nas ranhuras do estator de forma simétrica e defasadas em 120° graus entre si. Quando alimentados por uma corrente trifásica, esses enrolamentos são responsáveis pela produção do CMG (FITZGERALD; KINGSLEY; UMANS, 2014).

Figura 4 - Parte ativa do estator, composta pelos enrolamentos e núcleo magnético

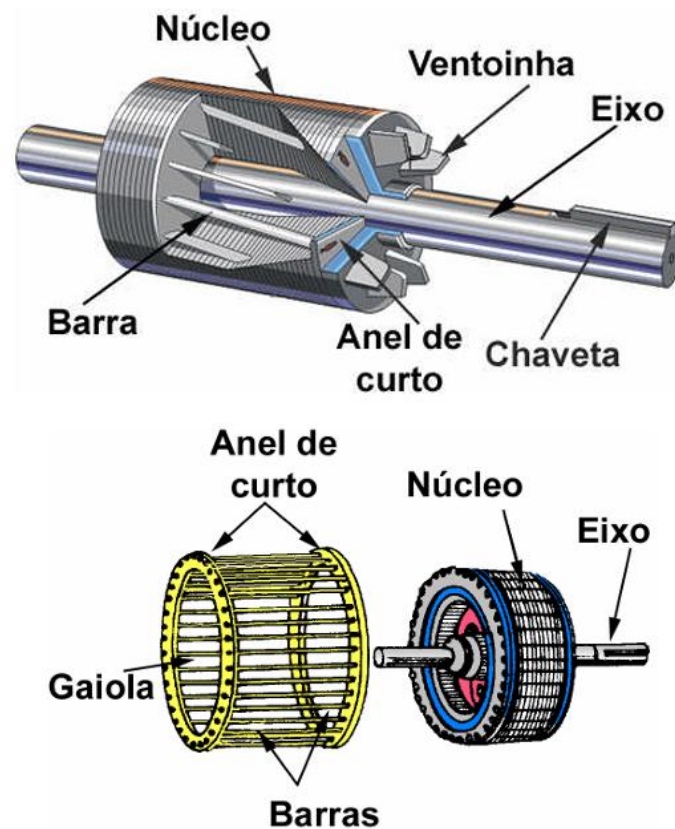


Fonte: ALMEIDA (2011, p. 31).

5.2.2 Constituição básica: rotor

O rotor é o componente rotativo do motor, responsável por converter a energia do campo eletromagnético em torque mecânico. O tipo mais comum é o rotor gaiola de esquilo, constituído pelo núcleo laminado e pelas barras com anéis de curto-circuito, mostrado a seguir na figura 5.

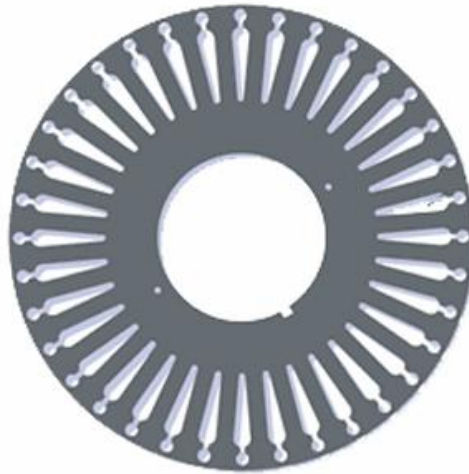
Figura 5 - Rotor gaiola



Fonte: ALMEIDA (2011, p. 35).

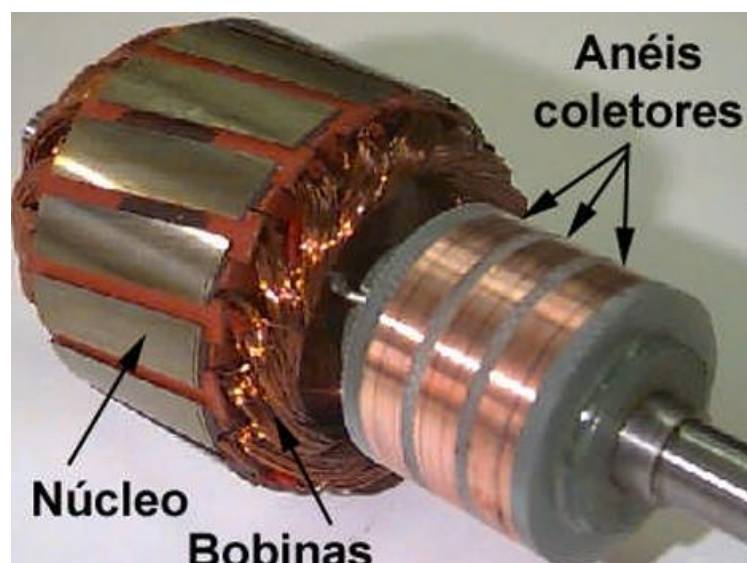
O núcleo laminado, similar ao do estator, é formado por lâminas de aço-silício montadas no eixo do motor (veja figura 6). Já as ranhuras do núcleo são preenchidas por barras condutoras, geralmente de alumínio ou cobre, que são curto-circuitadas em ambas as extremidades por anéis, formando uma estrutura rígida e semelhante a uma gaiola (figura 7). Esse conjunto constitui o circuito elétrico do rotor, no qual as correntes são induzidas (CHAPMAN, 2013).

Figura 6 - Chapa de rotor e ranhuras



Fonte: ALMEIDA (2011, p. 35).

Figura 7 - Rotor bobinado



Fonte: ALMEIDA (2011, p. 35).

5.2.3 Tipos de rotor (*Gaiola de esquilo vs. bobinado*)

Apesar de compartilharem o mesmo princípio de funcionamento, os motores de indução trifásicos diferenciam-se principalmente pela construção do rotor, que se divide em dois tipos fundamentais: gaiola de esquilo (figura 5) e bobinado (figura 7). A escolha depende das exigências da aplicação, particularmente em relação ao conjugado de partida (força de rotação produzida pelo motor para superar a inércia e

iniciar a rotação do rotor), corrente de arranque e necessidade de controle de velocidade.

Com ampla predominância na indústria, o motor de indução de rotor gaiola de esquilo se destaca pela sua simplicidade construtiva, robustez e baixo custo. A sua estrutura maciça confere ao motor uma característica de conjugado estável e alta eficiência operacional, embora, em contrapartida, resulte em elevada corrente de partida e conjugado de arranque limitado (ALMEIDA, 2011).

Em contraste, o motor com rotor bobinado apresenta enrolamentos trifásicos no rotor, isolados e conectados em estrela (Y). Seus terminais são levados a anéis coletores no eixo, permitindo, por meio de escovas, a conexão de resistências externas ao circuito rotórico. A principal vantagem desta configuração reside na possibilidade de inserir essas resistências durante a partida, o que aumenta o conjugado e reduz significativamente a corrente de arranque – característica que o torna ideal para acionamentos de cargas pesadas e de alta inércia, como britadores e compressores. Essa solução, no entanto, é acompanhada de maior complexidade, custo elevado e necessidade de manutenção devido ao desgaste das escovas e anéis (CHAPMAN, 2013).

5.3 Princípio de funcionamento e escorregamento

O funcionamento do motor de indução fundamenta-se em três etapas principais, conforme o princípio da conversão de energia eletromecânica (FITZGERALD; KINGSLEY; UMANS, 2014). A primeira consiste na geração do Campo Magnético Girante (CMG): ao serem alimentados por uma corrente trifásica, os enrolamentos do estator estabelecem um campo magnético que gira na velocidade síncrona (N_s). Essa velocidade é determinada pela frequência da rede elétrica (f) e pelo número de polos (p) da máquina, conforme equação 1:

$$N_s = \frac{120 \cdot f}{p} \quad (1)$$

Na sequência, ocorre a indução de correntes no rotor: o CMG, ao cortar os condutores do rotor inicialmente em repouso, induz uma força eletromotriz (FEM) nas barras, de acordo com a Lei de Faraday-Lenz (FITZGERALD; KINGSLEY; UMANS, 2014). Uma vez que o circuito rotórico é curto-circuitado, essa FEM dá origem a

correntes elétricas circulantes. Por fim, tem-se a geração de torque eletromagnético: as correntes induzidas no rotor produzem um campo magnético próprio, cuja interação com o CMG do estator resulta em um binário que força o rotor a girar no mesmo sentido do campo. Este é o princípio de funcionamento do motor de indução trifásico.

Uma característica operacional intrínseca a estes motores é o escorregamento (s), definido pela diferença entre a velocidade síncrona (N_s) e a velocidade do rotor (N_r), a qual é sempre ligeiramente inferior. Este escorregamento é um fator essencial para o funcionamento do motor (ALMEIDA, 2011), pois é a diferença de velocidade relativa que permite o corte contínuo do fluxo magnético pelas barras do rotor, sustentando assim a indução de corrente e a produção de torque. O escorregamento é comumente expresso em valores percentuais relativos à velocidade síncrona (FITZGERALD; KINGSLEY; UMANS, 2014; ALMEIDA, 2011).

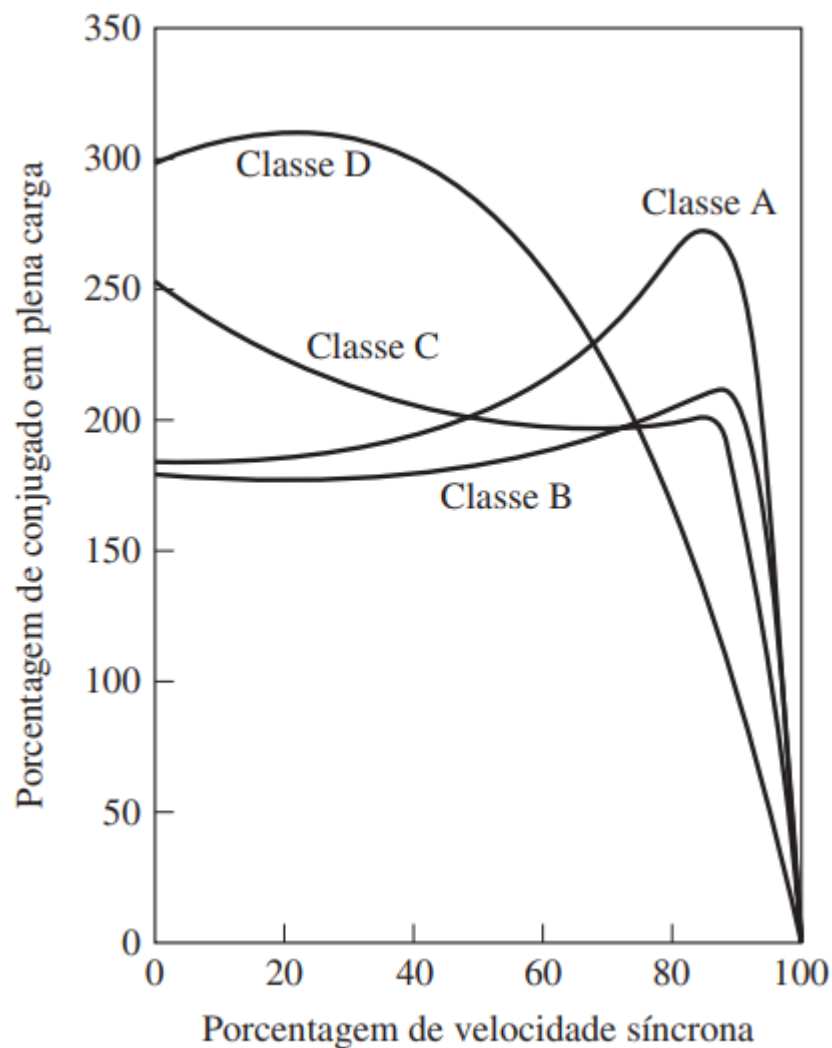
5.3.1 *Curva conjugado x velocidade*

O comportamento operacional de um motor de indução é perfeitamente descrito pela sua característica de conjugado (torque) em função da velocidade ou do escorregamento. Esta curva, intrínseca ao projeto da máquina, é fundamental para a seleção adequada do motor a uma determinada carga mecânica. A curva apresenta pontos de operação notáveis: o conjugado de partida ou locked-rotor torque, disponível no instante inicial de acionamento (velocidade zero); o conjugado mínimo ou pull-up torque, valor mínimo que o motor oferece durante a aceleração desde zero até a velocidade de operação em regime; o conjugado máximo ou breakdown torque, que é o pico de torque que o motor pode suportar sem perder sincronismo e entrar em colapso; e, finalmente, o conjugado nominal, no qual o motor opera continuamente à potência e velocidade nominais sem superaquecimento excessivo (CHAPMAN, 2013).

A forma da curva é determinada pelos parâmetros elétricos do motor, principalmente as resistências e reatâncias do estator e do rotor, assim como sua classe de rotor (Figura 8). Em motores de rotor gaiola de esquilo, a curva é essencialmente fixa. Já em motores de rotor bobinado, a forma da curva pode ser alterada através da inserção de resistências externas no circuito rotórico, como mencionado anteriormente. Compreender a interação entre a curva conjugado-velocidade do motor e a curva conjugado-velocidade da carga é crucial para garantir uma partida suave, uma aceleração adequada e uma operação estável em regime

permanente, evitando a operação do motor em pontos de instabilidade que poderiam levar à sua parada.

Figura 8 - Curvas típicas de conjugado versus velocidade para diversas classes de rotores



Fonte: CHAPMAN (2013, p. 347).

A Figura 8 apresenta as curvas típicas de conjugado versus velocidade para diferentes classes de rotores de motores de indução. Essas classes (A, B, C e D), estabelecidas pela norma NEMA MG-1, representam diferentes construções de rotor e resultam em comportamentos distintos de partida, torque máximo e escorregamento.

