

ANÁLISE DE SINAIS DE CORRENTE ELÉTRICA PARA O DIAGNÓSTICO DE FALHAS EM ROLAMENTOS DE MOTORES DE INDUÇÃO

Luis Felipe da Silva Maciel e Renato Kazuo Miyamoto*

RESUMO

Este trabalho investiga o diagnóstico de falhas em rolamentos de motores de indução trifásicos por meio da análise de vibração via assinatura de corrente elétrica. Considerando que os rolamentos são responsáveis por aproximadamente 40% das falhas nesses motores, a pesquisa utiliza análise de sinais de correntes coletados sob diferentes condições de cargas, que foram tratados pela Transformada Rápida de Fourier (FFT) no Matlab para identificar as frequências características dos defeitos. Os resultados mostram que a análise espectral da corrente permite identificar precocemente defeitos, oferecendo uma alternativa eficiente e de menor custo para manutenção preditiva industrial, contribuindo para a redução de paradas inesperadas e aumento da vida útil dos motores.

Palavras-chave: Motores de indução trifásico; Falhas em rolamentos; Análise de vibração; Assinatura de corrente; Manutenção preditiva.

Current Signal Analysis for Diagnosing Bearing Faults in Three-Phase Induction Motors

ABSTRACT

This work investigates the diagnosis of faults in three-phase induction motor bearings using vibration analysis via electric current signature. Considering that bearings are responsible for approximately 40% of faults in these motors, the research uses analysis of current signals collected under different load conditions, which were treated by the Fast Fourier Transform (FFT) in Matlab to identify the characteristic frequencies of the faults. The results show that current spectral analysis enables early identification of faults, offering an efficient and lower-cost alternative for industrial predictive maintenance, helping to reduce unexpected downtime and increase the useful life of motors.

Key words: Three-phase induction motors; Bearing faults; Vibration analysis; Current signature; Predictive maintenance.

* Autor correspondente (e-mail): renato.miyamoto@sistemafiep.org.br

1 INTRODUÇÃO

Segundo Komez e Dems (2022), estima-se que de 30% a 70% da eletricidade em plantas industriais, é consumida por motores de indução trifásico. Neste cenário, aproximadamente 300 milhões de motores estão instalados no setor industrial, e a quantidade aumenta em uma taxa de cerca de 15% ao ano.

Nesse sentido, os motores de indução trifásicos (MIT) demonstram alta eficiência e são amplamente utilizados na indústria devido à sua robustez, facilidade de manutenção e baixo custo. No entanto, esse tipo de equipamento como qualquer outro, está sempre sujeito a falhas, que podem comprometer seu desempenho e segurança durante operações. Isso pode levar a interrupções de processos industriais, resultando em perdas financeiras, podendo ser maior que o valor da própria máquina (Tahkola et al., 2022).

Estudos indicam que as falhas nos motores de indução se distribuem da seguinte forma: 40% aos rolamentos, 28% estão relacionadas a falhas no estator, 24% se referem a diversos fatores como falhas de ventilação, instalação inadequada, problemas na alimentação elétrica e 8% está relacionada a falhas no rotor (Radecki et al., 2016).

Entre todas as falhas mecânicas, os danos em rolamentos se destacam como um dos mais críticos. Esse tipo de falha é associado à corrosão, desgaste, contaminação e lubrificação inadequada dos rolamentos que afetam diretamente a vida útil do motor. Essas falhas podem refletir no aumento das perdas rotacionais e promover uma instabilidade no rotor, desalinhando-o em relação ao estator. Como consequência, ocorrem alterações nas indutâncias próprias e as mútuas das fases, gerando distorções no espectro de frequências da corrente elétrica do estator (Ojaghi et al., 2018).

