



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E NATURAIS
CURSO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA

Ricardo Cesar Filgueira Filho

Estudo de Detecção de Defeitos em Motores Elétricos de Indução - Uma Revisão

MOSSORÓ

2024

Ricardo Cesar Filgueira Filho

Estudo de Detecção de Defeitos em Motores Elétricos de Indução - Uma Revisão

Monografia apresentada a Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Bacharel em Ciência e Tecnologia.

Orientador: Prof. Me. Marcio Furukava

Co-orientador: Prof. Dr. Edwin Luize Ferreira Barreto

MOSSORÓ

2024

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

F488e Filho, Ricardo Cesar Filgueira.
Estudo de Detecção de Defeitos em Motores
Elétricos / Ricardo Cesar Filgueira Filho. - 2024.
38 f. : il.

Orientador: Marcio Furukava.
Coorientador: Edwin Luize Ferreira Barreto.
Monografia (graduação) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Curso de Ciência e
Tecnologia, 2024.

1. motores de indução. 2. falhas. 3. rotor. 4.
estator. 5. frequência. I. Furukava, Marcio,
orient. II. Ferreira Barreto, Edwin Luize, co-
orient. III. Título.

Ficha catalográfica elaborada por sistema gerador automático em conformidade
com AACR2 e os dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Biblioteca Campus Mossoró / Setor de Informação e Referência
Bibliotecária: Keina Cristina Santos Sousa e Silva
CRB: 15/120

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

Ricardo Cesar Filgueira Filho

Estudo de Detecção de Defeitos em Motores Elétricos de Indução - Uma Revisão

Monografia apresentada a Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Bacharel em Ciência e Tecnologia.

Defendida em: ____19__ / ____10__ / _____2024____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Me. Marcio Furukava (UFERSA)
Presidente

Prof. Dr. Edwin Luize Ferreira Barreto (UFERSA)
Membro Examinador

Eng. M.Sc Lisarb Henneh Brasil (Externo a Instituição)
Membro Examinador

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pelo dom da vida, reconheço que a fé, me proporcionou o suporte necessário para enfrentar as adversidades deste momento decisivo na minha trajetória acadêmica. Sou grato a minha família, que representa a base e sustentação, agradeço profundamente pelo apoio incondicional e pela força oferecida ao longo deste percurso, com um reconhecimento especial aos meus pais, Ricardo e Gersonete, e a minha irmã, Gersonely. Agradeço aos ensinamentos e momentos descontraídos proporcionados pelas minhas avós, Raimunda e Maria de Lourdes (In Memoriam), assim como também pelos momentos tidos com os meus avôs, José e Expedito (In Memoriam). Sou agradecido também ao meu orientador Me. Marcio Furukava, e ao co-orientador Dr. Edwin Luize, pelo direcionamento e paciência durante todo o período de desenvolvimento do trabalho. Por fim, agradeço aos meus amigos pelo apoio inestimável, cujo papel foi essencial ao longo dessa jornada, ainda que nomes específicos não sejam mencionados por mim, para evitar alguma injustiça de minha parte.

ÉPIGRAFE

“Elevo os meus olhos para os montes; de onde
me vem o socorro? O meu socorro vem do
Senhor, que fez os céus e a terra.”

Salmos 121:1,2

RESUMO

A detecção antecipada de problemas elétricos e mecânicos, como desalinhamento, falhas no enrolamento, excentricidades no entreferro e vibrações excessivas, é crucial para a garantia da eficiência, visando prolongar a vida útil desses equipamentos. O presente trabalho aborda a necessidade da identificação de falhas em motores elétricos de indução, amplamente empregados na indústria. Foi realizado um levantamento bibliográfico sobre os principais tipos de falhas e os métodos mais utilizados para sua identificação, com ênfase em bancadas de testes e dispositivos de medição. Dentre os sensores comumente utilizados destacam-se os de temperatura e acelerômetros. O estudo propõe o desenvolvimento de uma bancada para detecção de ruídos e inconsistências em motores de indução, utilizando sensores de custo acessível e implementando a análise por meio de uma linguagem de programação. Essa bancada terá como foco o monitoramento de variáveis fundamentais, como temperatura, vibrações mecânicas e o campo magnético externo, possibilitando a identificação precisa de falhas elétricas e mecânicas. A viabilidade da proposta é assegurada pelo uso de componentes de baixo custo e programação simplificada, proporcionando uma solução eficiente para manutenção preditiva. O monitoramento contínuo permitirá a antecipação de falhas, evitando paradas não planejadas e otimizando a manutenção dos motores, resultando em economia e aumento da durabilidade dessas máquinas. Concluiu-se que a detecção preditiva de falhas elétricas em motores de indução permite a identificação antecipada de problemas, contribuindo para a manutenção preventiva e para a redução de paradas inesperadas, auxiliando, principalmente, a indústria na operação dessas máquinas. Essa abordagem, ao empregar sensores e monitoramento contínuo, possibilita a análise do desempenho do motor, promovendo maior eficiência e durabilidade dos equipamentos.

Palavras-chave: motores de indução; falhas; rotor; estator; e frequência.

ABSTRACT

Early detection of electrical and mechanical problems, such as misalignment, winding failures, eccentricities in the air gap and excessive vibrations, is crucial to ensuring efficiency, aiming to extend the useful life of this equipment. This work addresses the need to identify faults in induction electric motors, widely used in industry. A bibliographic survey was carried out on the main types of failures and the most used methods for their identification, with an emphasis on test benches and measuring devices. Among the commonly used sensors, temperature and accelerometers stand out. Generally, the analysis of the data received is carried out using a programming language, responsible for processing the parameters obtained. The study proposes the development of a bench for detecting noise and inconsistencies in induction motors, using affordable sensors and implementing the analysis through a programming language. This bench will focus on monitoring fundamental variables, such as temperature, mechanical vibrations and the external magnetic field, enabling the precise identification of electrical and mechanical failures. The viability of the proposal is ensured using low-cost components and simplified programming, providing an efficient solution for predictive maintenance. Continuous monitoring will allow the anticipation of failures, avoiding unplanned stops and optimizing engine maintenance, resulting in savings and increased durability of these machines. It was concluded that the predictive detection of electrical faults in induction motors allows the early identification of problems, contributing to preventive maintenance and reducing unexpected stops, mainly helping the industry in the operation of these machines. This approach, by employing sensors and continuous monitoring, enables the analysis of engine performance, promoting greater efficiency and durability of equipment.

Keywords: induction motors; failures; rotor; stator; and frequency.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Elementos de um motor de indução	12
Figura 2. Tipos de motores elétrico	15
Figura 3. Motor com partida a capacitor	17
Figura 4. Composição do motor de polos sombreados.....	18
Figura 5. Dois tipos de excentricidade no entreferro: a) estática b) dinâmica	19
Figura 6. Rolamento de esferas	20
Figura 7. Desalinhamentos gerados em motores a indução.....	20
Figura 8. Espectro de fluxo (bobina de fluxo (a) motor saudável; (b) motor com 7 barras quebradas.....	23
Figura 9. Espectro da PSH de um motor sem falha/defeito.....	26
Figura 10. Espectro da PSH de um motor com excentricidade elevada.....	26
Figura 11. Espectro da fundamental de um motor sem falha/defeito	27
Figura 12. Espectro da fundamental de um motor com excentricidade elevada	27
Figura 13. Diagrama de blocos de um esquema de monitoramento da corrente do estator	27
Figura 14. Dispositivo de monitoramento acoplado ao motor de indução	31
Figura 15. Cadeia de medição para o sensor de temperatura	32
Figura 16. Cadeia de medição para o acelerômetro	33
Figura 17. Cadeia de medição para o magnetômetro	34

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	9
2 METODOLOGIA.....	11
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	11
3.1 Classificação de motores elétricos	11
3.2 Características e funcionamento do motor de indução	12
3.2.1 Aspectos construtivos	12
3.2.2 Princípios de funcionamento	14
3.2.3 Aspectos de operação do motor de indução monofásico	15
3.2.4 Partida do motor de indução monofásico	16
3.3 Tipos de falhas em motores de indução	18
3.3.1 Excentricidades no entreferro	18
3.3.2 Falhas nos enrolamentos.....	19
3.3.3 Desalinhamento	20
3.3.3 Desbalanceamentos mecânicos.....	21
3.4 Técnicas de detecção e de diagnósticos de defeitos	21
3.4.1 Análise de vibração.....	21
3.4.2 Análise de campo magnético	22
3.4.3 Análise de temperatura	23
3.4.4 Análise do espectro de corrente.....	24
4 PROPOSTA DE UMA BANCADA DE TESTES PARA DETECÇÃO DE FALHAS EM MOTORES DE INDUÇÃO.....	31
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	35
REFERÊNCIAS.....	37

1 INTRODUÇÃO

Os principais atributos dos motores de indução estão associados à simplicidade de sua construção, à robustez para realizar operações versáteis e ao baixo custo de aquisição e manutenção [1]. No entanto, essas virtudes podem ser comprometidas à medida que os motores são submetidos a esforços e fatores como o tempo e o modo de operação, as condições ambientais e defeitos intrínsecos derivados do processo de fabricação [2]. Nessas condições indesejáveis, uma variedade de falhas pode ocorrer nos motores de indução, resultando em falhas nos enrolamentos, rotor ou estator desbalanceados, barras quebradas do rotor, excentricidades, bem como falhas nos rolamentos [3]. Mediante descrito em [4], a maior probabilidade de falhas nos motores de indução está nos rolamentos, seguida de falhas no estator e, por fim, no rotor. Essas falhas podem causar danos tanto no sistema de alimentação do motor quanto no circuito estator-rotor, independentemente do tipo de falha. Tais falhas podem resultar em tensões e correntes de linha desbalanceadas, aumento do nível de vibração, diminuição do torque médio, elevação das perdas, aquecimento excessivo e, consequentemente, redução do rendimento do motor [5].

A detecção de falhas em motores de indução tem sido objeto de estudo nos últimos anos, com o objetivo de aprimorar a eficiência na identificação de defeitos por meio de algoritmos simples e sensores de baixo custo [6]. Atualmente, equipes de manutenção preditiva contam com excelentes ferramentas para detecção e diagnóstico de falhas mecânicas em motores, destacando-se a análise de vibração, que inclui programas inteligentes, sistemas on-line e alertas de falhas. No entanto, essas tecnologias não conseguem prever quando o motor sairá de operação devido a falhas elétricas, uma vez que não possuem capacidade para esse diagnóstico. Diante dos desafios de detectar e diagnosticar falhas de origem elétrica, muitas equipes de manutenção ainda recorrem a cronogramas de manutenção preventiva e realizam testes tradicionais de baixa eficiência, devido à rápida propagação das falhas elétricas e à grande quantidade de motores a serem diagnosticados [7]. Nesse contexto, há a necessidade de monitoramento constante das condições de operação dos motores, com o objetivo de reduzir danos, evitar paradas não programadas e aumentar a vida útil dos equipamentos. A ampla aplicação da automação, juntamente com a redução de custos proporcionada pelo surgimento e desenvolvimento de interfaces homem-máquina e sistemas SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition), favorece a disseminação desses sistemas de monitoramento de motores elétricos no setor industrial [8].