A Classe A possui baixo conjugado de partida e pequena resistência no rotor, apresentando queda acentuada do torque próximo à velocidade síncrona. A Classe B, a mais utilizada em aplicações gerais, oferece conjugado de partida moderado e bom desempenho em regime permanente devido ao equilíbrio entre resistência e reatância do rotor.

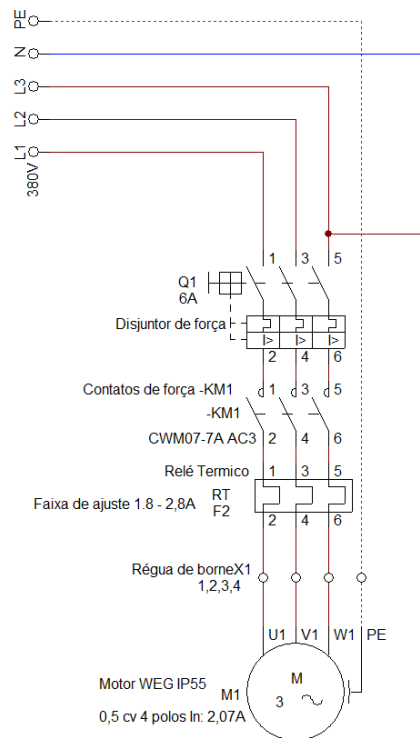
A Classe C apresenta alto conjugado de partida, obtido pelo uso de rotores com dupla gaiola ou resistência elevada, sendo indicada para cargas que exigem forte torque inicial. Já a Classe D exibe o maior conjugado de partida e maior escorregamento, característica que a torna adequada para cargas pesadas e aplicações que demandam alto torque na aceleração.

Essas curvas auxiliam na compreensão do comportamento dinâmico de cada tipo de rotor, permitindo a seleção correta do motor conforme o perfil de carga e garantindo operação eficiente.

5.3.2 Métodos de partida

O processo de partida de um motor de indução trifásico representa um regime transitório crítico, caracterizado por correntes elevadíssimas que podem atingir de 6 a 10 vezes o valor da corrente nominal (CHAPMAN, 2013). A escolha do método de partida tem como objetivos principais limitar o pico de corrente na rede elétrica, controlar o conjugado aplicado à carga mecânica para evitar danos aos equipamentos acionados e garantir a aceleração segura do conjunto motor-carga até a velocidade de operação. O método mais simples e direto é a partida direta, ilustrado na figura 9, onde o motor é conectado integralmente à tensão da rede (CHAPMAN, 2013). Apesar de proporcionar o maior conjugado de partida, este método implica na maior corrente de influxo, podendo causar afundamentos de tensão (voltage sag) na rede de alimentação que afetam outros equipamentos. Sua aplicação é geralmente restrita a motores de menor potência ou em redes robustas (CHAPMAN, 2013).

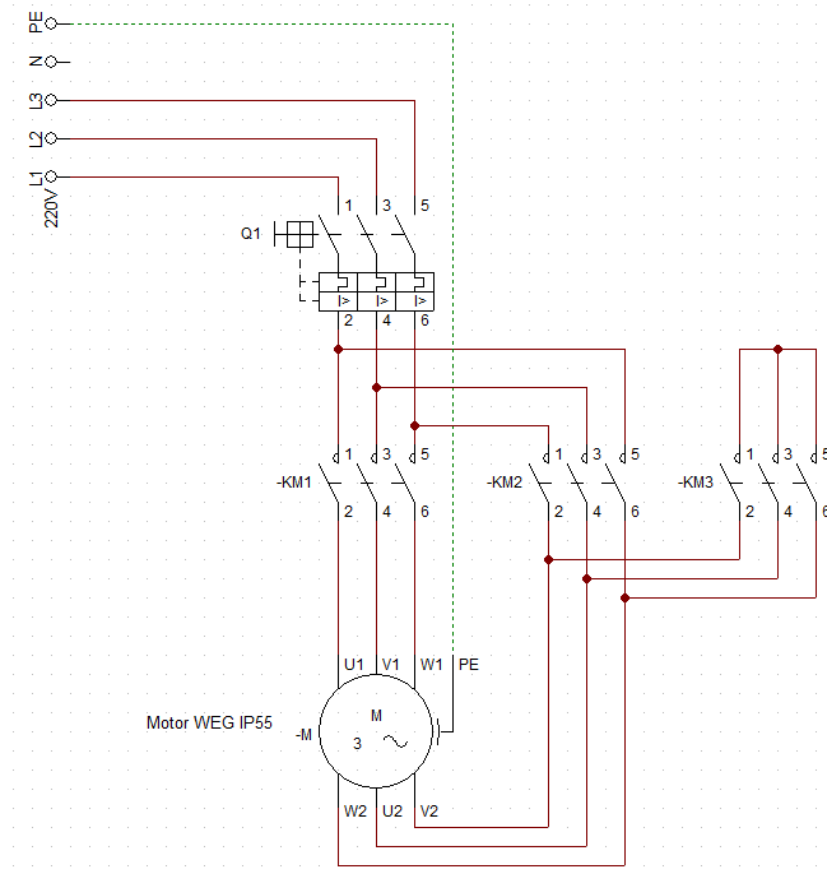
Figura 9 – Diagrama de força para partida direta de um motor trifásico



Fonte: Elaborado pelos autores (2025)

Para contornar estas limitações, diversos métodos de partida indireta são empregados. A partida estrela-triângulo (Y- Δ) visto na figura 10, é amplamente utilizada para motores projetados para operar em ligação triângulo. Nesta estratégia, o enrolamento do estator é inicialmente conectado em estrela (Y), o que reduz a tensão por fase para 58% ($1/\sqrt{3}$) da tensão nominal e, conseqüentemente, a corrente de linha e o conjugado para aproximadamente um terço dos valores da partida direta (CHAPMAN, 2013). Após um período pré-determinado de aceleração, um comutador automático altera a ligação dos enrolamentos para triângulo (Δ), aplicando a tensão plena para o regime permanente.

Figura 10 - Diagrama de força para partida estrela triângulo de um motor trifásico



Fonte: Elaborado pelos autores (2025)

Outro método comum é a partida com chave compensadora, que utiliza um autotransformador para reduzir a tensão aplicada aos terminais do motor durante a partida, permitindo um controle mais gradual dos níveis de corrente e conjugado (CHAPMAN, 2013). Para aplicações que demandam o máximo controle durante a partida e aceleração, os soft-starters e inversores de frequência (VFD) representam a solução mais avançada. Os soft-starters controlam a tensão aplicada ao motor para uma aceleração suave, enquanto os inversores de frequência permitem o controle preciso tanto da tensão quanto da frequência, oferecendo a melhor performance de partida, com corrente controlada e conjugado otimizado para a carga).

5.4 Rolamentos: função, tipos e modos de falha

Os rolamentos são componentes mecânicos de precisão fundamentais no funcionamento de motores elétricos e em uma vasta gama de máquinas rotativas. Sua

função primordial é permitir o movimento de rotação entre duas partes, suportando cargas e minimizando o atrito. Em um motor elétrico, os rolamentos têm a tarefa crítica de posicionar e guiar o rotor com precisão, mantendo o entreferro constante e minimizando perdas por atrito, ao mesmo tempo que suportam as cargas radiais (perpendiculares ao eixo) e, em muitos casos, axiais (paralelas ao eixo). A confiabilidade do motor está, portanto, intrinsecamente ligada à integridade e ao desempenho de seus rolamentos, que são identificados como uma das causas mais frequentes de falhas prematuras e paradas não programadas em ambientes industriais.

Existe uma variedade de tipos de rolamentos, cada um projetado para atender a requisitos específicos de carga, velocidade e aplicação. Nos motores elétricos trifásicos de médio e pequeno porte, os tipos mais comuns são os rolamentos rígidos de esferas e os rolamentos de rolos, ilustrados nas imagens 11 e 12 respectivamente.

Figura 11- Rolamento rígido de uma carreira de esferas com rasgos de entrada



Fonte: SKF (s.d.). Disponível em: <<https://www.skf.com/br/products/rolling-bearings/ball-bearings/deep-groove-ball-bearings/single-row-deep-groove-ball-bearings-with-filling-slots>>.

Acesso em: 22 set. 2025.

Figura 12 - Rolamentos de rolos cilíndricos



Fonte: SKF (s.d.). Disponível em: <<https://www.skf.com/br/products/rolling-bearings/roller-bearings/cylindrical-roller-bearings>>. Acesso em: 22 set. 2025.

Os rolamentos rígidos de esferas são versáteis, capazes de suportar cargas radiais moderadas e algumas cargas axiais, operando em altas velocidades com baixo atrito. Já os rolamentos de rolos cilíndricos ou cônicos são empregados quando há necessidade de suportar cargas radiais mais pesadas ou cargas axiais combinadas significativas. A seleção do tipo apropriado é realizada pelos fabricantes com base em uma análise criteriosa que considera a potência do motor, a velocidade de operação e o tipo de carga SKF (2017).

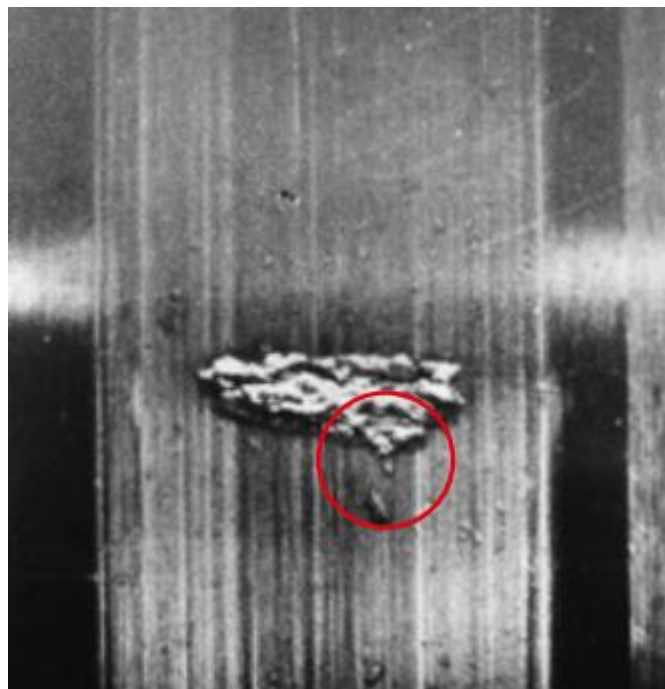
Apesar de sua robustez, os rolamentos estão sujeitos a modos de falha específicos, que podem ser categorizados em falhas por fadiga e falhas por condição. A fadiga de material é um modo de falha natural e inevitável, resultado do carregamento cíclico repetitivo que se manifesta como microfissuras que progridem para a superfície, resultando no descascamento (spalling ou pitting) do material. Embora a vida útil nominal de um rolamento (L_{10}) seja calculada com base neste modo de falha, na prática industrial, a grande maioria das falhas é prematura e atribuída a causas relacionadas à condição de operação. Entre estas, destacam-se a lubrificação inadequada por quantidade insuficiente, excesso ou uso de lubrificante incorreto, e a contaminação por partículas abrasivas ou por umidade. Outras causas são a má instalação, que inclui desalinhamentos e encaixes incorretos que impõem cargas e

vibrações anormais ao rolamento. A identificação precoce dessas falhas através de técnicas de monitoramento de condição, como a análise de vibração, é essencial para a implementação eficaz de uma estratégia de manutenção preditiva.

5.4.1 Falhas por fadiga

A falha por fadiga é o modo de deterioração natural e inevitável dos rolamentos, resultante da ação cíclica de cargas repetitivas sobre os elementos rolantes e as pistas. Este fenômeno de degradação é de natureza metalúrgica e ocorre mesmo sob condições ideais de operação, como lubrificação adequada, alinhamento perfeito e ausência de contaminação. O mecanismo de falha inicia-se com o surgimento de microfissuras (microcracks) abaixo da superfície de contato, que se propagam gradualmente até a superfície, resultando no descascamento (spalling ou pitting) do material, mostrado a seguir na figura 13.

Figura 13 - Demonstração do efeito de descascamento na superfície do anel interno de um rolamento



Fonte: SKF. Bearing damage and failure analysis. 2. ed. [S.l.]: SKF Group, 2017. p.7.

Disponível em:

https://cdn.skfmediahub.skf.com/api/public/093168a92d25cc46/pdf_preview_medium/093168a92d25cc46_pdf_preview_medium.pdf. Acesso em: 22 set. 2025.

Conforme descrito por Harris e Kotzalas (2009, p. 45), o mecanismo de falha por fadiga inicia-se com o surgimento de microfissuras abaixo da superfície de contato, que se propagam gradualmente até a superfície'. A vida útil nominal de um rolamento, denominada vida L_{10} , é calculada precisamente com base na teoria da fadiga, representando o número de rotações ou horas de operação que 90% de um lote de rolamentos idênticos deve alcançar ou exceder antes do início do descascamento (SKF, 2007).

O cálculo da vida útil nominal do rolamento (L_{10}), exposto na equação 2, que expressa a vida em milhões de rotações, é um parâmetro fundamental na engenharia de manutenção. De acordo com a literatura técnica e manuais de fabricantes como a SKF (2017), a vida nominal é calculada pela seguinte relação fundamental:

$$L_{10} = \left(\frac{C}{P} \right)^p \quad (2)$$

Nesta equação, C representa a capacidade de carga dinâmica básica (fornecida pelo fabricante), P é a carga dinâmica equivalente atuante, e p é o expoente da vida, sendo 3 para rolamentos de esferas e 10/3 para rolamentos de rolos. Na prática, a vida real de um rolamento pode diferir significativamente da vida L_{10} calculada devido à influência de outros fatores, como a qualidade da lubrificação, o nível de contaminação e as condições ambientais, os quais são incorporados em cálculos mais refinados através de um fator de ajuste de vida (aISO) (SKF, 2007).