Durante a operação normal do motor, os rolamentos podem desenvolver fissuras em suas superfícies, geralmente ocasionadas por impactos recorrentes ao longo do funcionamento. Essas fissuras são uma das principais causas de desbalanceamento do motor e, em muitos casos, resultam do uso inadequado do

equipamento. Também é possível que tais falhas se originem ainda na etapa de fabricação do motor (Nishat e Kim, 2020). Nesse contexto, a manutenção preditiva consiste em um conjunto de ações voltadas ao monitoramento de variáveis e parâmetros que refletem o desempenho do equipamento, permitindo a identificação antecipada de falhas potenciais (Otani e Machado, 2008).

A avaliação da integridade dos rolamentos é comumente realizada por meio de métodos que utilizam a coleta e análise de sinais de vibração (Deng et al., 2018; Nayana e Geethanjali, 2017; Wang et al., 2017). No entanto, uma das principais desvantagens desse método está no alto custo dos sensores e equipamentos, o que limita seu uso a máquinas de grande porte. Além disso, em certas aplicações industriais, o acesso direto ao motor de indução pode ser dificultado após a montagem da planta, o que torna desafiador o posicionamento ideal dos sensores para detecção de falhas nos rolamentos (Dalvand et al., 2017; Nishat e Kim, 2020).

Além da análise de vibração, há diversas abordagens complementares utilizadas no monitoramento de falhas em rolamentos, como sensores de emissão acústica, análises térmicas e termografia infravermelha (Azeez, Alkhedher e Gadala, 2020; Glowacz, 2018). Destacam-se também técnicas baseadas em inteligência artificial, voltadas à classificação de partículas de desgaste presentes nos detritos do lubrificante (Ranjan, Ghosh e Kumar, 2020).

Dada a importância dos motores de indução trifásicos nas aplicações industriais, a manutenção preditiva desempenha um papel relevante ao contribuir para a ampliação da vida útil da máquina e a continuidade do processo produtivo minimizando paradas não programadas que poderiam acarretar prejuízos financeiros. Nesse cenário, o diagnóstico de falhas nos rolamentos desses motores viabiliza o agendamento prévio de intervenções corretivas, evitando interrupções inesperadas. Essa abordagem também se destaca por sua facilidade de implementação e pelo potencial diagnóstico em tempo real (Dalvand et al., 2018; Martinez-Herrera et al., 2022; Okwuosa, Akpudo e Hur, 2022; Soualhi et al., 2019).

Diante desse contexto, a principal motivação deste trabalho consiste na identificação de falhas em rolamentos de motores de indução trifásico, através da

análise de vibração baseada na assinatura de corrente, simulando diversas condições de cargas e submetendo diversas condições de rolamentos. Com esse propósito, será utilizada a transformada rápida de Fourier (FFT – *Fast Fourier Transform*) implementada no *software* Matlab, a partir de coletas experimentais utilizando um MyDAQ e circuitos de condicionamento de sinais.

Uma breve introdução sobre as contribuições e as características do tema proposto nesse trabalho são apresentadas nesta seção. A sequência deste trabalho está organizada em 4 seções, a saber: a Seção 2 contempla a fundamentação teórica, abordando os principais conceitos e estudos relacionados ao tema; a Seção 3 descreve a metodologia adotada para o desenvolvimento da pesquisa; a Seção 4 apresenta e discute os resultados obtidos; por fim, a Seção 5 reúne as conclusões do estudo, destacando as contribuições e possíveis direções para trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