Concernente a [9], com o propósito de aumentar a eficiência dos motores elétricos e

otimizar os processos produtivos, reduzindo o tempo e os recursos necessários para produzir com qualidade, a Internet das Coisas (IoT) destaca-se como um dos pilares essenciais da Indústria 4.0. A IoT está relacionada à conexão de dispositivos físicos à internet e à comunicação entre eles, possibilitando o monitoramento de equipamentos eletrônicos e a prevenção de situações acidentais, o que promove uma gestão mais controlada. O uso de dispositivos eletrônicos capazes de monitorar em tempo real as condições operacionais dos motores elétricos torna-se, portanto, um aliado fundamental da manutenção preditiva.

Um tipo de bancada para a detecção de falhas em motores elétricos de indução que pode ser empregado utiliza Arduino e IoT para monitorar as condições operacionais dos motores na indústria. O monitoramento em tempo real permite a detecção de falhas, a redução de custos de manutenção e a avaliação do desempenho energético desses motores, tornando-se imprescindível para a prolongação de sua vida útil [10].

2 METODOLOGIA

O problema a ser solucionado envolve o diagnóstico de falhas elétricas e mecânicas em motores de indução monofásicos, que são amplamente utilizados em aplicações domésticas e industriais de pequeno porte. Inicialmente, será realizada uma revisão bibliográfica detalhada, abordando os princípios de funcionamento dos motores de indução, suas características específicas e as falhas mais comuns que ocorrem tanto no âmbito elétrico quanto no mecânico. Serão discutidos aspectos fundamentais da classificação dos motores quanto ao tipo de funcionamento, distinguindo entre motores de corrente contínua (CC) e corrente alternada (CA), com ênfase nos motores de indução monofásicos. Adicionalmente, será explicado o processo de partida desses motores, que, devido à ausência de um campo magnético rotativo inicial, exige técnicas específicas, como o uso de capacitores, relés de partida e outros mecanismos. Os tipos mais comuns de sistemas de partida, como partida com capacitor permanente, serão abordados para contextualizar a operação desse tipo de motor. Esse levantamento bibliográfico incluirá a discussão dos métodos tradicionais e modernos de diagnóstico de falhas, como análise de corrente, vibração e monitoramento de temperatura.

Por fim, será proposta a criação de uma bancada de testes, que contará com tecnologia Arduino para monitorar em tempo real os parâmetros operacionais do motor, como temperatura, vibração e campo magnético, além de utilizar algoritmos de análise em Python. A proposta inclui o uso de sensores de temperatura para identificar sobreaquecimento, acelerômetros para detectar vibrações anormais e magnetômetros para medir desvios no campo magnético, permitindo um diagnóstico preciso e automatizado. Com essa solução, espera-se otimizar a manutenção preventiva e preditiva, reduzindo custos e melhorando a confiabilidade dos equipamentos.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Classificação de motores elétricos

Os tipos de motores elétricos são desenvolvidos em Corrente Contínua e Corrente Alternada. De acordo com [11], as máquinas de corrente contínua permitem a variação da velocidade de zero até a velocidade nominal com a possibilidade de manter o conjugado constante. Essa característica é de grande importância, pois viabiliza o acionamento em diversas aplicações que demandam uma ampla faixa de variação de velocidade com uma regulação e

precisão ótimas. Este tipo de motor, utilizado em aplicações específicas, é frequentemente fabricado sob encomenda, adaptado às características necessárias para o acionamento. O sistema de acionamento por corrente contínua é amplamente empregado em aplicações que requerem alta precisão de velocidade (até 0,01%), especialmente em situações que envolvem sincronismo entre motores. A maioria dos acionamentos CC é realimentada, com um tacogerador acoplado ao eixo do motor CC, que fornece informações sobre a velocidade do motor para melhorar sua regulação de velocidade.

Os motores de corrente contínua também possibilitam a operação em altas rotações. Essas altas rotações são caracterizadas pelo enfraquecimento do campo, que consiste no aumento da rotação pela redução do fluxo magnético e, conseqüentemente, pela diminuição do torque [11].

Francisco [12] afirma, nos motores em corrente contínua, tanto o estator quanto o rotor requerem alimentação elétrica, enquanto nos motores de indução, apenas o estator é alimentado, e o rotor recebe energia por indução. Por essa razão, esses motores são denominados motores de indução. As máquinas rotativas em corrente alternada são categorizadas em dois grupos: máquinas síncronas e assíncronas. Uma máquina é considerada síncrona quando opera à velocidade de sincronismo, enquanto uma máquina é considerada assíncrona quando sua velocidade difere da velocidade de sincronismo.

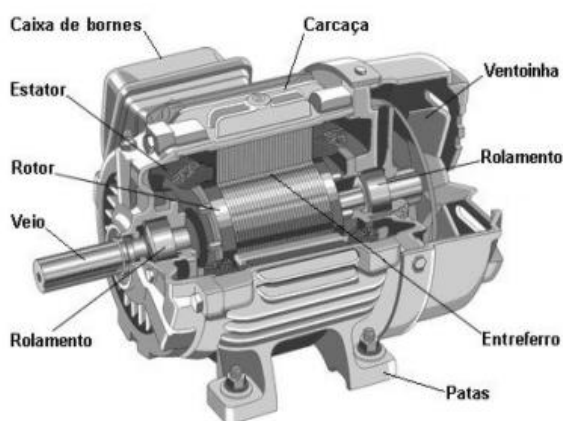
Ambos os tipos de máquinas podem funcionar como motores ou geradores. No caso das máquinas síncronas, temos o motor síncrono, bem como o gerador síncrono ou alternador. Por outro lado, a utilização da máquina assíncrona como gerador é pouco comum; sua principal aplicação é como motor assíncrono. Esses tipos de máquinas podem operar em instalações monofásicas, trifásicas ou polifásicas [12].

3.2 Características e funcionamento do motor de indução

3.2.1 Aspectos construtivos

Conforme a Figura 1, os motores de indução são compostos pelos seguintes elementos:

Figura 1. Elementos de um motor de indução



Fonte: (FRANCISCO, 2006)

Mediante Francisco [12], o estator parte fixa da máquina, é composto por chapas ferromagnéticas empilhadas e isoladas entre si. Estas chapas apresentam cavidades onde os enrolamentos são alocados, sendo alimentados pela rede de corrente alternada monofásica ou trifásica. O conjunto é inserido no interior de uma carcaça em ferro, aço ou alumínio.

O rotor, parte móvel da máquina, é composto por um núcleo ferromagnético laminado, sobre o qual estão dispostos enrolamentos. Existem dois tipos de motores: o motor de rotor bobinado, e o motor de rotor em curto-circuito, também conhecido como rotor em gaiola de esquilo. O rotor é apoiado pelo eixo de rotação do motor, que possui rolamentos em suas extremidades e transmite à carga para energia mecânica produzida [12].

Entre o rotor e o estator, encontra-se o entreferro, cuja dimensão deve ser minimizada para reduzir a relutância magnética total do circuito, aumentando assim a indução e consequentemente o fluxo. Isso ocorre porque o ar é consideravelmente menos permeável do que o ferro [12].

De acordo com Francisco [12], o rotor é composto por condutores paralelos inseridos nas ranhuras das chapas laminadas e conectados por anéis condutores nos topos, formando assim uma configuração semelhante a uma gaiola de esquilo. Em motores de maior potência, os condutores nas ranhuras do rotor são feitos de barras de cobre, alumínio ou ligas similares. É importante notar que as barras condutoras da gaiola são frequentemente posicionadas com uma certa inclinação para melhorar as propriedades de partida e diminuição dos ruídos.

Em motores menores, às vezes o rotor não possui ranhuras e é completamente feito de metal condutor. Um motor com rotor em curto-circuito é alimentado por uma única fonte de energia, eliminando a necessidade de coletores e escovas e, portanto, não apresenta contatos elétricos móveis. Resultando em um motor robusto e praticamente livre de manutenção [12].

O motor de rotor bobinado é comumente utilizado em aplicações de alta potência, sendo

empregado para iniciar cargas com considerável resistência de torque e grande inércia. Sua funcionalidade permite a realização de arranques suaves e progressivos mediante o uso de resistências, conhecidas como resistências rotóricas, as quais são conectadas por meio de escovas e anéis coletores. Durante o processo de inicialização, essas resistências são gradualmente removidas até que o motor alcance sua velocidade nominal. Essa abordagem possibilita um controle progressivo do torque durante o arranque [12].

Francisco [12] afirma, apesar dessa vantagem, em termos das mesmas especificações, o motor de rotor bobinado é consideravelmente mais custoso financeiramente e menos eficiente do que o motor de rotor gaiola de esquilo. Por esse motivo, este tipo de motor é empregado apenas quando o motor de gaiola de esquilo não consegue fornecer o torque de arranque desejado.

3.2.2 Princípios de funcionamento

Francisco [12] ratifica, no motor assíncrono, o estator é constituído por conjuntos de enrolamentos dispostos de maneira que entre eles haja um ângulo de 120°. Esses enrolamentos, quando percorridos pela corrente da rede de distribuição pública, formam um campo magnético girante:

- Este campo, ao atravessar o rotor, ocasiona uma variação de fluxo nos condutores da gaiola de esquilo ou do rotor bobinado, resultando, de acordo com a lei de Faraday, em uma força eletromotriz induzida (e) nesses condutores, conforme pode ser visto através da Equação 1;

$$e = \frac{d\phi}{dt} \quad (1)$$

- Como os condutores do rotor, tanto no rotor gaiola de esquilo quanto no rotor bobinado, estão em circuito fechado, os tais são percorridos por correntes induzidas;
- As correntes induzidas, de acordo com a lei de Lenz, têm um sentido tal que, por meio de suas ações magnéticas, tendem a opor-se à causa que lhes deu origem.

No rotor, a cada momento, é gerado um campo magnético que tende a se opor ao campo magnético girante do estator, contribuindo para manter o sistema em equilíbrio. Para essa oposição ocorrer, os dois campos devem possuir polos contrários [12].