Apesar de ser um modo de falha esperado, a fadiga pode ser acelerada por condições operacionais adversas, como cargas excessivas ou mal distribuídas, vibrações parasitárias, desalinhamento e superaquecimento, que elevam significativamente as tensões internas no material, acelerando a nucleação e propagação das trincas. A identificação da falha por fadiga em seu estágio inicial é crítica para o planejamento de manutenção (RANDALL, 2021). Através de técnicas de monitoramento de condição, como a análise de vibração, é possível detectar as assinaturas vibratórias características geradas pela impactação dos elementos rolantes sobre as superfícies já comprometidas por microfissuras ou descascamento inicial, permitindo a intervenção antes que a falha evolua para uma condição catastrófica que cause danos secundários severos ao motor.

5.4.2 Falhas por contaminação

A contaminação é uma das principais causas de falhas prematuras e evitáveis em rolamentos de motores elétricos, atuando como um agente acelerador de degradação que compromete severamente a performance e a vida útil do componente. Os contaminantes são classificados principalmente em dois tipos: sólidos (como partículas de poeira, sujeira, sedimentos de desgaste metálico e fibras) e líquidos (notadamente a água e umidade) (SKF, 2007). A presença destes elementos no interior do rolamento, seja no lubrificante ou em contato direto com as superfícies, desencadeia uma série de mecanismos de desgaste destrutivos (SKF, 2007).

As partículas sólidas abrasivas, quando presentes no lubrificante, interpõem-se entre as superfícies de contato altamente polidas dos elementos rolantes e das pistas. Durante a operação, estas partículas são pressionadas e arrastadas, causando ranhuras e riscos nas superfícies críticas. Este fenômeno eleva significativamente o atrito e a vibração, promove a geração adicional de partículas de desgaste e serve como sítio de nucleação para trincas de fadiga, precipitando o descascamento (spalling) prematuro do material. O nível de contaminação por partículas sólidas é frequentemente classificado de acordo com esquemas de codificação amplamente adotados na indústria, que quantificam a concentração de partículas em fluidos hidráulicos e lubrificantes. Embora a norma completa específica seja um documento pago e de acesso restrito, existem artigos técnicos e manuais que descrevem sua metodologia e importância para a definição de limites de limpeza em componentes (SKF, 2017; Mobley, 2002).

A contaminação por umidade, por sua vez, é igualmente prejudicial. A presença de água no lubrificante, mesmo em concentrações baixas (acima de 500 ppm), pode reduzir drasticamente a vida útil dos rolamentos. A umidade degrada a graxa ou o óleo lubrificante, reduzindo sua capacidade de formar um filme protetor adequado, o que resulta em contato metal-metal e desgaste adesivo. Além disso, a água induz a corrosão e a formação de cavidades (pitting) nas superfícies metálicas. A detecção da contaminação por água pode ser realizada através de métodos padronizados, como o teste de titulação de Karl Fischer, descrito na norma ASTM D6304-20. A entrada de umidade no motor é frequentemente atribuída a condições ambientais, como as encontradas na indústria de papel e celulose, ou lavagem industrial inadequada.

A prevenção eficaz contra falhas por contaminação é, portanto, uma estratégia de manutenção essencial. Ela envolve a seleção de vedação adequada, práticas de manutenção limpa durante a manipulação e a monitorização periódica da condição do lubrificante através de análise de óleo. Este tipo de análise permite quantificar os níveis de contaminação e desgaste metálico, o que é fundamental para se alcançar a vida útil de projeto dos rolamentos e a confiabilidade operacional do motor.

5.4.3 Falhas por lubrificação Inadequada

A lubrificação desempenha um papel crítico na operação dos rolamentos, atuando na formação de um filme que separa as superfícies metálicas em movimento, minimizando o atrito e o desgaste, dissipando calor e protegendo contra a corrosão. Consequentemente, a lubrificação inadequada constitui uma das causas mais prevalentes de falhas prematuras em rolamentos de motores elétricos, podendo manifestar-se tanto por quantidade insuficiente quanto por qualidade ou tipo incorreto do lubrificante,

A sublubrificação, ou quantidade insuficiente de graxa ou óleo, impede a formação de um filme lubrificante contínuo e com espessura adequada entre os elementos rolantes e as pistas. Esta condição resulta em contato metal-metal direto, elevando drasticamente o atrito, a geração de calor e o desgaste. O superaquecimento localizado resultante pode levar ao recozimento (tempering) do aço, que perde sua dureza superficial e, portanto, sua resistência à fadiga, tornando-se mais suscetível ao descascamento prematuro. Em casos extremos, o calor excessivo pode causar a carbonização da graxa, formando compostos abrasivos que aceleram ainda mais o desgaste e podem levar ao travamento completo do rolamento (seizure) (SKF, 2007).

Por outro lado, o excesso de lubrificação, particularmente em rolamentos com graxa, também é prejudicial. O superenchimento (overgreasing) gera um excessivo arrasto viscoso e trabalho de amassamento (churning) da graxa, convertendo energia mecânica em energia térmica. Este fenômeno causa um aumento significativo da temperatura de operação, que podem degradar rapidamente as propriedades físico-químicas do lubrificante. Além disso, a pressão interna excessiva pode danificar os retentores (seals), permitindo a entrada de contaminantes ou a expulsão da graxa, e em casos severos, pode até fraturar as gaiolas do rolamento (SKF, 2007).

A seleção do lubrificante incorreto para a aplicação específica é igualmente crítica. Propriedades como a viscosidade do óleo base, a consistência (grau NLGI) da graxa, a faixa de temperatura de operação e a resistência à oxidação devem ser compatíveis com as condições de carga, velocidade e ambiente do motor (SKF, 2007). Uma viscosidade baixa demais para a carga e temperatura aplicadas não sustentará o filme lubrificante, enquanto uma viscosidade excessivamente alta aumentará o atrito e a temperatura operacional.

A monitorização e manutenção da lubrificação são, portanto, pilares da confiabilidade. Elas envolvem o estabelecimento de procedimentos rigorosos para relubrificação baseada em condições ou em intervalos de tempo calculados, utilizando quantidades precisas do lubrificante especificado pelo fabricante do motor ou do rolamento (SKF, 2007). Técnicas de manutenção preditiva, como a análise de óleo por espectrometria de emissão atômica, permitem monitorar a degradação do lubrificante, a contaminação e a presença de metais de desgaste, fornecendo informações valiosas sobre a condição interna do rolamento. Embora a norma ASTM D5185-18 seja a referência técnica para este tipo de análise, ela é um documento pago; contudo, a técnica é amplamente descrita em artigos e manuais técnicos de acesso público, que confirmam a sua importância para a manutenção preditiva. A implementação disciplinada destas práticas é indispensável para mitigar falhas por lubrificação inadequada e maximizar a vida útil dos componentes.

5.5 Monitoramento de condição em rolamentos: Da falha à detecção

A confiabilidade operacional de motores elétricos está intrinsecamente ligada à integridade de seus rolamentos. Conforme detalhado na seção anterior, os modos de falha, seja por fadiga, contaminação ou lubrificação inadequada, não são eventos instantâneos, mas processos progressivos de degradação. A manutenção baseada apenas em correções após a quebra (corretiva) ou em intervalos de tempo fixos (preventiva) mostra-se ineficaz e custosa para gerenciar essa degradação, pois não considera a condição real do componente (MOBLEY, 2002).

Neste contexto, o Monitoramento de Condição (Condition Monitoring) surge como estratégia central para a gestão de ativos. Consiste na coleta e análise periódica ou contínua de dados de parâmetros físicos da máquina, visando identificar mudanças

indicativas de falhas em desenvolvimento antes que estas evoluam para colapso funcional (MOBLEY, 2002; RANDALL, 2021).

Para rolamentos, os parâmetros de monitoramento mais eficazes são aquelas sensíveis às alterações dinâmicas e à degradação superficial. A Tabela 1 correlaciona os principais modos de falha com suas manifestações físicas e as técnicas de monitoramento mais indicadas para sua detecção.

Tabela 1 - Correlação entre Modos de Falha, Sintomas e Técnicas de Monitoramento em Rolamentos

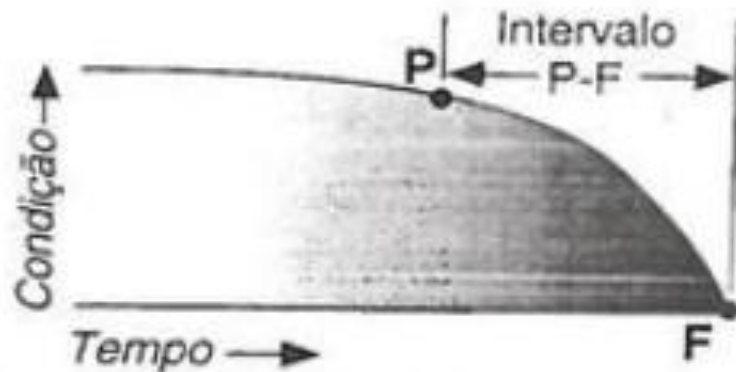
Modo de falha	Sintomas / Manifestações Físicas	Técnicas de monitoramento mais eficazes
Fadiga (Spalling)	Surgimento de microfissuras e descascamento (pitting); Geração de vibrações de impacto de alta frequência; Aumento do ruído audível	Análise de Vibração (Especialmente FFT): Detecção das frequências características (BPFO, BPFI, BSF).
Contaminação (Sólidos)	Riscos e ranhuras nas pistas e elementos rolantes; Elevação do ruído de fundo e dos níveis gerais de vibração; Aceleração do processo de fadiga.	Análise de Óleo: Contagem de partículas.
Contaminação (Umidade)	Corrosão e pitting nas superfícies	Análise de Óleo: Teste de Karl Fischer para medição de água.
Lubrificação Inadequada	Aumento do atrito e temperatura	Monitoramento de Temperatura: Método direto e eficaz para detectar superaquecimento.
Desalinhamento / Folga	Vibração na frequência de rotação (1x) e seus harmônicos (2x, 3x)	Análise de Vibração: Análise espectral para identificar harmônicos de 1x.

Fonte: Elaborado pelos autores com base em SKF (2007), Randall (2021) e Mobley (2002).

Conforme ilustrado na Tabela 1, a Análise de Vibração destaca-se como técnica versátil e sensível para detecção da maioria dos modos de falha em rolamentos, especialmente defeitos superficiais incipientes. Qualquer imperfeição na superfície do rolamento gera impactos repetitivos que excitam as frequências naturais de ressonância do conjunto, produzindo pulsos de vibração de alta frequência modulados pelas frequências características da geometria do rolamento (RANDALL, 2021).

A evolução de uma falha em rolamentos segue o padrão representado pela Curva P-F (Potential Failure - Functional Failure), conceito fundamental em confiabilidade (Figura 14). Esta curva demonstra que, desde o início de uma falha potencial (P) até o ponto de falha funcional (F), existe uma janela de tempo finita para intervenção.

Figura 14 - Curva P-F (Potential Failure - Functional Failure) ilustrando a progressão de uma falha e a janela de oportunidade para detecção.



Fonte: MOUBRAY, 2000, p. 145.

Técnicas avançadas como a análise espectral de vibrações detectam o defeito no início desta janela, permitindo intervenção planejada com significativa antecedência. Técnicas menos sensíveis, como monitoramento de temperatura, só identificam o problema em estágios mais avançados, reduzindo drasticamente o tempo para reação.

Portanto, o monitoramento de condição, particularmente a análise de vibração, configura-se não apenas como ferramenta de detecção, mas como sistema de gestão de risco operacional. Ao traduzir sintomas físicos de degradação em dados quantificáveis, permite a transição para um modelo preditivo e centrado em confiabilidade, base fundamental para a Indústria 4.0.

5.6 Técnicas de manutenção preditiva

A manutenção preditiva constitui uma abordagem baseada na condição real do equipamento, utilizando medições periódicas ou contínuas de parâmetros físicos para antecipar falhas e reduzir paradas não programadas. Diferentemente das estratégias corretiva e preventiva tradicional, esta abordagem permite a identificação de desvios em estágios iniciais de degradação, otimizando recursos e aumentando a confiabilidade operacional (MOBLEY, 2002). Entre as técnicas mais aplicadas em motores elétricos destacam-se a análise de vibrações e a análise de corrente elétrica.

5.6.1 Análise de vibrações

A análise de vibrações é reconhecida como uma das técnicas mais eficazes para monitoramento de máquinas rotativas. Fundamenta-se no princípio de que anomalias mecânicas geram padrões vibracionais característicos, que podem ser detectados e interpretados antes da ocorrência de falhas catastróficas (RANDALL, 2021). Nos motores elétricos, as principais fontes de vibração incluem o desbalanceamento do rotor (vibração predominante na frequência de rotação - 1x), desalinhamento entre eixos (componentes harmônicas em 2x, 3x da rotação), folgas mecânicas e defeitos em engrenagens e defeitos em rolamentos - foco principal deste trabalho.

5.6.2 Frequências características de falhas em rolamentos

A degradação de um rolamento ocorre em estágios previsíveis, cada um com uma assinatura vibracional distinta. A precisão do diagnóstico é garantida pela identificação das frequências de falha, que são picos no espectro de frequência correspondentes a defeitos em componentes específicos, conforme detalhado na Tabela 2.

Tabela 2 - Frequências Características de Falhas em Rolamentos

Sigla	Nome Completo da Frequência	Componente do Rolamento Associado	Descrição Física do Fenômeno
BPFO	Ball Pass Frequency Outer	Pista Externa	Frequência com que os elementos rolantes atingem um ponto fixo na pista externa.
BPFI	Ball Pass Frequency Inner	Pista Interna	Frequência com que os elementos rolantes atingem um ponto fixo na pista interna.
BSF	Ball Spin Frequency	Elementos Rolantes	Frequência de rotação dos elementos rolantes (esferas ou roletes).
FTF	Fundamental Train Frequency	Gaiola (Retentor)	Frequência de rotação da gaiola que retém os elementos rolantes.