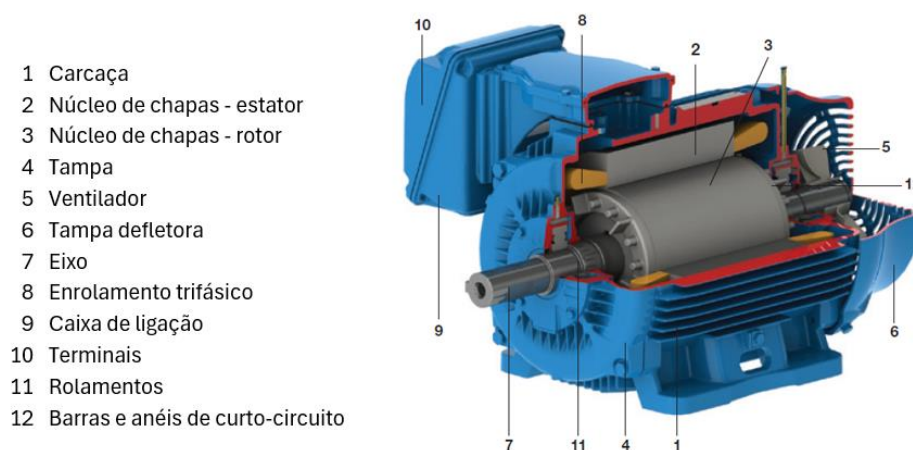
A fundamentação teórica tem como objetivo contextualizar os principais conceitos relacionados ao diagnóstico de falhas em motores de indução trifásicos, com ênfase nos rolamentos, sensores e técnicas de análise utilizadas para esse fim. Inicialmente, apresenta-se a relevância dos motores de indução no cenário industrial, destacando suas características construtivas e operacionais. Em seguida, discute-se a ocorrência de falhas em rolamentos e seus impactos no desempenho dos motores. Na sequência, são abordados os tipos de sensores comumente empregados na detecção dessas falhas, com ênfase na medição de corrente e vibração. Por fim, exploram-se as principais técnicas de processamento de sinais aplicadas ao diagnóstico, com enfoque na extração e interpretação de informações relevantes para a identificação precoce de danos.

2.1 Motores de Indução e sua importância para a indústria

De acordo com Fitzgerald et al. (2003), motores de indução trifásicos operam com base na criação de um campo magnético girante gerado pelas correntes

trifásicas no estator. Esse campo, ao interagir com o rotor, induz correntes elétricas nos condutores do rotor, gerando o torque necessário para a rotação. A forma construtiva do motor garante alto desempenho, baixa necessidade de manutenção e eficiência elevada, como ilustrado na Figura 1.

Figura 1 – Corte ilustrativo de um motor de indução tipo gaiola de esquilo.



Fonte: Adaptado WEG (2024).

O princípio básico de funcionamento desses motores é a indução eletromagnética. Quando um sistema trifásico de tensões é aplicado ao estator, gera-se um campo magnético girante, cuja velocidade é constante e denominada velocidade síncrona (n_s), definida pela equação (1):

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

onde:

n_s é a velocidade síncrona em rpm;

f_{se} é a frequência da rede elétrica em Hertz (Hz);

P é o número de polos do motor.

Segundo Chapman (2013), o campo magnético gerado no estator corta as barras do rotor, induzindo correntes elétricas. Essas correntes induzidas produzem um torque eletromagnético que movimenta o rotor na direção do campo girante. Para

que esse fenômeno ocorra adequadamente, é necessário que o rotor sempre gire a uma velocidade inferior à síncrona. Essa diferença entre as velocidades é denominada escorregamento (s), definido pela equação (2):

$$s = \frac{n_s - n_m}{n_s} \quad (2)$$

onde:

s é o escorregamento;

n_m é a velocidade mecânica do rotor em rpm.

Quando um motor opera com desequilíbrio entre as tensões, a velocidade que atua sobre a carga é reduzida rapidamente ao longo da operação do motor de indução trifásico, isso ocorre devido ao escorregamento elevado, no qual, está associado às perdas adicionais do rotor (IEC 60034-26). De acordo com Brito (2002), os motores de indução trifásicos são amplamente empregados na indústria em aplicações diversas, como acionamento de bombas, compressores, ventiladores e equipamentos de movimentação de cargas, entre outros usos industriais.

Nesse contexto, os motores de indução trifásicos permanecem como a principal solução em acionamento eletromecânico industriais modernos. Sua ampla aceitação deve-se à capacidade de operar com alta eficiência em diferentes condições de carga, resistência a ambientes adversos e compatibilidade com sistemas automatizados de controle (Chapman, 2013).