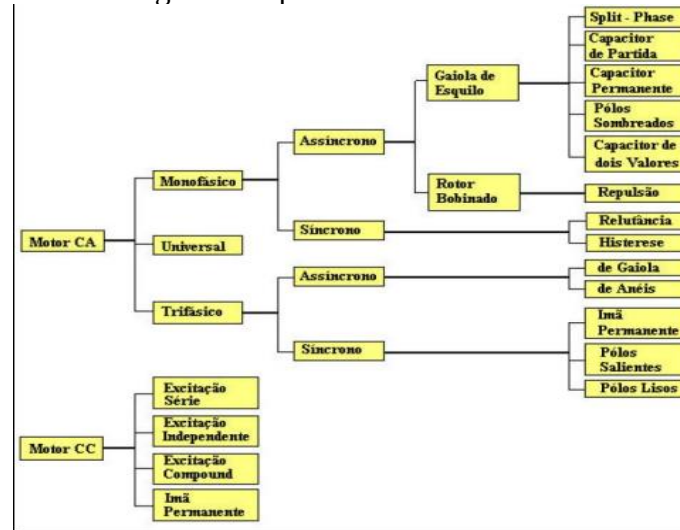
- Uma vez que o campo do estator é girante e considerando que polos de cargas opostas se atraem, o rotor é induzido a entrar em movimento, tentando acompanhar o campo girante. Conforme estabelecido pela lei de Laplace, um condutor percorrido por

corrente e imerso em um campo magnético fica sujeito a uma força eletromagnética, mediante, pode ser visualizado na Equação 2.

$$F = Bl \sin(\alpha) \quad (2)$$

Conforme Francisco [12], como pode ser constatado, os princípios de funcionamento do motor de indução fundamentam-se em leis fundamentais do eletromagnetismo: lei de Faraday, lei de Lenz e lei de Laplace. Na Figura 2, podem ser visto os tipos de motores elétricos.

Figura 2. Tipos de motores elétrico



Fonte: (CORTÊS, 2010)

3.2.3 Aspectos de operação do motor de indução monofásico

Amaral [13] ratifica, os motores de indução representam elementos críticos em diversos processos industriais devido à sua robustez e confiabilidade. A realização de diagnósticos online de falhas nessas máquinas assume uma importância significativa, visando assegurar uma operação segura, reduzir os custos substanciais associados à manutenção e evitar perdas decorrentes de interrupções no lucro. Em decorrência disso, têm sido amplamente investigadas ao longo das últimas décadas, técnicas voltadas para o monitoramento da condição operacional desses motores. O monitoramento da condição operacional consiste na avaliação contínua da saúde do motor ao longo de todo o seu ciclo de vida.

Existem diversos métodos disponíveis para o monitoramento da condição operacional de máquinas elétricas, entre os quais se destacam o monitoramento de vibrações, temperatura, fluxo magnético, torque e posição do rotor. É comum encontrar grandes máquinas elétricas equipadas com uma variedade de sensores, como sensores mecânicos, indutivos, térmicos e capacitivos. No entanto, esses dispositivos sensoriais são caracterizados por sua sensibilidade, custo elevado e desafios associados à instalação ou integração à estrutura da máquina, o que

limita sua utilização, principalmente em máquinas de grande porte. Nesse contexto, a substituição desses sensores custosos por alternativas mais acessíveis e confiáveis representaria uma vantagem significativa [13].

Amaral [13] declara, o monitoramento da condição operacional de motores por meio de grandezas elétricas é um método relativamente novo e ainda não disponível comercialmente. No entanto, tem sido objeto de investigação por diversos pesquisadores devido aos seus benefícios significativos. A medição de grandezas elétricas utilizando sensores mais acessíveis é consideravelmente mais viável em comparação com a medição de grandezas mecânicas. Além disso, uma vantagem adicional desses métodos é a capacidade de monitorar tanto parâmetros elétricos quanto mecânicos em uma única unidade de monitoramento.

3.2.4 Partida do motor de indução monofásico

Conforme definido por Umans [14], os motores de indução monofásicos são categorizados com base em seus métodos de partida, geralmente designados por termos que descrevem esses métodos. A escolha do motor apropriado é fundamentada nas demandas de torque de partida e de operação da carga, no ciclo de trabalho da carga e nas restrições das correntes de partida e operação impostas ao motor pela fonte de alimentação elétrica. O custo dos motores monofásicos aumenta proporcionalmente à sua potência e às características de desempenho, como a relação entre torque de partida e corrente. Tipicamente, para minimizar despesas, um engenheiro de aplicação optará pelo motor com as especificações mínimas de potência e desempenho capazes de satisfazer os requisitos da aplicação. Em situações em que múltiplos motores são necessários para uma finalidade específica, pode ser viável projetar um motor especial para otimizar custos. No segmento de motores de potência fracionária, mesmo com pequenas discrepâncias de custo têm sua relevância significativa.

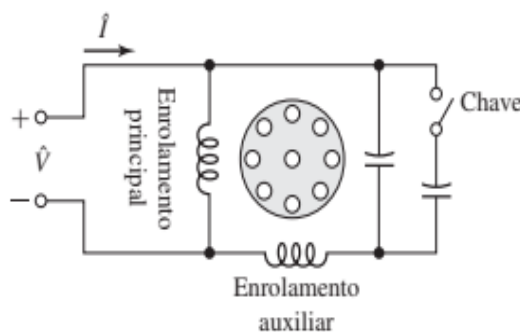
Para Umans [14], capacitores podem ser empregados para aprimorar tanto o desempenho de partida quanto o funcionamento contínuo de um motor, dependendo do tamanho e da configuração do capacitor. Um motor que utiliza partida com capacitor é também conhecido como motor de fase dividida, no qual o deslocamento de fase temporal entre as duas correntes é alcançado através de um capacitor em série com o enrolamento auxiliar. Após a partida do motor, o enrolamento auxiliar é desconectado, permitindo que o capacitor e o enrolamento auxiliar sejam projetados para operação intermitente com custo mínimo.

Mediante Umans [14], a utilização de um capacitor de partida com um valor apropriado

possibilita que a corrente no enrolamento auxiliar, quando o rotor está parado, se adianta em relação à corrente no enrolamento principal em cerca de 90 graus elétricos, similar ao que ocorre em um motor bifásico equilibrado. Na prática, o ponto ótimo entre torque de partida, corrente de partida e custo geralmente é alcançado com um ângulo de fase relativamente inferior a 90°. Uma característica distintiva é a relação entre torque e velocidade, evidenciando um alto torque de partida. Tais motores são empregados em aplicações como compressores, bombas, sistemas de refrigeração, ar-condicionado e outras cargas que demandam partida difícil.

Umans afirma [14], ao empregar dois capacitores, um para partida e outro para operação contínua, é possível alcançar teoricamente desempenhos ideais tanto na partida quanto durante o funcionamento do motor. Uma abordagem para atingir isso é utilizar um capacitor de baixa capacitância, necessário para condições ideais de operação contínua, que é conectado permanentemente em série com o enrolamento auxiliar. Enquanto um valor significativamente mais elevado de capacitância, necessário para a partida, é alcançado através de um capacitor ligado em paralelo com o capacitor de operação contínua, utilizando uma chave que se abre quando o motor atinge a velocidade de operação. Este tipo de motor é comumente conhecido como motor com capacitores de partida e operação contínua. Abaixo pode ser visualizado através da Figura 3, tal configuração.

Figura 3. Motor com partida a capacitor

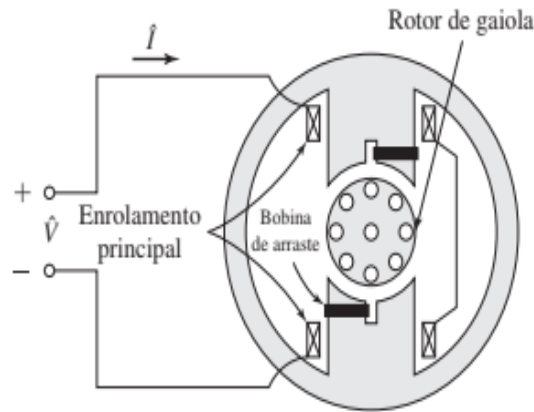


Fonte: (UMANS, 2014)

De acordo com Umans [14], o motor de indução de polos sombreados geralmente apresenta polos salientes, nos quais uma parte de cada polo é envolvida por uma espira de cobre em curto-circuito, conhecida como bobina de arraste ou sombreamento. As correntes induzidas na bobina de arraste causam um atraso no fluxo magnético na parte sombreada do polo em relação ao fluxo na outra parte. Isso resulta em um campo magnético girante que se desloca da porção não sombreada para a porção sombreada do polo, induzindo correntes no rotor de gaiola e gerando um baixo torque de partida. Apesar de seu rendimento ser reduzido, os motores de

polos sombreados são considerados os mais econômicos dentre os motores de potência fracionária. Podem ser encontrados em potências nominais de até cerca de 50 W. Na figura 4, sua composição pode ser visualizada.

Figura 4. Composição do motor de polos sombreados



Fonte: (UMANS, 2014)

3.3 Tipos de falhas em motores de indução

De acordo com Bloch [15], a falha pode ser definida como qualquer alteração em uma parte ou componente da máquina que a incapacita de desempenhar sua função de maneira satisfatória, levando essa parte ou componente a uma condição de instabilidade ou insegurança para continuar em operação.

Mediante Ribeiro [16], os motores de indução, embora sejam notavelmente robustos, ainda são suscetíveis a falhas, assim como qualquer outro equipamento industrial. Essas falhas podem ter origem tanto mecânica quanto elétrica. Alguns exemplos de falhas de origem elétrica em motores de indução são:

- a) Excentricidades no entreferro;
- b) Falhas nos enrolamentos;
- c) Desalinhamento;
- d) Desbalanceamentos mecânicos.

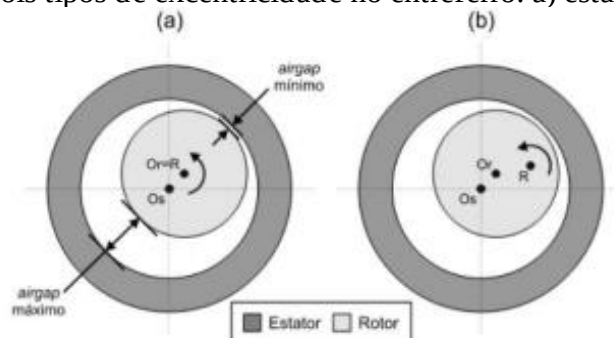
Em resumo, os tipos de falhas nos motores abrangem desde questões operacionais até sobrecargas, desgaste natural e vibração. Na maioria dos casos, essas falhas são localizadas nos estatores, rotores e rolamentos [16].