Fonte: Elaborado pelos autores com base em Harris e Kotzalas (2009).

O cálculo dessas frequências considera a geometria do rolamento e a velocidade de operação, conforme estabelecido nas equações 3,4,5,6 e 7, por Harris e Kotzalas (2009):

- f_r : Frequência rotacional do eixo, determinada pela relação:

$$f_r = \frac{RPM}{60} \quad (3)$$

- N : Quantidade de elementos rolantes presentes no conjunto;
- d : Dimensão do diâmetro individual dos elementos rolantes (mm);
- D_p : Diâmetro primitivo de referência do conjunto rolante (mm);
- Φ : Ângulo de contato característico da configuração do rolamento. Para rolamentos radiais de esferas sem pré-carga, esse ângulo é usualmente 0° .
- $\cos\phi$ — cosseno do ângulo de contato

As fórmulas clássicas (usadas em literatura técnica e aplicações industriais) são:

- a) Fundamental Train Frequency (FTF) — frequência de rotação da gaiola (Hz):

$$FTF = \frac{1}{2} f_r \left(1 - \frac{d}{D_p} \cos \phi \right) \quad (4)$$

- b) Ball Pass Frequency, Inner race (BPFI) — passagem das esferas sobre a pista interna (Hz):

$$BPFI = \frac{N}{2} f_r \left(1 + \frac{d}{D_p} \cos \phi \right) \quad (5)$$

- c) Ball Pass Frequency, Outer race (BPFO) — passagem das esferas sobre a pista externa (Hz):

$$BPFO = \frac{N}{2} f_r \left(1 - \frac{d}{D_p} \cos \phi \right) \quad (6)$$

- d) Ball Spin Frequency (BSF) — rotação do elemento rolante ao redor do próprio eixo (Hz):

$$BSF = \frac{D_p}{2d} f_r \left[1 - \left(\frac{d}{D_p} \cos \phi \right)^2 \right] \quad (7)$$

5.6.3 Aplicação prática e monitoramento contínuo

A implementação da análise de vibrações envolve a fixação de acelerômetros na carcaça do motor para aquisição contínua de sinais. A análise no domínio do tempo, através de parâmetros como o valor RMS (Root Mean Square), permite o monitoramento de tendências, enquanto a conversão para o domínio da frequência via Transformada Rápida de Fourier (FFT) viabiliza o diagnóstico específico de falhas (RANDALL, 2021).

A evolução para sistemas de monitoramento contínuo representa um avanço significativo, substituindo medições periódicas por vigilância ininterrupta do estado mecânico. Esta capacitação permite detecção automática de anomalias e emissão de alertas precoces, sendo particularmente valiosa em aplicações críticas.

A interpretação dos dados é fundamentada em diretrizes técnicas e padrões de severidade amplamente adotados na indústria. Tais diretrizes definem faixas que classificam a condição da máquina como aceitável, tolerável ou inaceitável, conferindo objetividade ao diagnóstico (RANDALL, 2021).

Portanto, a análise de vibrações consolida-se como sistema de gestão da condição mecânica que fornece subsídios quantitativos para o planejamento de intervenções, contribuindo diretamente para a redução de custos de manutenção e aumento da confiabilidade operacional de motores elétricos.

5.7 Análise espectral por transformada rápida de Fourier (FFT)

5.7.1 Fundamentos da transformada rápida de Fourier (FFT)

A Transformada de Fourier, expressa na equação 8, constitui ferramenta matemática fundamental para análise de sinais, permitindo a decomposição de um sinal do domínio do tempo em suas componentes frequenciais. Para um sinal contínuo

$x(t)$, a Transformada de Fourier $X(f)$ é definida conforme a equação 8 (RANDALL, 2021):

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \cdot e^{-j2\pi ft} dt \quad (8)$$

Onde:

- $X(f)$ representa o espectro de frequência complexo;
- $x(t)$ corresponde ao sinal no domínio do tempo;
- f denota a frequência em Hertz (Hz);
- j constitui a unidade imaginária.

5.7.2 A transformada rápida de Fourier (FFT)

Para aplicações práticas com sinais digitais, utiliza-se a Transformada Rápida de Fourier (FFT), mostrado na equação 9, algoritmo computacionalmente eficiente desenvolvido por Cooley e Tukey (1965) que calcula a Transformada Discreta de Fourier (DFT). A DFT de uma sequência $x[n]$ de N pontos é expressa pela equação 9 (OPPENHEIM; SCHAFER, 2010):

$$x[K] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] \cdot e^{-j \frac{2\pi kn}{N}} \quad (9)$$

Onde:

- $X[k]$ representa os coeficientes de frequência (bin k);
- $x[n]$ constitui as amostras no domínio do tempo;
- N denota o número de pontos da FFT;
- $k=0,1,2,\dots,N-1$.

5.7.3 Parâmetros críticos para análise de vibração

a) Teorema de Nyquist, descrito na equação 10 a seguir:

$$f_{max} = \frac{f_s}{N} \quad (10)$$

Onde f_s representa a frequência de amostragem (De 681 Hz, foi definida para atender ao critério de Nyquist para as componentes de interesse, que se situam abaixo de 340 Hz, conforme análise espectral preliminar. Este valor foi selecionado como um compromisso ótimo entre a resolução em frequência desejada e as limitações de taxa de transferência do barramento I²C e do poder de processamento do ESP32, garantindo a estabilidade do sistema de aquisição sem perda de amostras), limitando a análise a 340,5 Hz (RANDALL, 2021). A resolução espectral (Δf), dada pela Equação 11, e o tempo de aquisição (T), pela Equação 12, são parâmetros críticos para a análise por FFT. Eles determinam, respectivamente, a menor diferença de frequência que pode ser resolvida no espectro e influenciam diretamente a fidelidade da transformação do sinal do domínio do tempo (aceleração vs. tempo) para o domínio da frequência (densidade espectral de aceleração vs. frequência).

b) Resolução Espectral

$$\Delta f = \frac{f_s}{N} \quad (11)$$

Para $N = 1024$ pontos e $f_s = 681$ Hz:

$$\Delta f = \frac{681}{1024} \approx 0.665 \text{ Hz}$$

c) Tempo de aquisição

$$Tempo_{aquisição} = \frac{N}{f_s} = \frac{1024}{681} \approx 1,5 \text{ segundos} \quad (12)$$

5.7.4 Implementação no projeto

No sistema desenvolvido, a FFT é implementada através da biblioteca `scipy.fft` em Python, seguindo a metodologia estabelecida por Virtanen et al. (2020) para processamento de sinais científicos.

5.8 Análise de corrente elétrica

A análise de corrente elétrica do estator, conhecida como Motor Current Signature Analysis (MCSA), constitui uma técnica de monitoramento de condição não invasiva que se baseia na detecção de modulações no espectro da corrente de alimentação do motor. Seu princípio fundamental reside no acoplamento eletromecânico entre o rotor e o estator: anomalias mecânicas que causam variações periódicas no conjugado de carga ou na velocidade do rotor manifestam-se como componentes harmônicas adicionais no sinal de corrente (THOMSON; GILMORE, 2003).

A técnica MCSA apresenta aplicações específicas para diferentes tipos de falhas:

- a) Barras quebradas no rotor: Produzem componentes laterais (sidebands) ao redor da frequência fundamental da rede, de acordo com a equação 13:

$$fb = f_1 \pm 2sf_1 \quad (13)$$

Onde f_1 é a frequência fundamental e s é o escorregamento;

- b) Excentricidades do entreferro: Geram modulações em frequências relacionadas à velocidade mecânica do rotor;
- c) Defeitos em rolamentos: Embora de detecção mais complexa, falhas em rolamentos induzem modulações na corrente através de vibrações que causam variações na relutância magnética do circuito.

A principal vantagem da MCSA é sua natureza não intrusiva, permitindo a instalação de sensores (transformadores de corrente ou alicates amperímetros) nos cabos de alimentação sem necessidade de parada do equipamento ou acesso físico ao motor. Esta característica torna a técnica particularmente valiosa para aplicações em ambientes industriais onde a operação contínua é crítica (NANDI; TOLİYAT; LI, 2005).

Pesquisas contemporâneas demonstram que a abordagem combinada de análise de vibrações e MCSA proporciona um diagnóstico mais robusto e confiável. Enquanto a análise de vibrações é sensível a falhas puramente mecânicas, a MCSA detecta tanto anomalias elétricas quanto mecânicas que se manifestam através de modulações no campo eletromagnético. Esta complementaridade permite uma visão integral da condição do equipamento, aumentando significativamente a confiabilidade do monitoramento preditivo (SCHOEN et al., 2012).

5.9 Conceitos de eletrônica embarcada

A eletrônica embarcada refere-se ao desenvolvimento de sistemas computacionais completos e autônomos, projetados para desempenhar funções específicas dentro de um dispositivo ou equipamento maior.

5.9.1 Fundamentos de sistemas embarcados

Sistemas embarcados consistem em sistemas computacionais completos projetados para funções específicas dentro de dispositivos maiores. Diferentemente de computadores de propósito geral, são otimizados para requisitos de custo, tamanho, consumo energético e confiabilidade, operando frequentemente em tempo real para interação com o ambiente físico através de sensores e atuadores (BARR, 2019).

O componente central destes sistemas é o microcontrolador, um circuito integrado que consolida em um único chip a unidade central de processamento (CPU), memória (RAM e ROM/Flash) e periféricos de entrada e saída (I/O) (VALVANO, 2014). Esta integração viabiliza soluções compactas, eficientes e de baixo custo, ideais para aplicações de controle e aquisição de dados.

5.9.2 Arquitetura e funcionamento de microcontroladores

Microcontroladores modernos, como os baseados nas arquiteturas AVR (ex: ATmega328P) e ARM Cortex-M (ex: ESP32), são programados para executar tarefas específicas de forma contínua ou em resposta a eventos. Sua operação fundamenta-

se na leitura de sinais externos através de pinos de I/O digitais e conversores analógico-digitais (ADCs), processamento desses dados conforme lógica programada, e envio de sinais de controle (VALVANO, 2014).

Os ADCs são componentes críticos para aplicações de instrumentação, permitindo a digitalização de sinais analógicos contínuos - como a tensão de saída de sensores - convertendo-os em valores discretos processáveis pelo software (VALVANO, 2014). A programação geralmente utiliza linguagens como C/C++, que equilibram eficiência computacional e produtividade do desenvolvedor.

5.9.3 Plataformas de prototipagem de baixo custo

O desenvolvimento ágil de dispositivos eletrônicos foi revolucionado por plataformas de prototipagem de código aberto e baixo custo. Estas abstraem a complexidade do projeto com componentes discretos, fornecendo ambientes integrados de hardware e software padronizados (BANZI, 2019).

Dentre as opções disponíveis, destacam-se:

- Arduino: Família baseada em microcontroladores AVR ou ARM;
- ESP32: Plataforma com conectividade Wi-Fi/Bluetooth integrada;
- Plataformas baseadas em microprocessadores;
- Raspberry Pi: Executa sistemas operacionais completos (ex: Linux).

5.9.4 Seleção da plataforma para o projeto

Para o desenvolvimento do sensor inteligente proposto, o módulo ESP32 foi selecionado como plataforma principal devido às suas características técnicas superiores (ESPRESSIF SYSTEMS, 2020):

- Processamento: CPU dual-core Xtensa® LX6 a 240 MHz;
- Memória: 520 KB de RAM, 4 MB de Flash;
- Conectividade: Wi-Fi e Bluetooth 4.2 integrados;
- Periféricos: Múltiplas interfaces I²C, SPI, UART e 12 bits ADC;
- Custo: Preço acessível comparável ao Arduino Uno.

Esta seleção justifica-se pela necessidade de processamento robusto para algoritmos de análise de vibração (FFT), conectividade para transmissão de dados em tempo real, e principalmente, a capacidade de aquisição de alta velocidade, requisitos que excedem as capacidades de placas Arduino tradicionais como o Uno, enquanto evitam a complexidade desnecessária de plataformas com sistema operacional completo como o Raspberry Pi.

A plataforma Arduino IDE com framework ESP32 foi mantida para desenvolvimento, aproveitando a familiaridade do ambiente e vasta biblioteca de suporte, enquanto se acessa os recursos avançados do microcontrolador.

5.10 Sensores de vibrações: Tipos e princípio de operações

A aquisição precisa de dados de vibração é a etapa inicial e crítica para a eficácia de qualquer sistema de monitoramento de condição. Essa aquisição é realizada por transdutores, dispositivos que convertem um fenômeno físico (a aceleração, velocidade ou deslocamento mecânico) em um sinal elétrico proporcional, passível de ser medido e analisado (Randall, 2021).

5.10.1 Fundamento da aquisição de vibrações

A aquisição precisa de dados de vibração constitui etapa fundamental para a eficácia de sistemas de monitoramento de condição. Esta aquisição é realizada por transdutores que convertem grandezas físicas de aceleração, velocidade ou deslocamento em sinais elétricos proporcionais, passíveis de medição e análise. A seleção do transdutor adequado é determinada pela faixa de frequência de interesse, amplitude vibratória, condições ambientais e critérios econômicos. Para análise de falhas em máquinas rotativas, que tipicamente envolvem frequências na faixa de dezenas de Hz a alguns kHz, os acelerômetros piezoelétricos consolidaram-se como tecnologia predominante devido à sua ampla resposta em frequência, robustez e compatibilidade (RANDALL, 2021).