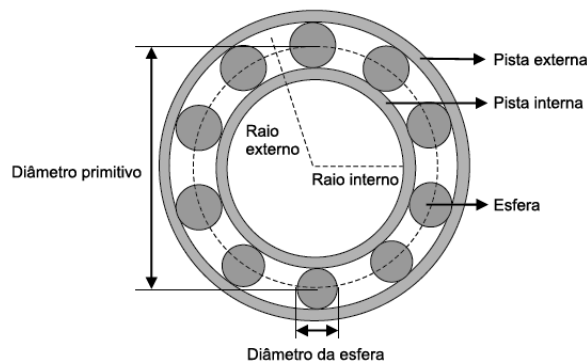
Sabendo que a estrutura construtiva do MIT garante seu desempenho, os rolamentos desempenham um papel crucial no funcionamento do sistema. Eles são essenciais para a sustentação do eixo, que, devido à carga constante que suporta, está sempre sujeito a falhas. Tais falhas são responsáveis por uma parcela significativa dos problemas no MIT (Radecki et al., 2016).

2.2 Falhas de rolamentos em motores de indução

Os rolamentos são componentes mecânicos fundamentais no funcionamento de motores de indução, responsáveis por sustentar o eixo do rotor e permitir seu

movimento com o menor atrito possível. No entanto, por estarem diretamente sujeitos a cargas extremas, vibrações e condições ambientais adversas, os rolamentos são os elementos mais propensos a falhas nesses motores (Radecki et al., 2016). A Figura 2 ilustra a estrutura de um rolamento.

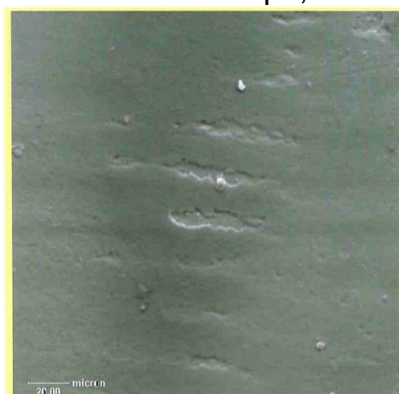
Figura 2 – Estrutura de um rolamento e seus principais elementos.



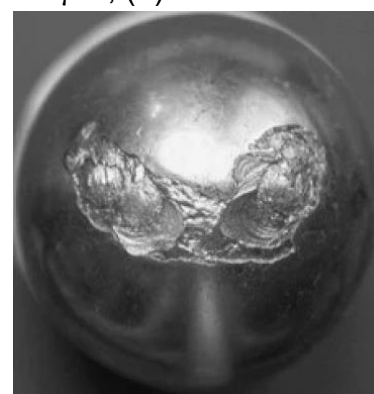
Fonte: Costa et al. (2016).

Segundo Garcia (2024), a falha em rolamentos é uma das principais causas de interrupções em motores de indução trifásico e deve ser objeto de monitoramento constante. A Figura 3 ilustra as degradações observadas nos principais componentes dos rolamentos.

Figura 3 – Desgaste em rolamentos: (a) desgaste nas pistas, causados por um movimento de um terceiro corpo, analisada a $20\ \mu m$; (b) esfera danificada.



(a)



(b)

Fonte: (a) Medeiros (2002); (b) Toliyat et al. (2012).

Estima-se que 40% das falhas em motores elétricos estejam relacionadas aos rolamentos (Radecki et al., 2016). Essas falhas podem ser agrupadas em diferentes categorias, como desgaste nas pistas, corrosões, desalinhamento e desbalanceamento.

Além disso, falhas em rolamentos causam aumento de vibração, perda de eficiência energética, ruídos e paradas frequentes do motor. A pesquisa de Marques e Brito (2019) utilizou testes com massas desbalanceadas para demonstrar que a integridade dos rolamentos afeta diretamente a vibração e a temperatura do motor.