3.3.1 Excentricidades no entreferro

De acordo com Araújo [17], caso as excentricidades no entreferro, ou seja, a presença

de irregularidades no campo girante entre o rotor e o estator, sejam negligenciadas, a máquina pode sofrer sérios danos. Esse tipo de falha frequente é independente do tipo de rotor utilizado, ocorrendo quando há uma diferença substancial de tamanho entre duas regiões distintas no entreferro ou airgap do motor. Na Figura 5, as duas regiões estão representadas, e torna-se evidente que, em uma situação de excentricidade, os eixos geométricos do estator e do rotor deixam de ser coincidentes (pontos O_r e O_s).

Figura 5. Dois tipos de excentricidade no entreferro: a) estática b) dinâmica



Fonte: (ARAÚJO, 2015)

Concernente a Silva [18], na Figura 5 (a) esse tipo de excentricidade é caracterizado por um desalinhamento oval do estator, com a posição do airgap mínimo permanecendo invariável. A manifestação dessa irregularidade resulta em um desequilíbrio das forças radiais, passagem de corrente elétrica através dos rolamentos, ruído e aumento da vibração, provocado por uma frequência igual ao dobro da frequência de rede (100 Hz). A amplitude da vibração aumenta com a carga e se anula quando a alimentação do motor é desligada [19]. As causas mais comuns desse tipo de excentricidade incluem imperfeições no processo de manufatura, rotor e eixo não concêntricos, núcleo do estator oval e empeno térmico do rotor [18].

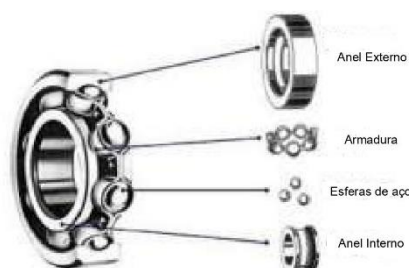
Araújo [17] afirma que, na situação apresentada em (b) a posição do airgap mínimo gira juntamente com o rotor. Caso o rotor não seja perfeitamente uniforme, em velocidades baixas, pode surgir uma frequência resultante de deslizamento. Esse fenômeno ocorre devido a vários fatores, como um veio de motor curvado, sistema trifásico desequilibrado, rolamentos danificados, ou a existência de algum apoio do motor mal apertado ou empenado, o que causa a deformação do estator e uma distribuição assimétrica do entreferro [20].

3.3.2 Falhas nos enrolamentos

Mediante a Siddiqui [21], os rolamentos de uma máquina de indução apresentam diversas configurações possíveis. De forma generalizada, são constituídos por dois anéis, um

externo e outro interno, além de um conjunto de esferas ou cilindros metálicos fixos em uma armadura lubrificada, conforme ilustrado na Figura 6.

Figura 6. Rolamento de esferas



Fonte: (ARAÚJO (adaptado), 2015)

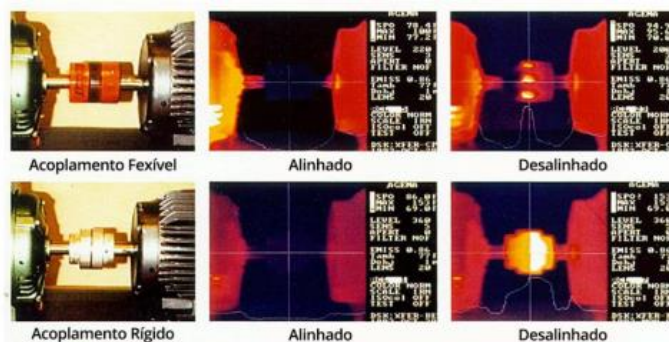
Por meio de Ponci [22], as falhas nos rolamentos podem ser diagnosticadas por meio de análises de vibração, nas quais são detectados componentes com frequências características de defeitos e suas harmônicas. O prognóstico de falha não se baseia apenas na intensidade dessas componentes, mas também no padrão de distribuição de energia pelas diversas bandas no espectro de frequência, o que possibilita a identificação do estado de degradação do rolamento.

De acordo com Araújo [17], as mais decorrentes falhas nos rolamentos podem ser classificadas conforme a localização da falha em seus componentes (anel interno, esfera rolante, gaiola ou anel externo) e de acordo com o tipo de defeito (localizado ou distribuído).

3.3.3 Desalinhamento

Por meio de Pedro et al. [10], o desalinhamento ocorre quando o eixo de acionamento do motor não está alinhado com a carga ou componente que o conecta à carga. Um eixo mal alinhado pode transmitir forças prejudiciais do eixo para o motor, além de gerar vibrações axiais e radiais no sistema, substituição prematura de rolamentos, vedações, acoplamento, aumento da temperatura da carcaça próximo aos rolamentos, vazamento de óleo na vedação dos mancais, alta temperatura do óleo e parafusos de fixação frouxos. Dessa forma, o desalinhamento resulta em perda de energia, reduzindo a eficiência do motor. A Figura 7 ilustra exemplos de motores desalinhados.

Figura 7. Desalinhamentos gerados em motores a indução



Fonte: (PEDRO ET AL., 2021)

3.3.3 Desbalanceamentos mecânicos

A ocorrência dessa falha ocorre quando uma parte giratória está fora do eixo de rotação, gerando um ponto de desequilíbrio no rotor. Por se tratar de uma falha cuja eliminação total não é possível, é necessário identificar alguns fatores fora do normal. O desbalanceamento pode ocorrer devido ao acúmulo de sujeira, ausência de pesos de balanceamento, defeitos de fabricação e fatores relacionados ao desgaste do enrolamento do motor, que geram massas irregulares. Um analisador de vibração pode ser utilizado para verificar se o motor está em equilíbrio, evitando, assim, o desgaste prematuro de componentes de transmissão mecânica e paradas inesperadas [10].

3.4 Técnicas de detecção e de diagnósticos de defeitos

Concernente a Pinheiro [8], diversos métodos têm sido desenvolvidos com o intuito de detectar falhas nos motores de indução, abrangendo diferentes áreas da ciência e tecnologia. Entre esses métodos, destacam-se os seguintes:

- a) Monitoramento por vibração;
- b) Monitoramento do campo magnético;
- c) Monitoramento por temperatura;
- d) Monitoramento do espectro de corrente.

3.4.1 Análise de vibração

As máquinas consistem em elementos mecânicos complexos e articulados. As peças que sofrem excitação podem oscilar, e essas oscilações se transmitem pelas articulações aos demais elementos acoplados. O resultado é um complexo de frequências que caracteriza o sistema.

Quando uma peça altera suas características mecânicas devido a desgaste ou trinca, uma componente de frequência do sistema será modificada. Se houver alteração no acoplamento entre as peças, o coeficiente de transmissão do sinal entre elas também será alterado, resultando na mudança da forma de frequência global do sistema [8].

Concernente a Pinheiro [8], modificações ou surgimento de novas frequências podem ocorrer devido a folgas, defeitos ou desalinhamentos de rolamentos ou mancais em máquinas rotativas. O desbalanceamento do rotor é transmitido através do rolamento.

A premissa fundamental da análise de vibração como técnica aplicada à manutenção industrial é que cada componente ou tipo de deficiência mecânica de uma máquina em operação produz uma vibração de frequência específica que, em condições normais de funcionamento, atinja uma amplitude máxima determinada [20]. Por meio de Pinheiro [8], desta forma, é possível, medindo e analisando a vibração, estabelecer sua origem, identificando cada componente da máquina e o tipo de falha que a está gerando, além de avaliar o estado mecânico do componente que a produz ou a gravidade da deficiência observada previamente.

Mediante Marçal [20], o método de análise de frequências, fundamentado no Teorema de Fourier, determina que qualquer função periódica pode ser decomposta em uma série de ondas senoidais puras com frequências distintas e múltiplas harmônicas da frequência fundamental. Essas componentes formam o espectro de frequência da vibração. A utilização de acelerômetros, permite a aquisição desse parâmetro e sua posterior análise, possibilitando a construção do espectro de vibração de um sistema. Ao observar a amplitude dos picos em determinadas frequências e relacionar essas amplitudes com a frequência fundamental do sistema rotativo, é possível diagnosticar o estado de funcionamento ou identificar alterações em curso no sistema.

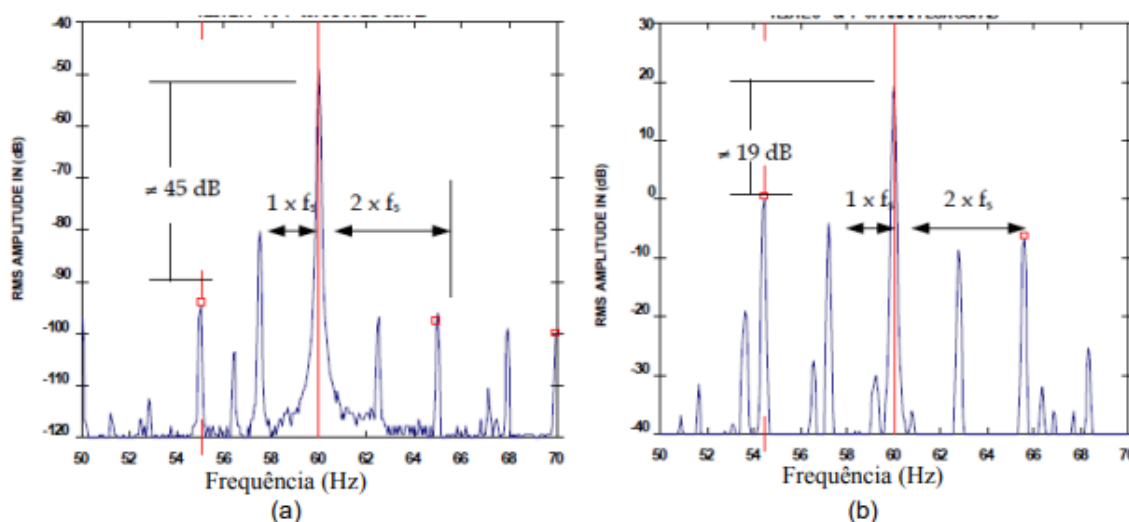
3.4.2 Análise de campo magnético

De acordo com Pinheiro [8], o diagnóstico de defeitos a partir da análise de fluxo magnético tem sido proposto por fabricantes de equipamentos na área de monitoramento de máquinas. Para isso, é necessária a instalação de um sensor comercial e de uma bobina de fluxo no motor. No entanto, essa técnica tem recebido pouca atenção dos pesquisadores em estudos aprofundados. Em estudos preliminares já realizados, foram constatadas algumas vantagens em relação às técnicas convencionais de análise de corrente, como a dispensação do conhecimento da carga do motor e do número de barras e ranhuras para a detecção de curto-circuito entre espiras.

Por definição, os motores elétricos produzem fluxo magnético, e qualquer desequilíbrio nesse fluxo é transmitido axialmente. As principais causas da alteração nas características de simetria incluem: ruptura de barras do rotor, desequilíbrio de fases e anomalias nos enrolamentos do estator, tais como curtos entre espiras e curtos entre fases [8].