5.10.2 Princípio de operação de acelerômetros piezoelétricos

O funcionamento do acelerômetro piezoelétrico fundamenta-se no efeito piezoelétrico direto, descoberto por Pierre e Jacques Curie em 1880. Materiais específicos, como cristais de quartzo ou cerâmicas polarizadas (PZT - titanato zirconato de chumbo), geram carga elétrica quando submetidos à tensão mecânica. Na configuração típica do sensor, uma massa sísmica é prensada contra elemento piezoelétrico. Quando o conjunto sofre aceleração, a massa sísmica exerce força inercial sobre o elemento piezoelétrico, que responde gerando carga elétrica proporcional à força aplicada e, conseqüentemente, à aceleração (PCB PIEZOTRONICS, 2019).

Esta carga é convertida internamente em sinal de tensão de baixa impedância, transmitido via cabos para o sistema de aquisição. Uma característica fundamental desta tecnologia é a capacidade de medir exclusivamente aceleração dinâmica (AC), sendo incapaz de medir aceleração estática (DC) como a gravidade (PCB PIEZOTRONICS, 2019).

5.10.3 Parâmetros técnicos para seleção e especificação do MPU-6050

Para o presente projeto, foi selecionado o sensor MPU-6050, que integra acelerômetro triaxial e giroscópio. Os parâmetros técnicos considerados na seleção incluem:

- Sensibilidade: Expressa em mV/g ou mV/(m/s²), define a amplitude do sinal de saída para dada aceleração de entrada;
- Faixa de frequência: Especifica o intervalo de frequências com resposta precisa, limitada inferiormente pela frequência de ressonância;
- Faixa de medida (range): Define a aceleração máxima mensurável sem saturação ou danos.

O MPU-6050 opera com faixa configurável de $\pm 2g$ a $\pm 16g$, sensibilidade digital e interface I²C (INVENSENSE, 2013), sendo compatível com as vibrações de alta frequência e baixa amplitude características de defeitos incipientes em rolamentos.

Sua seleção justifica-se pela relação custo-benefício, integração com microcontrolador ESP32 e adequação aos requisitos de aquisição do projeto.

6 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo detalha a estratégia metodológica empregada para o desenvolvimento e a validação do protótipo de sensor inteligente proposto. São descritos os materiais utilizados, a arquitetura do sistema, os procedimentos de implementação do firmware e a metodologia adotada para a validação experimental, com o objetivo de fornecer uma descrição clara e replicável do trabalho realizado.

6.1 Tipo de pesquisa e abordagem metodológica

Este trabalho classifica-se como uma pesquisa que engloba as naturezas experimentais, aplicadas e de desenvolvimento. A pesquisa é experimental por envolver a montagem de banco de testes controlado e coleta de dados empíricos para verificação da hipótese de detecção de falhas em rolamentos mediante sistema de baixo custo. É aplicada por visar geração de conhecimento para solução de problema específico: a necessidade de técnicas de manutenção preditiva acessíveis. Caracteriza-se como desenvolvimento devido ao projeto e construção de protótipo funcional que integra hardware e software para finalidade prática (SILVA; MENEZES, 2005).

A abordagem metodológica seguiu fluxo iterativo compreendendo as etapas de:

- Especificação de componentes;
- Desenvolvimento do protótipo;
- Aquisição de dados;
- Análise de resultados.

6.2 Especificações e seleção de materiais e componentes

A seleção dos componentes foi orientada pelos critérios de custo acessível, disponibilidade no mercado nacional, adequação técnica aos objetivos do projeto e facilidade de prototipagem. A Tabela 3 sumariza os principais itens utilizados.

Tabela 3 - Especificação dos principais materiais e componentes.

Componente	Modelo/Especificações	Finalidade no Sistema	Justificativa da Escolha
Microcontrolador	ESP32-WROOM-32 (CPU dual-core 240 MHz, Wi-Fi, Bluetooth, 4 MB Flash)	Aquisição, processamento inicial e comunicação dos dados	Aquisição, processamento inicial e transmissão dos dados via Wi-Fi para servidor Python
Sensor de Vibração	Acelerômetro MPU-6050 (3 eixos, faixa de $\pm 2g$, interface I ² C, giroscópio integrado)	Captura do sinal de aceleração vibratória da carcaça do motor	Custo extremamente baixo, capacidade de medir as frequências típicas de falhas em rolamentos e facilidade de interface com o Arduino via I ² C
Módulo RTC	DS3231 (Precisão $\pm 2ppm$, bateria CR2032)	Registro temporal dos dados adquiridos	Alta precisão temporal, independência energética
Módulo SD Card	Leitor/Gravador de cartão microSD (SPI)	Armazenamento local de dados	Redundância de dados, independência de conectividade
Unidade de Teste	Motor de indução trifásico.	Geração dos sinais de vibração para validação do protótipo	Representativo de uma aplicação industrial real e permite a comparação entre um estado de referência e um estado de falha
Ferramenta de Análise	Software Spyder + Python (pandas, numpy, matplotlib, scipy, flask, tkinter)	Pós-processamento avançado de sinais (análise espectral FFT)	Aquisição online/offline, pós-processamento avançado e visualização em tempo real, recursos robustos para análise de sinais, detecção automática de falhas e construção de dashboards interativos

Fonte: Elaborado pelos autores (2025) com base em ESPRESSIF SYSTEMS (2020); INVENSENSE (2013); ANALOG DEVICES (2022).

Além dos componentes listados, foram utilizados fonte de alimentação 5V DC, protoboard, jumpers, computador para desenvolvimento e software Arduino IDE para programação.

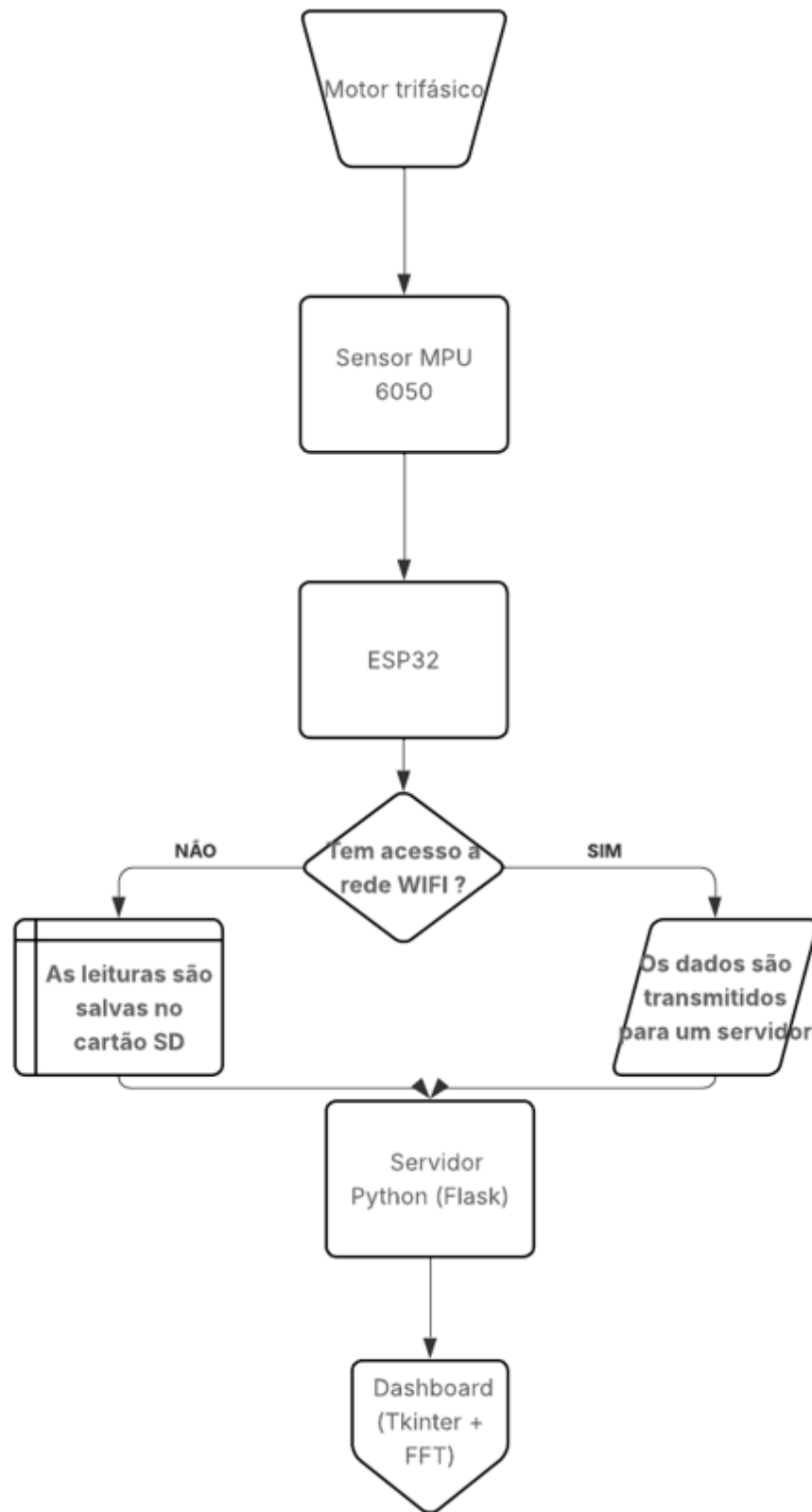
6.3 Arquitetura do sistema e desenvolvimento do protótipo

Esta seção descreve a integração dos componentes listados na Seção 3.2, detalhando a arquitetura geral do sistema e o desenvolvimento do protótipo.

6.3.1 *Arquitetura geral do sistema*

O sistema desenvolvido segue uma arquitetura distribuída baseada no microcontrolador ESP32 como unidade central de processamento. Conforme ilustrado na figura 15, o fluxo de dados inicia-se com a aquisição de sinais vibratórios pelo sensor MPU-6050, seguido pelo processamento no ESP32, armazenamento local via módulo SD e cartão de memória, e transmissão opcional via Wi-Fi para sistemas externos. A temporização precisa é garantida pelo módulo RTC DS3231, criando um sistema completo de aquisição e monitoramento de vibrações.

Figura 15 - Diagrama de blocos do sistema de aquisição e processamento de dados



Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

A Figura 15 apresenta o fluxograma simplificado do sistema. A sequência operacional inicia-se com a instalação física do sensor MPU6050 e do módulo ESP32 na carcaça do motor. Com o sistema energizado e o motor em funcionamento, o sensor coleta os dados de vibração e aceleração. Esses dados podem então ser armazenados em um cartão SD ou transmitidos via Wi-Fi para um servidor. Para esta aplicação, foi adotado o armazenamento local em cartão SD. Essa escolha visa à simplificação operacional, evitando a necessidade de reconfigurar credenciais de rede Wi-Fi a cada novo local de instalação. Em uma etapa posterior, os dados armazenados são processados pelo software Gui_monitor e visualizados em um dashboard para análise.

6.3.2 Especificações e integração dos componentes

- Microcontrolador ESP32-WROOM-32: Selecionado como unidade central de processamento devido à sua combinação de poder computacional, conectividade e custo acessível. O processador dual-core Xtensa® LX6 operando a 240 MHz permite execução paralela de aquisição de dados e processamento de sinais (FFT). A conectividade Wi-Fi integrada viabiliza transmissão em tempo real seguindo conceitos de IoT, enquanto os periféricos I²C e SPI facilitam comunicação com demais módulos (ESPRESSIF SYSTEMS, 2020);
- Sensor MPU-6050: Atua como transdutor principal para captura de sinais de aceleração. Configurado para operar na faixa de $\pm 2g$, garantindo alta sensibilidade para detecção de vibrações de baixa amplitude características de falhas incipientes. A frequência máxima de amostragem de 1 kHz atende ao Teorema de Nyquist para o espectro de frequências de interesse em diagnóstico de máquinas rotativas (INVENSENSE, 2013);
- Módulo RTC DS3231: Implementado para garantir precisão temporal nos registros de dados. Mantém contagem temporal contínua através de bateria auxiliar CR2032, permitindo associação de timestamp exato a cada amostra de vibração. Esta funcionalidade é crucial para correlação temporal de eventos e análise de tendências de degradação (ANALOG DEVICES, 2022);
- Módulo de Cartão SD: Provê armazenamento local redundante para dados processados (valores RMS, espectros de frequência, timestamps). A comunicação via SPI assegura velocidade adequada para gravação contínua

sem perdas, garantindo preservação dos dados mesmo durante interrupções de conectividade (MICROCHIP TECHNOLOGY, 2021).

6.3.3 *Desenvolvimento do firmware e integração*

O firmware embarcado no módulo ESP32 foi implementado com foco na aquisição de dados precisa e na autonomia do sistema, sendo desenvolvido utilizando o framework Arduino Core para ESP32. A arquitetura do programa foi modular, empregando bibliotecas específicas para gerenciar o hardware de forma eficiente.:

A integração dos módulos foi realizada através de protocolos padrão: I²C para MPU-6050 e DS3231, SPI para módulo SD, com sincronização temporal garantida pelo RTC para carimbo de data/hora preciso em todos os registros.

6.3.4 *Arquitetura e bibliotecas*

A comunicação com os periféricos foi estabelecida através de bibliotecas padronizadas: Wire.h gerencia o protocolo I²C para comunicação com sensores, utilizando os pinos GPIO21 (SDA) e GPIO22 (SCL). O driver Adafruit_MPU6050.h foi selecionado para facilitar a interface com o sensor de vibração, enquanto a comunicação com o módulo SD Card é feita via protocolo SPI nativo, utilizando as bibliotecas SPI.h e SD.h. O pino GPIO5 é dedicado ao Chip Select (CS) do módulo SD.