2.3 Sensores aplicados na detecção de falhas em motores de indução

A detecção precoce de falhas em motores de indução trifásicos é essencial para evitar paradas inesperadas, perdas operacionais e danos irreversíveis aos equipamentos.

2.3.1 Sensores de vibração

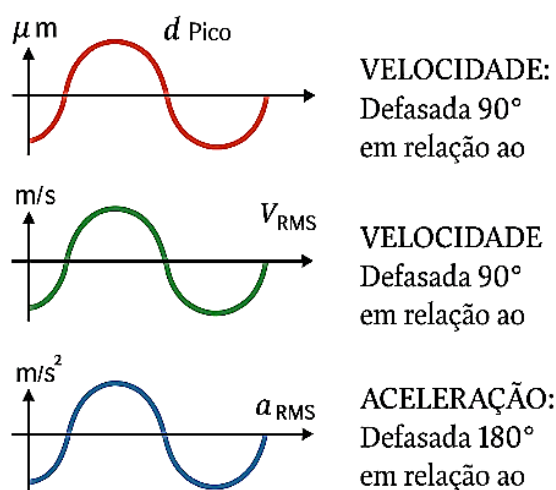
Os sensores de vibração, especialmente os acelerômetros, são geralmente utilizados na manutenção preditiva. Esses dispositivos convertem movimentos mecânicos em sinais elétricos, permitindo o monitoramento de desbalanceamentos, folgas, desalinhamentos e, principalmente, falhas em rolamentos (NBR 16881:2020; Ramalho et al., 2014; Marques e Brito, 2019). Esse sensor nos permite fazer medição através de parâmetros como: velocidade, deslocamento e aceleração. Na Figura 4, observa-se essas formas de ondas senoidais.

Conforme a NBR 16881:2020 para a medição e avaliação da vibração em máquinas rotativas, é recomendando faixas de frequência e pontos de instalação. A vibração é uma das primeiras manifestações físicas de falha, tornando-se uma ferramenta valiosa para diagnósticos em tempo real.

Segundo Ramalho et al. (2016) a aplicação de sensores MEMS (*Microelectromechanical Systems*) possibilitou a detecção eficaz de padrões vibracionais distintos em motores com falhas simuladas. Por outro lado, Marques e

Brito (2019) mostraram experimentalmente que a inserção de massas desbalanceadoras nos rolamentos elevou significativamente os níveis de vibração e temperatura.

Figura 4 – Formas de ondas senoidais de defasagem dos parâmetros de vibração.



Fonte: Da Silva Pereira (2021).

Além disso, muitos estudos utilizam análise espectral para associar frequências específicas a componentes danificados, como rolamentos ou engrenagens. Benito et al. (2023) utilizaram análise biespectral para aprimorar a sensibilidade do diagnóstico em sinais de corrente, enquanto Heckbert (1995) destaca a relevância da FFT (*Fast Fourier Transform*) no processamento digital de sinais em sistemas mecânicos e eletromecânicos. A FFT, que será detalhada na seção 2.4.2, é frequentemente utilizada para processar esses sinais e gerar espectros informativos.

2.3.2 Sensores de Corrente

Como as falhas em rolamentos produzem vibrações com frequências características bem definidas, a análise espectral tanto dos sinais de vibração quanto da corrente elétrica do motor destaca-se como uma das principais estratégias de diagnóstico a MCSA (*Motor Current Signature Analysis*), permitindo a identificação precoce e localizada dessas anomalias mecânicas (Bianchini, 2023).

Diversos tipos de sensores de corrente são empregados em sistemas de diagnóstico, como:

- Transformadores de corrente (TCs): comuns em aplicações industriais, permitem medição de correntes elevadas com segurança elétrica.
- Sensores de efeito Hall: São capazes de medir tanto corrente contínua quanto alternada, são úteis em aplicações de monitoramentos contínuos com respostas rápidas.
- Shunts resistivos: utilizados em medições de baixa corrente, com boa precisão em bancada de testes.