A análise dos espectros de fluxo magnético é conduzida mediante a observação das tendências de parâmetros específicos associados a cada tipo de falha. A inspeção das faixas espectrais em baixa frequência fornece informações sobre a condição do rotor, enquanto em altas frequências possibilita-se avaliar as condições do estator. A Figura 8 exemplifica o espectro de fluxo para um motor em bom estado de funcionamento e para outro com barras quebradas [8].

Figura 8. Espectro de fluxo (bobina de fluxo (a) motor saudável; (b) motor com 7 barras quebradas



Fonte: (PINHEIRO, 2011)

3.4.3 Análise de temperatura

Por meio de Maciel [23], é importante salientar que as falhas ocorridas nos motores de indução são causadas pelos mancais (40% em sua totalidade) diretamente influenciadas pela temperatura de serviço das máquinas. A estabilidade dimensional de um rolamento é instigada, além de outros fatores, pelo desempenho do lubrificante utilizado e pela faixa de temperatura adequada de serviço do rolamento. Acima de 125 °C, o material do rolamento pode sofrer alterações dimensionais, ou seja, deformações permanentes.

A WEG, em seu catálogo geral, recomenda que a temperatura do rolamento não ultrapasse o acréscimo de 60 °C em um ambiente de 40 °C, ou seja, 100 °C.

A temperatura de operação (TS) é um fator crucial para determinar as perdas dos

motores de indução e está diretamente relacionada à previsão de vida útil do isolamento do estator e, conseqüentemente, da máquina como um todo. A temperatura de operação depende da temperatura ambiente (TA) e de fatores ligados às perdas e à capacidade de resfriamento [23].

Segundo WEG [24], é difícil determinar com precisão a temperatura do enrolamento utilizando termômetros ou termopares, pois a temperatura varia de um ponto a outro nos condutores situados no núcleo do estator sendo impreciso afirmar se o ponto de medição está próximo do ponto de maior temperatura. Além disso, qualquer sensor de temperatura deve estar adequadamente isolado do condutor estator, e este fator, mesmo para um equipamento de baixa tensão (classe de isolamento para 1 kV), gera um gradiente de temperatura. O método mais indicado e confiável para medir e avaliar a temperatura média de serviço do enrolamento estator do motor, ou simplesmente, temperatura de serviço (TS), é por meio da avaliação da variação no valor da resistência ôhmica desse enrolamento.

Com relação às perdas (I^2R) no estator, é necessário estimar adequadamente a temperatura de funcionamento do referido enrolamento. A TS é influenciada diretamente pela temperatura ambiente nas proximidades da máquina e pelas condições de arrefecimento da máquina [23].

Dentro deste contexto, a NBR 5383 [25] afirma que a determinação da TS do enrolamento do estator pode ser realizada através de vários procedimentos, sendo o mais indicado o método da avaliação da variação da resistência ôhmica do estator, que determina indiretamente a temperatura de serviço do enrolamento por meio da aplicação da Equação 3.

$$TS = \frac{RS}{RA}(MC + TA) - MC \quad (3)$$

Onde:

- TS: temperatura de serviço estimada para o enrolamento do estator;
- RS: resistência do estator medida na temperatura de serviço em Ω ;
- RA: resistência do estator medida na temperatura ambiente em Ω ;
- MC: constante de proporcionalidade do condutor (para o cobre $MC = 234,5$);
- TA: temperatura ambiente em graus centígrados (quando não tem medição, adota-se 25 °C).

3.4.4 Análise do espectro de corrente

A Análise da Assinatura da Corrente do Motor (AACM) é uma técnica empregada para avaliar a condição operacional de um motor de indução durante o seu funcionamento, por meio

do monitoramento de grandezas elétricas. A AACM tem a capacidade de detectar falhas em estágios iniciais, prevenindo danos significativos e até mesmo a falha completa do motor. Esta abordagem se baseia no acompanhamento da corrente do motor de indução, o que a torna mais econômica em comparação com outras técnicas que dependem de sensores e equipamentos especializados. A AACM utiliza o espectro da corrente do motor para identificar frequências associadas a falhas ou defeitos. Quando uma falha está presente, o espectro de frequência da corrente apresenta características distintas em comparação com um motor sem defeitos. Métodos fundamentados na AACM são aplicados para diagnosticar falhas comuns em motores de indução, como interrupções ou quebras nos barramentos, curto-circuitos entre espiras, desalinhamento do rotor ou entreferro, e falhas nos rolamentos, entre outros defeitos [13].

De acordo com Cameron [26], dois métodos têm sido empregados para a detecção de excentricidades. O primeiro método consiste em monitorar o comportamento da corrente nas bandas laterais das frequências de ranhura (Principal Slot Harmonic – PSH), como pode ser visto na Equação 4.

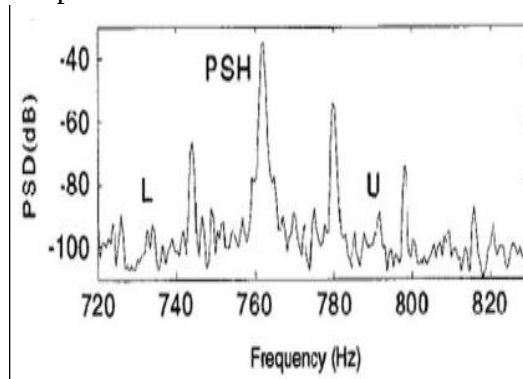
$$fecc, hf = fs \left[(kR \pm nd) \left(\frac{1-s}{p} \right) \pm v \right] \quad (4)$$

Onde:

- fecc, hf: frequências associadas com a excentricidade;
- fs: frequência de alimentação;
- k: 0,1,2,3...;
- R: número de ranhuras do motor;
- nd: 0,1,2,3...;
- s: escorregamento por unidade;
- p: número de pares de pólo;
- v: 1,3,5....

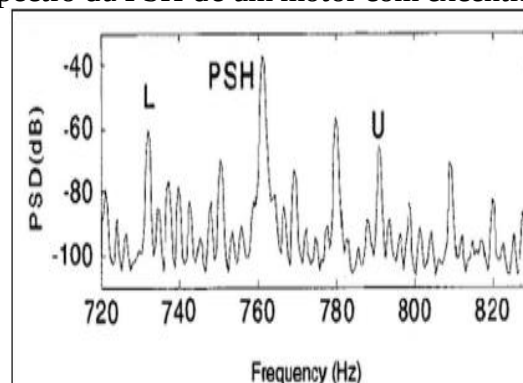
Concernente a Amaral [13], em geral, essa equação pode ser utilizada para prever o conteúdo espectral do sinal de corrente. A equação possui três índices, resultando em três conjuntos de harmônicas: k está relacionado ao rotor, v ao estator e nd à excentricidade. Para excentricidade estática, $nd = 0$, e para excentricidade dinâmica, $nd = 1, 2, 3...$. Consequentemente, serão apresentadas as Figuras 9 e 10, que mostrarão um espectro sem falha e um espectro com excentricidade elevada, respectivamente.

Figura 9. Espectro da PSH de um motor sem falha/defeito



Fonte: (AMARAL, 2017)

Figura 10. Espectro da PSH de um motor com excentricidade elevada



Fonte: (AMARAL, 2017)

Mediante a Benbouzid [27], embora este esquema tenha a vantagem de separar os componentes espectrais produzidos pela excentricidade daqueles causados por barramentos interrompidos, que são outro tipo de defeito em motores de indução, expressa a desvantagem de requerer um conhecimento detalhado dos aspectos construtivos da máquina, como o número de ranhuras no rotor.

O segundo método consiste no monitoramento do comportamento da corrente nas bandas laterais da frequência de alimentação (Figuras 11 e 12), de acordo com a Equação 5 [28].

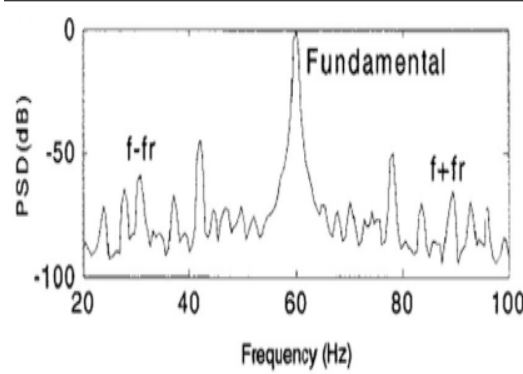
$$f_{ecc}, LF = fs \left[1 \pm k \left(\frac{1-s}{p} \right) \right] = fs \pm kfr \quad (5)$$

Onde:

- f_{ecc}, LF : frequências associadas com a excentricidade;
- fs : frequência de alimentação;
- k : 1,2,3,...;
- s : escorregamento por unidade;
- p : número de pares de pólo;

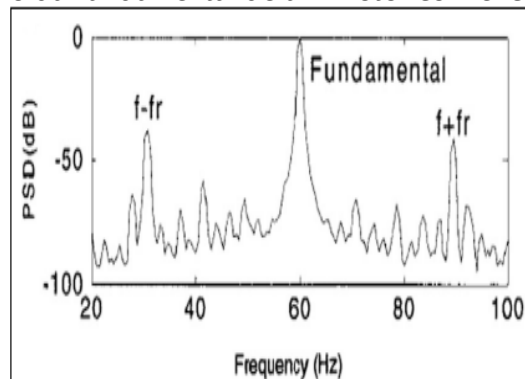
- f_r : frequência de rotação do rotor.

Figura 11. Espectro da fundamental de um motor sem falha/defeito



Fonte: (AMARAL, 2017)

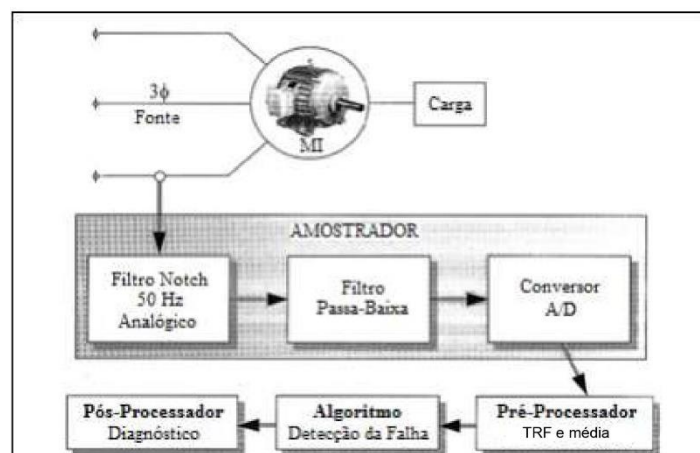
Figura 12. Espectro da fundamental de um motor com excentricidade elevada



Fonte: (AMARAL, 2017)

Amaral [13] afirma, as técnicas de monitoramento da corrente envolvem vários estágios. A Figura 13 exibe um diagrama de blocos que ilustra esses estágios.