6.3.5 *Configuração e desempenho do sensor*

A configuração dos parâmetros do sensor MPU-6050 foi crítica para a aquisição de vibração industrial:

- Alcance e Resolução: O acelerômetro foi configurado com alcance de $\pm 4g$ e o giroscópio em $\pm 500^\circ/s$. Essa faixa é adequada para capturar vibrações industriais e garantir resolução para defeitos incipientes;
- Taxa de Amostragem: A aquisição de dados é realizada com uma taxa de amostragem de 681 Hz (const SAMPLE_RATE), configurada para ser

adequada à análise de vibrações. O firmware também configura um filtro digital de 44 Hz no sensor.

6.3.6 *Estrutura de dados e robustez*

O firmware otimiza o armazenamento de dados com as seguintes características:

- **Formato de Dados:** Os dados são estruturados em formato CSV (Comma Separated Values). Este formato é otimizado para o pós-processamento na interface *Gui_monitor* em Python. O timestamp é baseado na função *millis*, fornecendo precisão de 1ms para a correlação temporal dos dados;
- **Otimização:** O firmware utiliza buffers em memória para otimizar as operações de escrita no SD Card, além de realizar a escrita em blocos para reduzir o consumo de energia;
- **Tratamento de Erros:** Rotinas de tratamento de erros, com verificação de inicialização de todos os componentes, foram incorporadas para garantir a operação contínua. Um LED indicador (LED_PIN 2) é utilizado durante a aquisição, comunicando visualmente seu funcionamento nas condições previstas.

O código fonte completo do Firmware encontra-se integralmente disponível no repositório online, conforme detalhado no Anexo A deste trabalho.

6.3.7 *Desenvolvimento do software e interface gráfica (Gui_monitor)*

A escolha do ambiente Python para a interface *Gui_monitor* justifica-se pela robustez e acessibilidade de suas bibliotecas de processamento numérico e visualização. O software foi estruturado utilizando as seguintes bibliotecas: *tkinter* para a interface gráfica do usuário; *numpy* e *pandas* para o processamento numérico eficiente e a manipulação de dados; e *scipy* para o processamento de sinais, incluindo filtros e a Transformada Rápida de Fourier (FFT).

A interface Gui_monitor entrega uma implementação completa e profissional de um sistema de diagnóstico, integrando as seguintes funcionalidades principais:

- **Leitura Robusta de Dados:** O software realiza a leitura robusta de arquivos CSV com múltiplas codificações, garantindo a integridade dos dados brutos armazenados;
- **Análise Espectral e Filtragem:** Implementa o processamento de sinal com filtros passa-alta (frequência de corte de 0,5 Hz) e análise espectral FFT de 1024 pontos, permitindo a separação de ruídos de baixa frequência dos sinais de vibração. A taxa de amostragem F_s é estimada automaticamente, tipicamente em torno de 681 Hz;
- **Diagnóstico Automatizado:** Calcula automaticamente as frequências características de falhas em rolamentos e possui lógica de detecção automática de falhas, utilizando uma tolerância de 0.7 Hz para identificar assinaturas espectrais, o que aprimora a precisão do diagnóstico;
- **Visualização Completa:** Utiliza a biblioteca matplotlib para visualização integrada de sinais no domínio do tempo e frequência, além de incorporar o tratamento de *outliers* em dados de temperatura.

Essa separação de tarefas (aquisição de alta velocidade no ESP32 e análise complexa em Python) resulta em um design de sistema mais eficiente, onde o computador, com seu maior poder de processamento, realiza análises complexas e a interface com o usuário final.

O código-fonte completo do Software desenvolvido encontra-se disponível no Anexo A deste trabalho.

6.4 Integração física e ligação dos componentes

A integração entre o microcontrolador ESP32 e os módulos periféricos foi realizada mediante definição de interfaces de comunicação digitais específicas, conforme detalhado na Tabela 4. A configuração adotada priorizou a eficiência no compartilhamento de barramentos e a compatibilidade elétrica entre os componentes.

6.4.1 Estratégia de comunicação e barramentos

Os sinais de aquisição de vibração são obtidos pelo acelerômetro MPU-6050, conectado ao ESP32 através do barramento I²C, utilizando os pinos GPIO21 (SDA) e GPIO22 (SCL). O mesmo barramento é compartilhado com o módulo RTC DS3231, responsável pela marcação temporal das leituras, assegurando coerência cronológica dos dados coletados. Esta topologia de barramento compartilhado simplifica o cabeamento e otimiza a utilização dos recursos do microcontrolador.

O módulo de armazenamento, composto por adaptador microSD, foi interligado ao ESP32 via interface SPI. Nesta configuração, os sinais de comunicação seguem o mapeamento: GPIO23 (MOSI), GPIO19 (MISO), GPIO18 (SCK) e GPIO5 (CS). O funcionamento desta interface foi validado mediante testes com a biblioteca SdFat, amplamente reconhecida para aplicações em sistemas embarcados (GREINER, 2019).

6.4.2 Esquema de alimentação e compatibilidade elétrica

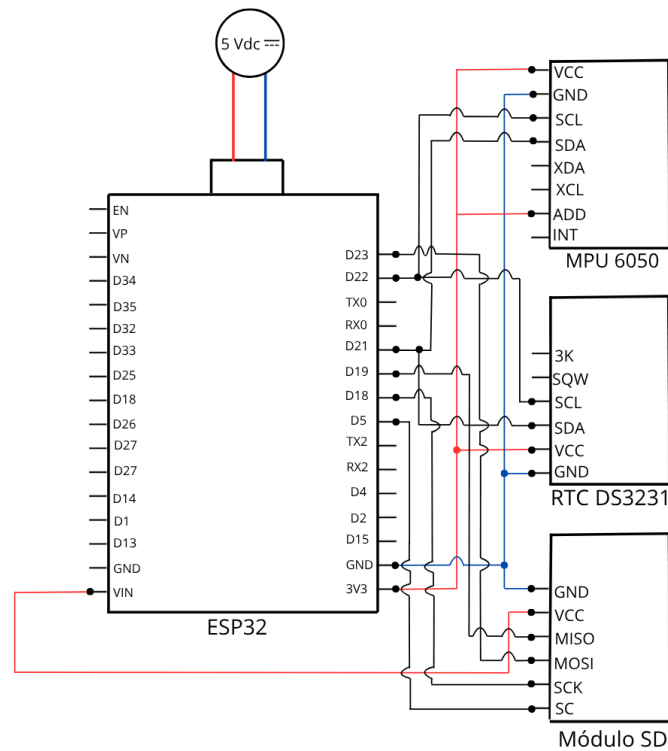
Em relação à alimentação, adotou-se fonte chaveada de 5V DC como suprimento principal, conectada ao pino VIN do ESP32. A partir deste ponto, o regulador interno da placa fornece 3,3V para os módulos MPU-6050 e DS3231, garantindo compatibilidade elétrica com os níveis lógicos do microcontrolador. O módulo microSD foi conectado ao pino VIN (5V), uma vez que o adaptador utilizado incorpora regulador AMS1117, compatível com o barramento SPI do ESP32. O mapa de ligação dos componentes está descrito na tabela 4 e na figura 16 a seguir:

Tabela 4 - Mapa de ligações

Componente/Pino	Ligação	Observações
ESP32 VIN	5V DC (fonte)	Alimenta a placa ESP32
ESP32 3V3	(opcional)	Pode alimentar sensores de 3.3V
ESP32 GND	GND (fonte)	Terra comum para todos os módulos
MPU6050 VCC	ESP32 3V3	Alimentação do sensor (3.3V recomendado)
MPU6050 GND	ESP32 GND	Nenhuma
MPU6050 SDA	ESP32 GPIO21	Barramento I ² C
MPU6050 SCL	ESP32 GPIO22	Barramento I ² C
DS3231 VCC	ESP32 3V3	Alimentação do RTC (3.3V recomendado)
DS3231 GND	ESP32 GND	Nenhuma
DS3231 SDA	ESP32 GPIO21	Compartilha linha I ² C
DS3231 SCL	ESP32 GPIO22	Compartilha linha I ² C
DS3231SQW (opcional)	ESP32 (pino entrada)	Saída de pulso do RTC
Módulo SD VCC	ESP32 VIN (5V) ou 3V3	Depende do regulador AMS1117 no módulo
Módulo SD GND	ESP32 GND	Nenhuma
Módulo SD CS	ESP32 GPIO5	Chip Select do SPI
Módulo SD SCK	ESP32 GPIO18	Clock do SPI
Módulo SD MOSI	ESP32 GPIO23	Dados MOSI
Módulo SD MISO	ESP32 GPIO19	Dados MISO

Fonte: Elaborado pelos autores (2025)

Figura 16 - Ligação física dos componentes



Fonte: Elaborado pelos autores (2025)

6.5 Inicialização e configuração de conectividade

Na etapa de inicialização, são configuradas as interfaces de comunicação serial (115200 baud) e I²C (400 kHz), responsáveis pela comunicação com o sensor inercial MPU-6050 e o módulo RTC DS3231.

6.6 Metodologia experimental

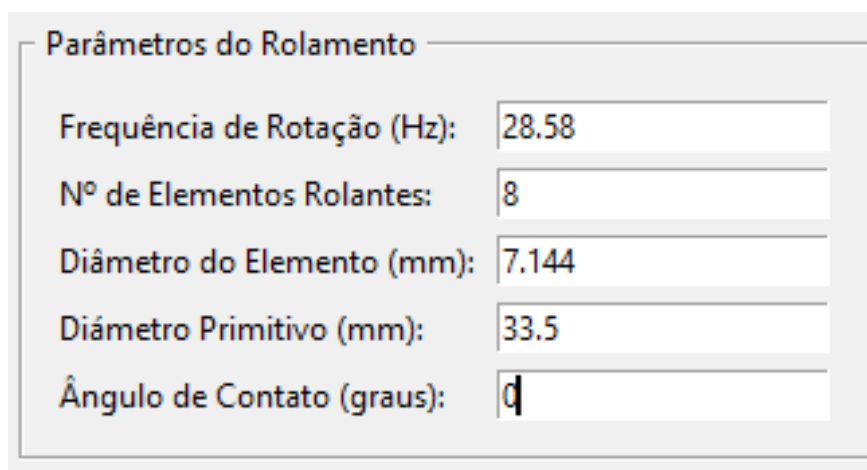
Para avaliar o desempenho e a precisão do protótipo desenvolvido, foi concebida e executada uma campanha de testes controlada em bancada, seguindo os procedimentos detalhados nesta seção.

6.6.1 Configuração do teste

Para avaliar a sensibilidade do protótipo em distinguir diferentes estágios de degradação em rolamentos, uma campanha experimental adicional foi conduzida. Dois motores WEG usados e em estágios diferentes de uso foram utilizados: um de 0,75 kW (1715 RPM) ilustrado na figura 18 e outro de 1,5 kW (3385 RPM) ilustrado na figura 19, ambos operando em vazio. Para garantir a comparabilidade dos dados, a velocidade do motor de 1,5 kW foi ajustada para 1715 RPM utilizando um inversor de frequência WEG CFW500. Ambos os motores eram equipados com o mesmo modelo de rolamento (6204-ZZ), cujas dimensões para cálculo das frequências características são: diâmetro primitivo de 33,5 mm, diâmetro de esfera de 7,14 mm, 8 elementos rolantes e ângulo de contato de 0°. O protótipo de sensor foi fixado de forma idêntica na carcaça de cada motor, na região do rolamento de acionamento no eixo vertical. Para cada motor, foram coletados cerca de 1-2 minutos de dados de aceleração em cada eixo, que foram subsequentemente processados no software Gui_monitor para obtenção dos valores de pico no domínio do tempo e dos espectros de frequência (FFT). Foram inseridos os dados do rolamento no software para o cálculo automático das frequências de falha, ilustrado na figura 17.

É importante salientar que é desconhecido a condição de saúde de ambos os rolamentos, e que a análise é hipotética e baseada na interpretação dos dados obtidos.