Conforme demonstrado por Souza (2018), a utilização de sensores de corrente em conjunto com placas de aquisição possibilitou a detecção de distúrbios internos no motor sem a necessidade de intervenções mecânicas.

Lopes et al. (2017), por sua vez, aplicaram algoritmos de classificação (Random Forest) aos sinais de corrente, obtendo alta taxa de acerto na identificação de falhas em rolamentos, mesmo sob diferentes condições de carga e tensão. Além disso, a técnica MCSA é altamente recomendada em ambientes industriais automatizados, permitindo sua integração com sistemas de controle, alertas e dashboards em tempo real.

2.4 Técnicas de processamento de sinais no diagnóstico de falhas

A eficiência dos métodos de diagnóstico depende diretamente da forma como os sinais são adquiridos e processados. Como destaca Heckbert (1995), a aquisição de sinais é o primeiro passo fundamental em qualquer sistema de diagnóstico baseado em análise espectral

2.4.1 Aquisição de Sinais

A coleta de dados exige equipamentos com alta taxa de amostragem e resolução suficiente para captar frequências características de falhas. Um exemplo é a utilização do sistema MyDAQ com o MATLAB, que permite aquisição simultânea de

sinais de corrente e vibração com interface gráfica para visualização em tempo real (Souza, 2018; Dalmolim, 2019).

Os sensores devem ser posicionados de forma estratégica em pontos específicos do motor (como próximo aos rolamentos), para garantir maior sensibilidade à detecção de anomalias. Além disso, a calibração dos sensores e o tratamento de ruído são fundamentais para a qualidade do diagnóstico.

2.4.2 Transformada Rápida de Fourier (*Fast Fourier Transform - FFT*)

A Transformada Rápida de Fourier (FFT) é a ferramenta de análise mais utilizada para converter sinais do domínio do tempo para o domínio da frequência. Essa técnica permite identificar componentes rotineiros que indicam falhas mecânicas específicas, como ressaltos no anel interno do rolamento ou irregularidades nas esferas (Bianchini, 2023; Benito et al. 2023; Santos et al. 2019; Brito 2002).

Santos et al. (2019) mostraram que a aplicação da FFT em sinais acústicos permitiu distinguir motores com rolamentos saudáveis daqueles com falhas como corrosão ou impacto. Verardi (2008) complementa ao afirmar que a FFT também é útil na análise de ruídos e vibrações associadas ao sistema de ventilação dos motores.

Além disso, Heckbert (1995) e Mateer (2008) descrevem as bases matemáticas da FFT, evidenciando sua eficiência e aplicabilidade em sistemas digitais, conhecida como Transformada Discreta de Fourier (do inglês, *Discrete Fourier Transform – DFT*). A DFT é calculada por:

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x[n]e^{-j\frac{2\pi kn}{N}}, \quad k = 0, 1, 2, \dots, N - 1 \quad (3)$$

em que $X(k)$ é a DFT, $x[n]$ o sinal discreto de entrada e N o número total de amostras. Devido as problemáticas de rolamentos de motores de indução trifásico, diversos estudos já utilizaram algoritmos de Transformada Rápida de Fourier (FFT) como uma técnica eficaz para identificar esses defeitos (Santos et al. 2019; Brito 2002).

Considerando que o movimento do eixo do motor de indução é radial, as falhas nos rolamentos geram perturbações periódicas em frequências características, que podem estar associadas a defeitos nas pistas externas (BPFO), nas pistas internas (BPFI) ou nas esferas do rolamento (BSF) (Bianchini, 2023). As equações são dadas por:

Falhas nas pistas Externas (BPFO):

$$f_{ext} = \frac{N_e}{2} f_r \left(1 - \frac{D_e}{D_c} \cos \beta_{ct}\right) \quad (4)$$

Falhas nas pistas Internas (BPFI):

$$f_{int} = \frac{N_e}{2} f_r \left(1 + \frac{D_e}{D_c} \cos \beta_{ct}\right) \quad (5)$$