Figura 13. Diagrama de blocos de um esquema de monitoramento da corrente do estator



Fonte: (AMARAL (adaptado), 2017)

Na etapa denominada de pré-processamento, o sinal adquirido é manipulado para extrair informações essenciais visando detectar falhas no motor. Diversas técnicas de processamento de sinal são empregadas para essa finalidade, com destaque para a análise do grau de excentricidade do rotor/entreferro, sendo as mais comuns a FFT, a STFT e a WT [13].

Mediante Lathi [29], a transformada de Fourier é uma operação matemática utilizada para converter um sinal do domínio do tempo para o domínio da frequência e vice-versa, partindo do pressuposto de que qualquer sinal pode ser representado como a soma ponderada de funções trigonométricas. A Equação 6 descreve essa ferramenta matemática no contexto contínuo do tempo.

$$X(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) e^{-j\omega t} dt \quad (6)$$

Onde:

- $X(\omega)$: sinal no domínio da frequência;
- $x(t)$: sinal no domínio do tempo;
- j : representação do número imaginário;
- ω : frequência em rad/s;
- t : tempo.

Concernente a Lathi [29], no domínio do tempo discreto, essa operação recebe o nome de Transformada Discreta de Fourier (DFT - Discrete Fourier Transform) a qual é apresentada na Equação 7. Nesse contexto, o sinal é obtido a uma frequência específica de amostragem, resultando em $x(n)$.

$$X(\Omega) = \sum_{-\infty}^{+\infty} x(n) e^{-j\Omega n} \quad (7)$$

Onde:

- $X(\Omega)$: sinal no domínio da frequência;
- $x(n)$: sinal no domínio do tempo;
- j : representação do número imaginário;
- Ω : frequência em rad;
- t : tempo discreto.

Embora a Transformada Discreta de Fourier (TDF) seja o procedimento matemático mais direto para determinar o conteúdo espectral de uma sequência no domínio do tempo, ela apresenta ineficiências. Em 1965, foi publicado um artigo por Cooley e Tukey [30] que descreve um algoritmo altamente eficiente para a implementação da TDF. Esse algoritmo, modificado, é conhecido como Transformada Rápida de Fourier (TRF). A TRF é uma forma computacionalmente eficiente de calcular a TDF, aproveitando a periodicidade dos senos

multiplicados durante as transformadas, o que reduz drasticamente o número de cálculos necessários. Em cada etapa do processamento, os resultados da etapa anterior são combinados de maneira específica. Finalmente, a TRF calcula a TDF para cada conjunto de dados. O algoritmo da TRF pode ser aplicado para detectar diversos tipos de falhas em motores [13].

Amaral [13] afirma que, o trabalho de Fourier foca no desenvolvimento e na análise de soluções para funções infinitas cujas propriedades estatísticas não se alteram. Sinais estacionários apresentam esse comportamento em regime permanente.

Mediante Amaral [13], sinais adquiridos, por outro lado, raramente possuem tais propriedades devido às características do processo de aquisição e do fenômeno observado. Portanto, a aplicação da análise de Fourier a sinais adquiridos pode resultar em erros não considerados no trabalho de Fourier. Em outras palavras, a não-idealidade da análise de Fourier para sinais não estacionários é a origem dessas fontes de incerteza. Por esses motivos, foram desenvolvidas várias ferramentas para melhorar a estimativa de componentes de frequência, localizadas tanto no domínio da frequência quanto no domínio do tempo. Um exemplo de ferramenta de análise no domínio tempo-frequência é a Transformada de Fourier de Tempo Curto (STFT).

A Short-Term Fourier Transform (STFT) ou Windowed Fourier Transform, referida neste trabalho como Transformada de Fourier de Tempo Curto (TFTC), é uma transformada utilizada para determinar a frequência senoidal e o conteúdo de fase de seções locais de um sinal cujo espectro varia ao longo do tempo. Na prática, o procedimento para calcular a TFTC consiste em dividir um sinal de longa duração em segmentos mais curtos de igual comprimento e, em seguida, calcular a Transformada de Fourier separadamente para cada segmento [31]. Após o cálculo do espectro de cada segmento, as mudanças no espectro são geralmente traçadas como uma função do tempo [13].

Allen [32] evidencia que, do ponto de vista matemático, o método consiste em multiplicar a função a ser transformada por uma Função Janela que é não nula apenas por um curto período. A Transformada de Fourier do sinal resultante é calculada à medida que a janela é deslocada ao longo do eixo do tempo, resultando em uma representação bidimensional do sinal. Isso pode ser expresso, no tempo contínuo, como pode ser visto na Equação 8.

$$X(\omega, \tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)w(t - \tau)e^{-j\omega t} dt \quad (8)$$

Onde:

- $X(\omega, \tau)$: sinal no domínio da frequência;
- $x(t)$: sinal no domínio do tempo;

- $w(t - \tau)$: função janela;
- τ : index para deslocamento da função janela no eixo do tempo;
- j : representação do número imaginário;
- ω : frequência em rad/s;
- t : tempo.

A principal vantagem da análise espectral dependente do tempo é a capacidade de identificar padrões de mudança nas frequências, que geralmente refletem a natureza do sinal. Com a identificação desse padrão, é possível também identificar falhas associadas a esse determinado padrão. Outra característica importante da análise de frequência dependente do tempo é a capacidade de filtrar uma determinada componente de frequência usando um filtro com características variáveis ao longo do tempo [33].

Concernente a Amaral [13], a Wavelet Transform (WT), assim como a TFTC, é uma ferramenta de análise de domínio tempo-frequência. No entanto, enquanto a TFTC possui como limitação a resolução fixa no domínio tempo-frequência, com componentes de alta frequência analisados com a mesma resolução que componentes de baixa frequência, a TW permite que os dados sejam processados em diferentes resoluções. Ao observar um sinal através de uma grande "janela", é possível notar características mais globais do sinal. Da mesma forma, ao observar o sinal através de uma pequena "janela", é possível identificar características mais detalhadas. O resultado da análise Wavelet é a capacidade de ver tanto a visão geral quanto os detalhes do sinal [34]. A Wavelet Transform (WT), referida no presente trabalho como Transformada Wavelet (TW), difere de outros métodos de processamento de sinal, por estar localizada tanto no domínio da frequência quanto no domínio do tempo, uma vez que os wavelets possuem duração limitada no tempo e largura de banda limitada na frequência.

A WT representa um sinal com um número reduzido de coeficientes, superando as limitações da TRF e da TFTC ao fornecer um tamanho de janela variável. A TW é amplamente aceita no processamento de sinais e na compressão de imagem devido à sua natureza de multi-resolução. A TW decompõe um sinal em um conjunto de funções de base, denominadas wavelets, que são derivadas de um único protótipo chamado Mother Wavelet, por meio de dilatações e deslocamentos. A TW é calculada separadamente para diferentes segmentos do sinal no domínio do tempo e em diferentes frequências. Coeficientes de wavelet, no primeiro nível de decomposição, são obtidos pela aplicação de uma mother wavelet ao sinal em análise, e o processo pode ser repetido por meio de dimensionamento e translação da mother wavelet [35].

Graps [34] evidencia que, a forma geral de uma função wavelet é definida pela Equação 9. Aonde uma função Ψ , denominada mother wavelet, é escalonada e deslocada no tempo.

$$\Psi_{t_0,s}(t) = \frac{1}{\sqrt{s}} \Psi\left(\frac{t-t_0}{s}\right) \quad (9)$$

Onde:

- $\Psi_{t_o,s}(t)$: função wavelet;
- Ψ : mother wavelet;
- t_o : instante de tempo de interesse;
- S : escala utilizada;
- t : tempo.

A Transformada Wavelet em sua forma integral pode ser expressa como pode ser vista através da Equação 10 [34].

$$X(t_o, S) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \Psi_{t_o,s}(t) dt \quad (10)$$

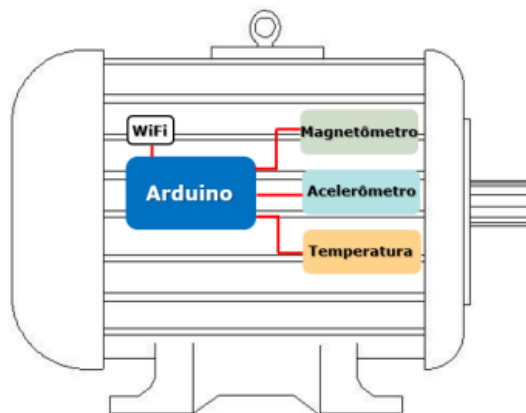
Onde:

- $X(t_o, S)$: sinal no domínio tempo-frequência;
- $x(t)$: sinal no domínio do tempo;
- $\Psi_{t_o,s}(t)$: função wavelet;
- t_o : instante de tempo de interesse;
- S : escala utilizada;
- t : tempo.

4 PROPOSTA DE UMA BANCADA DE TESTES PARA DETECÇÃO DE FALHAS EM MOTORES DE INDUÇÃO

A Figura 14 apresenta o esquema do protótipo do sistema de monitoramento acoplado ao motor de indução, bem como a conexão dos sensores ao Arduino.

Figura 14. Dispositivo de monitoramento acoplado ao motor de indução



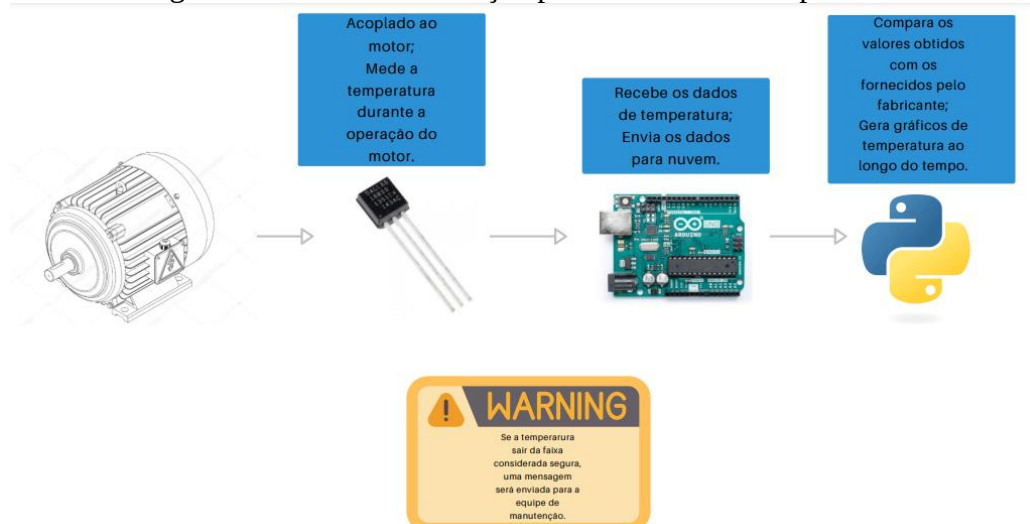
Fonte: (PEDRO ET AL., 2021)

De acordo com [10], O sensor de temperatura, instalado na carcaça do motor de indução, realiza a medição contínua da temperatura do motor durante seu funcionamento. Esse sensor é projetado para captar variações térmicas em tempo real, assegurando que os dados coletados sejam precisos e constantemente atualizados.