Figura 17 - Dados do rolamento inseridos no software

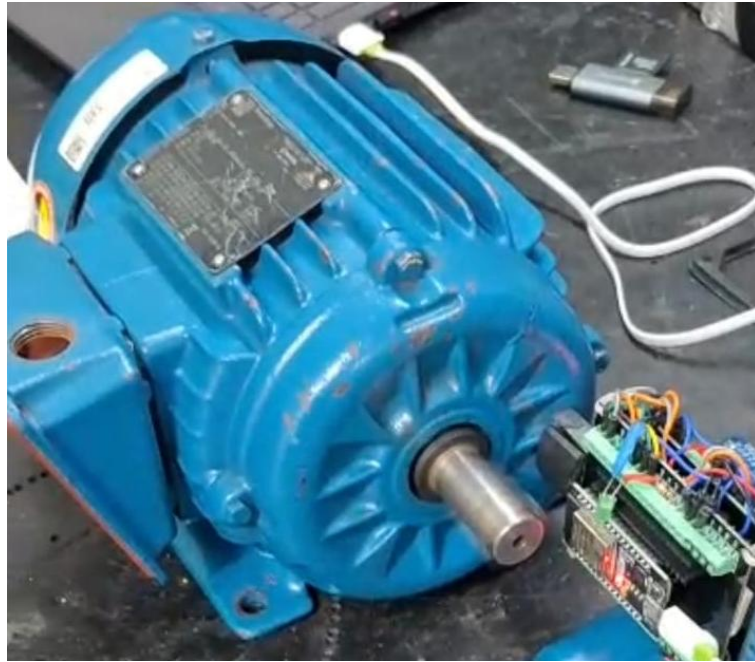


A imagem mostra uma janela de software intitulada "Parâmetros do Rolamento". Ela contém cinco campos de entrada com os seguintes valores:

Parâmetro	Valor
Frequência de Rotação (Hz):	28.58
Nº de Elementos Rolantes:	8
Diâmetro do Elemento (mm):	7.144
Diâmetro Primitivo (mm):	33.5
Ângulo de Contato (graus):	0

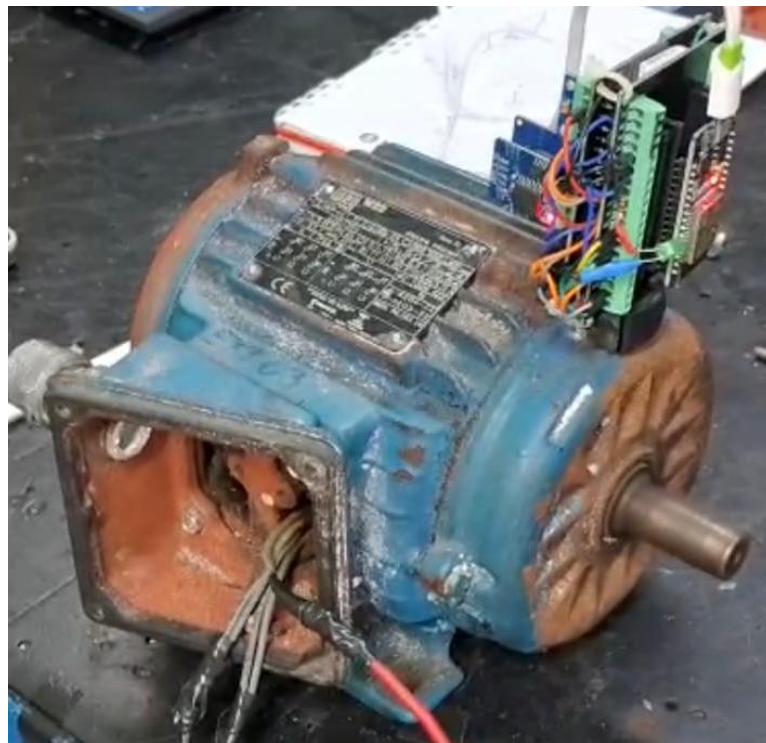
Fonte: Elaborado pelos autores (2025)

Figura 18 - Motor WEG 0,75 kW



Fonte: Elaborado pelos autores (2025)

Figura 19 - Motor WEG 1,5 kW



Fonte: Elaborado pelos autores (2025)

6.7 Abordagem de análise de dados

A análise dos dados coletados foi conduzida integralmente por meio da interface gráfica Gui_monitor, desenvolvida em Python para este fim.

- **Processamento e Visualização:** A aplicação Gui_monitor realiza a leitura do arquivo .csv gerado pelo ESP32, plotando os sinais de aceleração no domínio do tempo. Em seguida, baseado nas dimensões do rolamento e na velocidade do rotor é calculado as frequências características de falha (BPFO, BPFI, BSF), após isso é aplicada a Transformada Rápida de Fourier (FFT) para converter o sinal para o domínio da frequência, gerando o espectro que permite a identificação de componentes de frequências relacionadas a falhas;
- **Método de Diagnóstico:** O diagnóstico de condição do rolamento foi realizado através da análise visual e interpretativa do espectro de frequência gerado pela Gui_monitor.

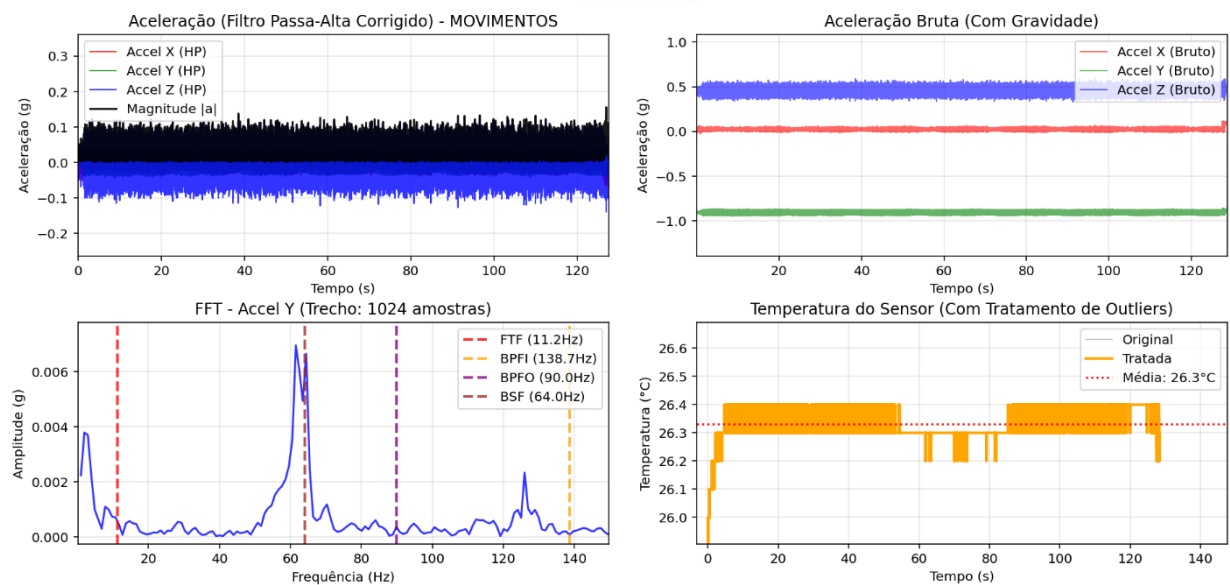
7 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo tem como objetivo apresentar os resultados obtidos após os ensaios realizados em bancada.

7.1.1 Análise do motor de 0,75 kW

Para uma caracterização mais profunda do estado do motor de 0,75 kW, foi realizada uma análise detalhada dos sinais de vibração e temperatura coletados durante aproximadamente 120 segundos de operação, em vazio, a 1715 RPM. Após a coleta, foi aplicado o software de tratamento dos dados adquiridos resultando na interface gráfica vista na figura 20.

Figura 20 - Interface Gui_monitor com dados do motor WEG de 0,75 kW no eixo vertical



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Para esta análise ser realizada, foi confrontado com as frequências características teóricas do rolamento 6204-ZZ na rotação de 1715 RPM (28,6 Hz):

- FTF (Fundamental Train Frequency): 11,2 Hz
- BPFO (Ball Pass Frequency Outer race): 89,9 Hz

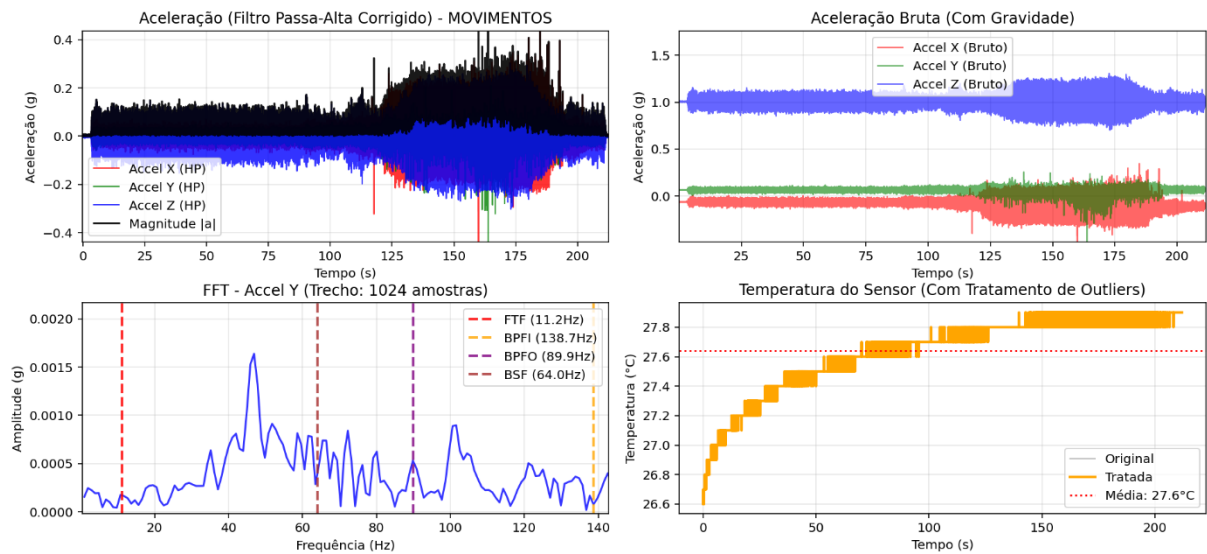
- BPFI (Ball Pass Frequency Inner race): 138,7 Hz
- BSF (Ball Spin Frequency): 64,0 Hz

O espectro de frequência exibido na figura 20 mostrou um pico dominante na faixa de 60-65 Hz, que coincide com alta precisão com a Frequência de Rotação da Esfera (BSF - Ball Spin Frequency) teórica de ~64,0 Hz para o rolamento 6204-ZZ. A presença de picos de baixa amplitude nas frequências características, como a BSF observada, é considerada normal em rolamentos saudáveis. Conforme explica Randall (2021), estes picos surgem de tolerâncias de fabricação e do fenômeno de variação de rigidez, constituindo o espectro vibracional intrínseco do componente e não necessariamente um indicativo de defeito. Um pico secundário de baixa amplitude foi observado próximo à Frequência Fundamental da Gaiola (FTF ~11,2 Hz), também coerente com a operação normal.

7.1.2 Análise do motor WEG de 1,5 kW

Para uma caracterização mais profunda do estado do motor de 1,5 kW, foi realizada uma análise detalhada dos sinais de vibração e temperatura coletados durante aproximadamente 200 segundos de operação, em vazio, a 1715 RPM. Após a coleta, foi aplicado o software de tratamento dos dados adquiridos resultando na interface vista na figura 21.

Figura 21 - Interface Gui_monitor com dados do motor WEG de 1,5 kW no eixo vertical



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Para esta análise foi confrontado com as mesmas frequências características teóricas do rolamento 6204-ZZ na rotação de 1715 RPM (28,6 Hz).

O espectro exibiu um pico dominante na faixa de 50-55 Hz, associado à fundamental da rede elétrica e a respostas estruturais do motor. Contudo, os achados mais significativos para o diagnóstico foram:

- A presença de um pico definido na frequência de ~90 Hz, que coincide com alta precisão com a BPFO teórica (~89,9 Hz). Este é um forte indicativo de um defeito incipiente ou micro desgaste na pista externa do rolamento;
- A existência de um componente secundário em ~65 Hz, muito próximo da BSF teórica (~64,0 Hz), sugerindo interação anormal entre os elementos rolantes e as pistas;
- A ausência de componentes significativos na FTF e na BPFI corrobora a hipótese de que a falha está localizada predominantemente na pista externa, um modo de falha comum em aplicações industriais.

7.2 Discussão dos resultados

A análise dos dados revela uma diferença marcante no perfil vibratório entre os dois motores. O motor de 1,5 kW exibe um nível de vibração global significativamente superior e um espectro de frequência onde o componente mais energético está localizado em ~ 90 Hz.

Crucialmente, esta frequência apresenta uma correlação notável com a Frequência de Passagem da Esfera na Pista Externa (BPFO $\sim 89,9$ Hz) teórica para o rolamento 6204-ZZ. Considerando que:

- A BPFO é a assinatura espectral clássica e bem documentada para falhas localizadas na pista externa de rolamentos (RANDALL, 2021);
- O motor de 1,5 kW apresenta condição geral mais desgastada, suportada pela evidência acústica e pelos níveis vibratórios elevados;
- É tecnicamente plausível e altamente provável que a condição degradada do motor de 1,5 kW seja causada, ou tenha como um de seus fatores principais, um defeito no rolamento que se manifesta como um pico dominante na BPFO.

Ressalta-se que, na ausência de uma inspeção física e abertura dos rolamentos, esta conclusão permanece como uma forte hipótese diagnóstica baseada em correlação de dados. A confirmação definitiva exigiria a desmontagem do motor para inspeção visual do rolamento. No entanto, a metodologia aplicada demonstrou a capacidade de identificar uma anomalia mecânica específica e localizada, cuja assinatura coincide com um modo de falha conhecido, validando o protótipo como uma ferramenta eficaz para direcionar e priorizar inspeções de manutenção.

8 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

8.1 Conclusão

Este trabalho teve como objetivo geral desenvolver e validar um protótipo de sensor inteligente para diagnóstico de falhas em rolamentos de motores elétricos. Após a execução do projeto, conclui-se que:

- Objetivo 1 (Selecionar e integrar sensores de vibração a uma plataforma de processamento embarcada): Foi plenamente atendido. Um sistema funcional foi construído, integrando com sucesso o microcontrolador ESP32, o sensor MPU-6050, o módulo RTC e o cartão SD, capaz de adquirir, carimbar no tempo e armazenar dados de vibração de forma autônoma;
- Objetivo 2 (Implementar algoritmos): Foi atingido com o desenvolvimento do firmware para aquisição e do software Gui_monitor em Python para visualização e análise espectral (FFT), formando um conjunto completo de ferramentas;
- Objetivo 3 (Validar o protótipo): Foi atingido. A campanha experimental demonstrou que o sistema é capaz de discriminar diferentes estágios de falhas em um rolamento, identificando a frequência característica do defeito;
- Objetivo 4 (Viabilidade econômica): O custo total de hardware para o sensor inteligente (ESP32, MPU-6050, RTC e SD Card) foi de aproximadamente R\$ R\$ 200 por unidade, em contraste, soluções de monitoramento preditivo comercial, como o WEG Scan e as plataformas da Tractian, embora ofereçam maior robustez e inteligência embarcada, operam sob um modelo de custo de aquisição elevado por sensor, geralmente somado a uma assinatura mensal ou licença de software (SaaS). O protótipo desenvolvido, portanto, cumpre seu objetivo de ser uma alternativa acessível para pequenas empresas ou instituições de ensino.