As informações obtidas pelo sensor de temperatura são enviadas para um Arduino, que atua como intermediário no processamento dos dados. O Arduino, uma plataforma de hardware livre, recebe essas leituras térmicas e é responsável por encaminhá-las para um ambiente de armazenamento em nuvem. Essa transmissão de dados para a nuvem possibilita o acesso remoto e a análise das informações a partir de diferentes dispositivos. A programação desenvolvida em linguagem Python é utilizada para processar e analisar os dados recebidos. Essa programação permite a comparação das temperaturas captadas com a temperatura ideal especificada para o funcionamento adequado do motor, conforme descrito nas diretrizes técnicas ou no datasheet do equipamento [10].

Mediante [10], além disso, a solução implementa um recurso visual que possibilita a visualização gráfica da curva de temperatura ao longo do tempo de operação do motor. Essa curva representa as variações de temperatura em um gráfico, facilitando a interpretação dos dados e a identificação de tendências ou padrões de comportamento térmico. Caso a temperatura medida pelo sensor esteja fora dos padrões esperados, ou seja, acima ou abaixo da faixa considerada ideal, o sistema gera uma mensagem de alerta. Essa notificação é enviada à equipe responsável pela manutenção, informando sobre a anomalia térmica e possibilitando ações corretivas imediatas. Dessa forma, o sistema contribui para a manutenção preventiva do motor, ajudando a evitar falhas e prolongando a vida útil do equipamento, como pode ser visualizado na Figura 15.

Figura 15. Cadeia de medição para o sensor de temperatura

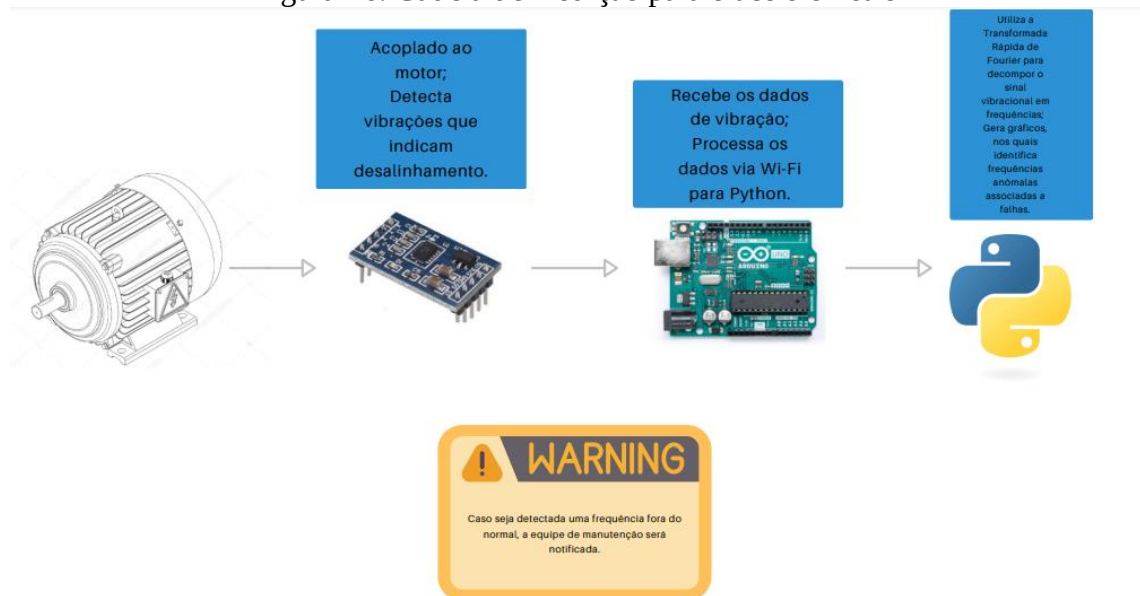


Fonte: (AUTORIA PRÓPRIA, 2024)

Conforme [10], o acelerômetro será instalado na carcaça do motor de indução com a finalidade de detectar vibrações durante o funcionamento do equipamento. Esse sensor é projetado para captar e medir as oscilações e movimentos que ocorrem na estrutura do motor, permitindo a análise detalhada do comportamento vibratório.

A programação em Python será utilizada para processar os dados coletados pelo acelerômetro. Essa programação empregará o conceito de análise no domínio da frequência, técnica que permite a decomposição do sinal de vibração em suas componentes de frequência. Ao aplicar essa análise, será possível identificar as diferentes frequências associadas às vibrações detectadas e, conseqüentemente, determinar a natureza das falhas relacionadas. Quando o sistema identificar uma frequência que indica um problema, como desalinhamento, uma mensagem de alerta será gerada. Essa notificação será direcionada à equipe de manutenção, informando sobre a irregularidade detectada. Essa comunicação é crucial, pois permitirá que sejam tomadas as medidas corretivas necessárias para resolver o problema identificado, assegurando o funcionamento adequado do motor e evitando danos mais severos. Assim, a integração do acelerômetro e a análise de suas medições contribuem significativamente para a manutenção preditiva do motor de indução [10], conforme pode ser visto na Figura 16.

Figura 16. Cadeia de medição para o acelerômetro



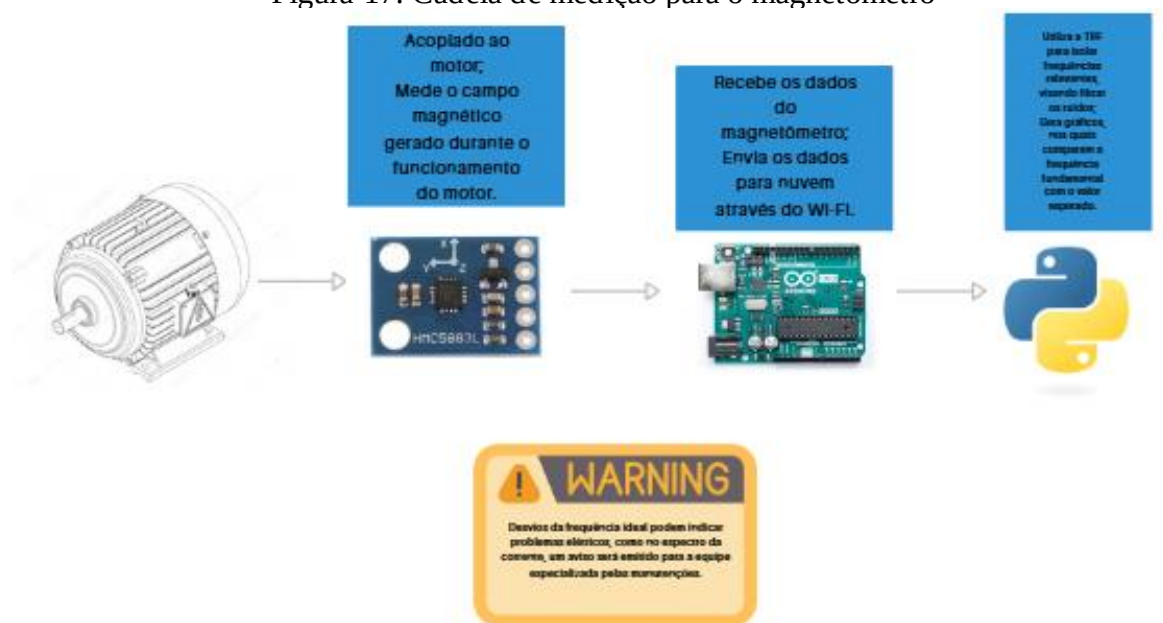
Fonte: (AUTORIA PRÓPRIA, 2024)

Por fim, O sensor magnetômetro será responsável por medir o campo magnético externo gerado durante o funcionamento do motor de indução. Este sensor é projetado para captar as variações do campo magnético que ocorrem enquanto o motor opera, possibilitando a avaliação

do desempenho do equipamento. Os dados coletados pelo magnetômetro serão processados em um analisador de frequência desenvolvido em Python. Este analisador utilizará um algoritmo específico que emprega a técnica de Transformada Rápida de Fourier (TRF) para filtrar os ruídos presentes na frequência fundamental. A TRF é uma ferramenta matemática que permite a decomposição de um sinal complexo em suas componentes de frequência, facilitando a identificação das frequências dominantes no sinal coletado [10].

Concernente a [10], ao aplicar a TRF, o sistema conseguirá isolar a frequência de operação do motor e compará-la à frequência esperada. Essa comparação é essencial para a detecção de possíveis falhas no equipamento, uma vez que desvios significativos da frequência esperada podem indicar problemas, como desequilíbrios ou falhas elétricas. Além disso, o sistema estimará parâmetros elétricos, como tensão e corrente, fundamentais para monitorar a potência elétrica e mecânica do motor. Serão gerados gráficos que representam os picos desses valores, contribuindo para a detecção de falhas. Esses dados adicionais proporcionarão uma análise abrangente do desempenho do motor, permitindo uma abordagem mais eficaz para a manutenção preditiva e a identificação de anomalias operacionais. Dessa forma, a integração do magnetômetro e do analisador de frequência resulta em uma ferramenta valiosa para garantir a confiabilidade e a eficiência dos motores de indução, podendo ser visto na Figura 17.

Figura 17. Cadeia de medição para o magnetômetro



Fonte: (AUTORIA PRÓPRIA, 2024)

A implementação da plataforma de análise em nuvem representa uma expectativa importante, pois essa tecnologia oferece diversas vantagens relacionadas à acessibilidade e ao

monitoramento remoto de dados. Primeiramente, a utilização da nuvem possibilita que os dados coletados pelo sistema sejam armazenados em um ambiente virtual acessível a partir de qualquer dispositivo com conexão à internet. Essa característica permite que a equipe responsável pelo monitoramento e pela manutenção dos motores de indução acesse informações críticas a qualquer momento e de qualquer local, sendo especialmente útil em ambientes industriais onde a mobilidade e a disponibilidade de informações são essenciais para a tomada de decisões rápidas e eficazes. Além disso, a plataforma de análise em nuvem facilita o monitoramento contínuo das condições operacionais do motor. É possível acompanhar em tempo real os dados coletados, como temperatura, vibrações e campo magnético, o que permite a identificação imediata de anomalias ou desvios dos parâmetros ideais de funcionamento. Essa capacidade de monitoramento remoto contribui para uma gestão proativa, permitindo a detecção precoce de problemas e, conseqüentemente, a realização de intervenções antes que ocorram falhas mais sérias ou paradas não programadas. Em suma, a implementação da plataforma de análise em nuvem proporciona acesso fácil e remoto às informações e potencializa a capacidade de resposta da equipe de manutenção. Isso resulta em um processo de tomada de decisões mais informado, baseado em dados atualizados, contribuindo significativamente para a eficiência operacional e a confiabilidade dos motores de indução [10].

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A necessidade de um diagnóstico eficaz de falhas em motores de indução é evidente, especialmente em ambientes industriais e domésticos, onde a confiabilidade desses equipamentos impacta diretamente a produtividade e a segurança operacional. A manutenção preventiva e preditiva, baseada na identificação precoce de problemas elétricos e mecânicos, é essencial para evitar interrupções não planejadas e prolongar a vida útil de tais equipamentos.

Diante do exposto, a detecção preditiva de falhas elétricas em motores de indução oferece uma capacidade valiosa de identificação de problemas em seu estágio inicial, o que se traduz em benefícios significativos para a manutenção preventiva e a redução de paradas não planejadas. Essa estratégia, baseada no uso de sensores e monitoramento contínuo, possibilita uma análise aprofundada do desempenho do motor ao longo do tempo, promovendo não apenas maior eficiência operacional, mas também a durabilidade dos equipamentos. A aplicação dessa abordagem se mostra particularmente vantajosa para a indústria, ao otimizar a confiabilidade e a produtividade das máquinas em operação.

A consolidação de dados oriundos do desempenho dos motores permite o

desenvolvimento de históricos abrangentes e detalhados, fundamentais para a melhoria contínua dos processos de manutenção e operação. Por meio da coleta sistemática de informações sobre o estado e o comportamento dos motores, torna-se viável identificar padrões e tendências que auxiliam na otimização das intervenções técnicas. Esses históricos formam uma base de conhecimento que, ao ser consultada e atualizada periodicamente, fornece subsídios para tomadas de decisão mais precisas e informadas.

Além disso, a análise desses dados ao longo do tempo possibilita ajustes finos nas estratégias de monitoramento e manutenção, permitindo um planejamento mais eficiente, com base em informações concretas e personalizadas para cada contexto operacional. Essa prática impulsiona a evolução dos procedimentos e metodologias aplicadas, viabilizando a implementação de práticas de manutenção cada vez mais alinhadas às condições reais de funcionamento dos motores, e, por consequência, reduzindo os riscos de falhas inesperadas e otimizando a vida útil dos equipamentos.

Como proposta final, sugere-se a construção de uma bancada de testes para detecção de defeitos em motores elétricos de indução, utilizando sensores integrados a um sistema baseado em Arduino e programado em linguagem Python. A bancada será capaz de monitorar parâmetros como temperatura, vibração e campo magnético em tempo real, com os dados processados por algoritmos de análise que utilizam Transformada Rápida de Fourier (TRF) para isolar sinais anômalos e identificar falhas. Essa solução visa aprimorar a eficiência do diagnóstico e otimizar o processo de manutenção preventiva.

REFERÊNCIAS

- [1] SUETAKE, Marcelo; SILVA, Ivan Nunes da; GOEDTEL, Alessandro. Sistema fuzzy compacto embarcado em DSP e sua aplicação para controle V/f de motores de indução. **Sba: Controle & Automação Sociedade Brasileira de Automatica**, v. 21, p. 245-259, 2010.
- [2] XIE, Ying. Investigation of broken rotor bar faults in three-phase squirrel-cage induction motors. **Finite Element Analysis–From Biomedical Applications to Industrial Developments**, p. 477-498, 2012.
- [3] SIDDIQUE, Arfat; YADAVA, G. S.; SINGH, Bhim. A review of stator fault monitoring techniques of induction motors. **IEEE transactions on energy conversion**, v. 20, n. 1, p. 106-114, 2005.
- [4] KARMAKAR, S. C. S.; MITRA, Madhuchhanda; SENGUPTA, Samarjit. Induction motor fault diagnosis approach through current signature analysis. 2016.
- [5] ALVES, Daiane Aparecida. Técnicas de Detecção de Falhas em Barras do Rotor nos Motores de Indução Trifásicos. **Universidade Federal de São João del-Rei**, 2017.
- [6] BACCARINI, Lane Maria Rabelo. Detecção e diagnóstico de falhas em motores de indução. 2005.
- [7] ASSUNÇÃO, Frederico de Oliveira et al. Técnicas de análise preditiva para falhas elétricas em motores de indução trifásicos. 2006.
- [8] PINHEIRO, Hélio Henrique Cunha. Sistema para detecção e diagnóstico de falhas em motores elétricos de indução utilizando lógica fuzzy. 2011. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte.
- [9] PITOLI, Marcos Henrique. Sistema portátil para monitoramento e identificação de falhas em motores de indução trifásicos através da técnica da Análise da Assinatura Elétrica. 2013.
- [10] PEDRO, Evandro JP et al. Sistema eletrônico para monitorar a operação dos motores elétricos de indução na indústria. **ANALECTA-Centro Universitário Academia**, v. 6, n. 3, 2021.
- [11] CÔRTEZ, Douglas Machado. Aplicação de Inversores de Frequência em Motores Elétricos de CA. Trabalho de Conclusão de Curso PUC/RJ, Rio de Janeiro-RJ, 2010.
- [12] FRANCISCO, António MS. Motores de indução trifásicos. Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Viseu, 2006.
- [13] AMARAL, Matheus Hammes et al. Estudo e avaliação de métodos de análise das correntes do estator para a medição de entreferros de motores de indução monofásicos de compressores herméticos. 2017.
- [14] UMANS, Stephen D. Máquinas Elétricas de Fitzgerald e Kingsley-7. AMGH Editora, 2014.
- [15] BLOCH, Heinz P.; GEITNER, Fred K. Machinery Failure Analysis and Troubleshooting, Vol. 2. 1999.
- [16] RIBEIRO, Jéssica Mariana. ANÁLISE DE FALHAS EM MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICA, ATRAVÉS DO MÉTODO DE DETECÇÃO DE FALHAS ANÁLISE DE VIBRAÇÃO, UTILIZANDO CONTROLE POR LÓGICA FUZZY. 2016.
- [17] ARAÚJO, Rui Gonçalo Clara. Desenvolvimento de um sistema de diagnóstico de falhas em motores elétricos de indução. Lisboa: Universidade Nova, 2015.
- [18] SILVA, Jonas Guedes Borges da. Aplicação da Análise de componentes Principais (PCA) no diagnóstico de defeitos de rolamentos através da assinatura elétrica de motores de indução. 2008.
- [19] SILVA, José LH; CARDOSO, AJ Marques. Diagnóstico de avarias nos rolamentos de motores de indução trifásicos. Universidade de Coimbra, 2005.

- [20] MARÇAL, Rui FM; SUSIN, Altamiro A. Detectando falhas incipientes em máquinas rotativas. *Revista Gestão Industrial*, v. 1, n. 2, 2005.
- [21] SIDDIQUI, Khadim Moin; SAHAY, Kuldeep; GIRI, V. K. Health monitoring and fault diagnosis in induction motor-a review. *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*, v. 3, n. 1, p. 6549-6565, 2014.
- [22] PONCI, L. P.; CUNHA, P. M. R. Previsão de falha em rolamentos por análise espectral e de envelope. *Teknikii*, p. 1-11, 2005.
- [23] MACIEL, Ednilson Soares; ROCHA, Joaquim Eloir; LEANDRO, Gideon Villar. Detecção do Desequilíbrio de Tensões em Motor de Indução pelo Padrão Concórdia de Correntes Utilizando Lógica Fuzzy. In: *Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica*. 2013.
- [24] WEG - Guia de Especificação de Motores Elétricos. Disponível em <https://static.weg.net/medias/downloadcenter/h32/hc5/WEG-motores-eletricos-guia-de-especificacao-50032749-brochure-portuguese-web.pdf>. Acesso em: jul 2024.
- [25] NBR5383-1: Máquinas Elétricas Girantes - Parte 1: Motores de Indução Trifásicos - Ensaaios. Rio de Janeiro, 2002.
- [26] CAMERON, JR; THOMSON, WT; DOW, AB Monitoramento de vibração e corrente para detecção de excentricidade de entreferro em grandes motores de indução. Em: *IEE Proceedings B (Electric Power Applications)*. Biblioteca Digital IET, 1986. p. 155-163.
- [27] BENBOUZID, M. El Hachemi. Uma revisão da análise de assinatura de motores de indução como um meio para detecção de falhas. *IEEE transactions on industrial electronics*, v. 47, n. 5, p. 984-993, 2000.
- [28] KLIMAN, G. B.; STEIN, J. Methods of motor current signature analysis. *Electric Machines and power systems*, v. 20, n. 5, p. 463-474, 1992.
- [29] LATHI, B. P. Sinais e sistemas lineares. Tradução de Gustavo Guimarães Paiva. 2. ed. Porto Alegre, RS. Bookman, 2007.
- [30] COOLEY, James W.; TUKEY, John W. Um algoritmo para o cálculo de máquina de séries complexas de Fourier. *Matemática da computação*, v. 19, n. 90, p. 297-301, 1965.
- [31] SEJDIĆ, Ervin; DJUROVIĆ, Igor; JIANG, Jin. Representação de características de tempo-frequência usando concentração de energia: Uma visão geral dos avanços recentes. *Processamento de sinal digital*, v. 19, n. 1, p. 153-183, 2009.
- [32] ALLEN, Jonathan. Análise espectral de curto prazo, síntese e modificação por transformada discreta de Fourier. *Transações IEEE em acústica, fala e processamento de sinais*, v. 25, n. 3, p. 235-238, 1977.
- [33] JUNG, Jee-Hoon; LEE, Jong-Jae; KWON, Bong-Hwan. Online diagnosis of induction motors using MCSA. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, v. 53, n. 6, p. 1842-1852, 2006.
- [34] GRAPS, Amara. Uma introdução às wavelets. *IEEE computational science and engineering*, v. 2, n. 2, p. 50-61, 1995.
- [35] KALASKAR, Chaitali S.; GOND, Vitthal J. Motor current signature analysis to detect the fault in induction motor. *International Journal of Engineering Research and Applications*, v. 4, n. 6, p. 58-61, 2014.