Portanto, a principal contribuição deste trabalho foi demonstrar a viabilidade técnica e econômica de uma solução de monitoramento de baixo custo, acessível para ambientes acadêmicos e de pequena indústria, que cumpre as etapas fundamentais da manutenção preditiva baseada em vibração, servindo como base para aprimoramentos futuros, saindo de protótipo para um produto comercial.

8.2 Trabalhos futuros

Com base nas limitações identificadas e no sucesso do protótipo inicial, sugere-se as seguintes direções para pesquisas futuras:

- a) Automação do Diagnóstico com Machine Learning: Implementar algoritmos de aprendizado de máquina (ex.: Redes Neurais Artificiais) diretamente no Gui_monitor ou no próprio ESP32 para classificar automaticamente o estado do rolamento (Saudável, Falha na Pista Externa, Falha na Pista Interna, etc.), eliminando a subjetividade da análise visual;
- b) Implementação de Conectividade em Tempo Real: Explorar a capacidade de Wi-Fi do ESP32 para transmitir os dados, ou apenas os resultados do diagnóstico, para uma plataforma na nuvem (dashboard), permitindo o monitoramento remoto de múltiplos ativos, verdadeiramente alinhado à Indústria 4.0;
- c) Aprimoramento do Hardware: Desenvolver uma placa de circuito impresso (PCB) dedicada para integrar todos os componentes, melhorar a blindagem contra ruído e incluir um circuito de condicionamento de sinal analógico para o acelerômetro;
- d) Expansão da Biblioteca de Falhas: Testar o sistema com uma gama mais ampla de falhas (pista interna, elemento rolante, cage) e em diferentes condições de carga e velocidade do motor para robustecer o algoritmo de diagnóstico.

9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, Antonio Tadeu Lyrio de. **Motores de Indução Trifásicos**. Itajubá: FUPAI, 2011. 130 p.

ANALOG DEVICES. DS3231: **Extremely Accurate I²C-Integrated RTC/TCXO/Crystal**. Datasheet, 2022. Disponível em: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/DS3231.pdf>. Acesso em: 03 nov. 2025.

ASTM INTERNATIONAL. **ASTM D6304-20: Standard Test Method for Determination of Water in Petroleum Products, Lubricating Oils, and Additives by Coulometric Karl Fischer Titration**. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2020. Disponível em: <https://store.astm.org/d6304-20.html>. Acesso em: 01 nov. 2025.

BANZI, M. **Introdução à plataforma Arduino**. 2. ed. São Paulo: Novatec, 2019.

BARR, M. **Embedded Systems Dictionary**. San Francisco: CMP Books, 2019.

CHAPMAN, S. J. **Máquinas Elétricas**. 5. ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.

COOLEY, J. W.; TUKEY, J. W. **An algorithm for the machine calculation of complex Fourier series**. Mathematics of Computation, v. 19, n. 90, p. 297-301, 1965.

EPRI. **Motor reliability working group report**. Palo Alto: Electric Power Research Institute, 2018.

ESPRESSIF SYSTEMS. **ESP32-WROOM-32 Datasheet**. Versão 3.2, 2020. Disponível em: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-wroom-32_datasheet_en.pdf. Acesso em: 03 nov. 2025.

FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY, C.; UMANS, S. D. **Electric Machinery**. 7th ed. New York: McGraw-Hill, 2014.

GREINER, B. **SdFat: Library for SD Cards**. GitHub Repository, 2019. Disponível em: <https://github.com/greiman/SdFat>. Acesso em: 03 nov. 2025.

GUSSOW, M. **Eletricidade Básica**. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2012.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. **Fundamentos de Física**. Volume 3: Eletromagnetismo. 10. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

HARRIS, T. A.; KOTZALAS, M. N. **Essential Concepts of Bearing Technology**. 5th ed. Boca Raton: CRC Press, 2009.

INVENSENSE. **MPU-6050: Six-Axis (Gyro + Accelerometer) MEMS MotionTracking™ Device.** Datasheet, 2013. Disponível em: <https://invensense.tdk.com/wp-content/uploads/2015/02/MPU-6000-Datasheet1.pdf>. Acesso em: 03 nov. 2025.

MICROCHIP TECHNOLOGY. **SD Card Specification Overview.** Application Note, 2021. Disponível em: <https://ww1.microchip.com/downloads/en/AppNotes/SD-Card-Specification-Overview-00002196B.pdf>. Acesso em: 03 nov. 2025.

MOBLEY, R. K. **An introduction to predictive maintenance.** 2nd ed. Boston: Butterworth-Heinemann, 2002.

MOUBRAY, J. **Manutenção Centrada em Confiabilidade.** São Paulo: Aladon Ltd, 2000.

NANDI, S.; TOLIYAT, H. A.; LI, X. **Condition monitoring and fault diagnosis of electrical motors—A review.** IEEE Transactions on Energy Conversion, v. 20, n. 4, p. 719-729, 2005.

NEMA. **Motors and Generators – NEMA Standard MG-1.** National Electrical Manufacturers Association.

OPPENHEIM, A. V.; SCHAFER, R. W. **Discrete-time signal processing.** 3rd ed. Pearson, 2010.

PCB PIEZOTRONICS. **Piezoelectric Accelerometer Theory and Application.** Technical Note, 2019. Disponível em: <https://www.pcb.com/content/docs/manuals/Accelerometer-Theory-pdf.pdf>. Acesso em: 03 nov. 2025.

RANDALL, R. B. **Vibration-based condition monitoring: industrial, aerospace and automotive applications.** 2nd ed. Hoboken: Wiley, 2021.

SCHOEN, R. R. et al. **Motor bearing damage detection using stator current monitoring.** IEEE Transactions on Industry Applications, v. 31, n. 6, p. 1274-1279, 2012.

SILVA, E. L.; MENEZES, E. M. **Metodologia da pesquisa e elaboração de dissertação.** 4. ed. Florianópolis: UFSC, 2005.

SKF. **Bearing damage and failure analysis.** 2. ed. [S.l.]: SKF Group, 2017. Disponível em:

https://cdn.skfmediahub.skf.com/api/public/093168a92d25cc46/pdf_preview_medium/093168a92d25cc46_pdf_preview_medium.pdf. Acesso em: 22 set. 2025.

SKF. **Rolamento rígido de esferas de sulco profundo com ranhuras de lubrificação**. Disponível em: <https://www.skf.com/br/products/rolling-bearings/ball-bearings/deep-groove-ball-bearings/single-row-deep-groove-ball-bearings-with-filling-slots>. Acesso em: 22 set. 2025.

SKF. **Rolamentos de rolos cilíndricos**. Disponível em: <https://www.skf.com/br/products/rolling-bearings/roller-bearings/cylindrical-roller-bearings>. Acesso em: 22 set. 2025.

THOMSON, W. T.; GILMORE, R. J. **Motor current signature analysis to detect faults in induction motor drives**. Proceedings of the IEEE International Electric Machines and Drives Conference, p. 1453-1459, 2003.

VALVANO, J. **Embedded Systems: Real-Time Interfacing to ARM Cortex-M Microcontrollers**. Austin: Jonathan Valvano, 2014.

VIRTANEN, P. et al. SciPy 1.0: **fundamental algorithms for scientific computing in Python**. Nature Methods, v. 17, p. 261-272, 2020.

APÊNDICE A – ARQUITETURA DO SISTEMA

O Apêndice a seguir detalha a arquitetura do sistema desenvolvido, incluindo as funcionalidades, o fluxo de dados e os principais algoritmos implementados.

A.1 Estrutura do sistema de monitoramento

O sistema desenvolvido é composto por dois módulos principais que trabalham de forma complementar: um módulo de software em Python para análise e uma unidade de hardware (firmware embarcado no ESP32) para aquisição de sinais de vibração.

A.1.1 Módulo Python – GUI Monitor

- Arquivo principal: gui_monitor.py (1.248 linhas);
- Funções principais: Leitura de dados, processamento de sinais, análise FFT, visualização gráfica, diagnóstico automático;
- Bibliotecas utilizadas: tkinter, numpy, pandas, scipy, matplotlib.

A.1.2 Módulo ESP32 – Firmware de aquisição

- Arquivo principal: vibration_sensor.ino (120 linhas);
- Funcionalidades: Aquisição de dados do MPU-6050, armazenamento em SD Card, timestamp preciso;
- Bibliotecas utilizadas: Wire, Adafruit_MPU6050, SPI, SD.

A.2 Fluxo de processamento de dados

A.2.1 Aquisição no ESP32

1. Inicializar MPU-6050 (I²C, 400kHz);
2. Configurar sensor ($\pm 4g$, 44Hz de filtro);
3. Inicializar SD Card;
4. Loop principal:

- a. Ler acelerômetro e giroscópio;
- b. Formatar dados CSV;
- c. Bufferizar em memória;
- d. Gravar no SD a cada 1 segundo.

A.2.2 Análise no Python

- 1. Ler arquivo CSV com tratamento robusto;
- 2. Converter unidades (m/s^2 para g);
- 3. Aplicar filtro passa-alta (0.5Hz);
- 4. Calcular magnitude vetorial;
- 5. Executar FFT para análise espectral;
- 6. Identificar picos nas frequências características;
- 7. Gerar diagnóstico automático;
- 8. Plotar gráficos temporais e espectrais.

A.3 Algoritmos principais implementados

A.3.1 Cálculo de frequências características

O algoritmo a seguir implementa as fórmulas teóricas para cálculo das frequências de falha em rolamentos (BPFO, BPFI, BSF, FTF):

```
def calculate_bearing_frequencies(F_rot, N, d, D, angulo_contato):
    """
    Calcula as frequências teóricas de falha em rolamentos
    F_rot: Frequência de rotação (Hz)
    N: Número de elementos rolantes
    d: Diâmetro do elemento (mm)
    D: Diâmetro primitivo (mm)
    angulo_contato: Ângulo de contato (graus)
    """
    cos_phi = math.cos(math.radians(angulo_contato))
    d_D = d / D

    FTF = 0.5 * F_rot * (1 - d_D * cos_phi)
    BPFI = (N / 2) * F_rot * (1 + d_D * cos_phi)
    BPFO = (N / 2) * F_rot * (1 - d_D * cos_phi)
    BSF = (D / (2 * d)) * F_rot * (1 - (d_D * cos_phi)**2)
```

```
return {"FTF": FTF, "BPFI": BPFI, "BPFO": BPFO, "BSF": BSF}
```

A.3.2 Detecção automática de falhas

Este algoritmo realiza o matching (comparação) entre os picos de frequência medidos no espectro (FFT) e as frequências teóricas de falha, utilizando uma tolerância pré-definida:

```
def detect_faults(spectrum_freq, spectrum_amp, theoretical_freqs,
tolerance=0.7):
    """
    Detecta falhas comparando picos espectrais com frequências teóricas
    spectrum_freq: Vetor de frequências da FFT
    spectrum_amp: Vetor de amplitudes da FFT
    theoretical_freqs: Dicionário com frequências teóricas
    tolerance: Tolerância para matching (Hz)
    """
    detected_faults = []

    # Identifica picos significativos no espectro
    peak_indices = find_spectral_peaks(spectrum_amp)

    for fault_name, fault_freq in theoretical_freqs.items():
        for peak_freq, peak_amp in zip(spectrum_freq[peak_indices],
                                       spectrum_amp[peak_indices]):
            if abs(peak_freq - fault_freq) < tolerance:
                detected_faults.append({
                    'fault': fault_name,
                    'theoretical_freq': fault_freq,
                    'measured_freq': peak_freq,
                    'amplitude': peak_amp
                })

    return detected_faults
```

A.4 Especificações técnicas

A.4.1 Requisitos do sistema Python

Sistema Operacional: Windows/Linux/macOS

Python: 3.8 ou superior

Memória RAM: 4 GB mínimo

Armazenamento: 500 MB livres

Bibliotecas:

- `numpy` $\geq 1.21.0$;
- `pandas` $\geq 1.3.0$;
- `scipy` $\geq 1.7.0$;
- `matplotlib` $\geq 3.4.0$;
- `tkinter` (incluído no Python).

A.4.2 Configurações do firmware ESP32

- Taxa de amostragem: ~ 681 Hz
- Resolução acelerômetro: $\pm 4g$
- Resolução giroscópio: $\pm 500^\circ/s$
- Filtro: 44 Hz
- Formato dados: CSV
- Armazenamento: Cartão SD (FAT32)

A.5 Instruções de uso básicas

A.5.1 Coleta de dados

1. Conectar ESP32 com MPU-6050 e SD Card;
2. Alimentar o sistema (5V DC);
3. Fixar sensor na carcaça do motor;
4. Iniciar aquisição (automática).

A.5.2 Análise de dados

1. Executar python gui_monitor.py;
2. Inserir parâmetros do rolamento;
3. Selecionar arquivo CSV para análise;
4. Visualizar gráficos e diagnóstico.

Nota: Os códigos fonte completos dos módulos aqui documentados encontram-se integralmente disponíveis no repositório online, conforme detalhado no ANEXO A deste trabalho, permitindo a reprodução dos resultados apresentados.

ANEXO A – ENDEREÇO ELETRÔNICO DO CÓDIGO FONTE

Os arquivos fonte encontram-se no repositório GitHub, no endereço abaixo. Por motivos de segurança e licenciamento, o repositório foi configurado como Privado (Private). O acesso de leitura é concedido mediante solicitação via e-mail (gabriel.silva.souza1368@gmail.com).

<https://github.com/GabrielFatecSP/Sistema-de-aquisi-o-de-vibra-o-para-diagn-stico-de-falha-em-rolamentos-com-ESP32>

Conteúdo principal:

- Firmware: Arquivos em C++ (pasta vibration_sensor)
- Software: Arquivos em Python (pasta GUI Monitor)