Falhas nas esferas (BSF):

$$f_{esf} = \frac{D_c}{D_e} f_r \left(1 - \frac{D_e^2}{D_c^2} \cos^2 \beta_{ct}\right) \quad (6)$$

onde:

f_{ext} é a frequência de falha na pista externa;

f_{int} é a frequência de falha na pista interna;

f_{esf} é a frequência de falha nas esferas;

f_r é a frequência de rotação;

N_e é o número de esferas internas;

D_e é o diâmetro das esferas;

D_c é a distância entre os centros de duas esferas;

β_{ct} é o ângulo de contato entre a esfera e a carcaça.

Com base nos conceitos e estudos apresentados na fundamentação teórica, observa-se que a análise de sinais elétricos, especialmente via assinatura de corrente, constitui uma alternativa viável e promissora para o diagnóstico de falhas em rolamentos de motores de indução trifásicos.

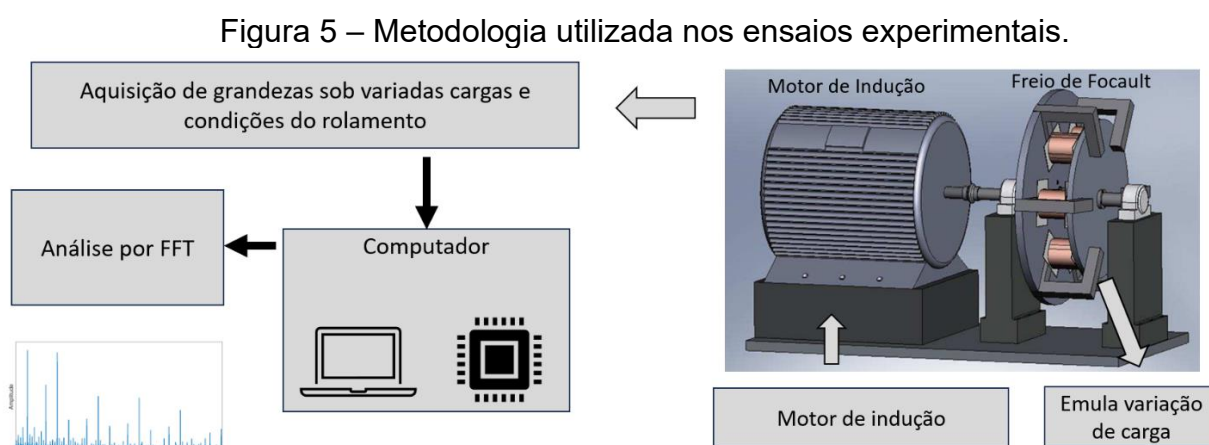
Considerando as limitações associadas aos sensores de vibração e o potencial da Transformada Rápida de Fourier (FFT) na extração de frequências características, definiu-se uma abordagem experimental orientada à aplicação prática desses conceitos. A próxima seção descreve detalhadamente a metodologia adotada

para a coleta, processamento e análise dos sinais de corrente, bem como a configuração do sistema de ensaios utilizado nesta pesquisa.

3 METODOLOGIA

A metodologia adotada neste trabalho baseia-se na análise de vibração por meio da corrente elétrica, simulando defeitos nas esferas do rolamento de um motor de indução trifásico, operando sob diferentes níveis de carga.

O sinal de corrente de alimentação do motor é coletado, tratado e, em seguida, processado para calcular o tempo de aquisição com base na taxa de amostragem. após essa etapa, a corrente é representada graficamente em função do tempo. Na sequência, realiza-se uma análise no domínio da frequência por meio da Transformada Rápida de Fourier (FFT), na qual se calcula a amplitude espectral e os resultados são apresentados por meio de gráficos, permitindo a identificação de padrões associados às falhas simuladas. A Figura 5 ilustra um fluxograma sobre a metodologia utilizada nos ensaios experimentais.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

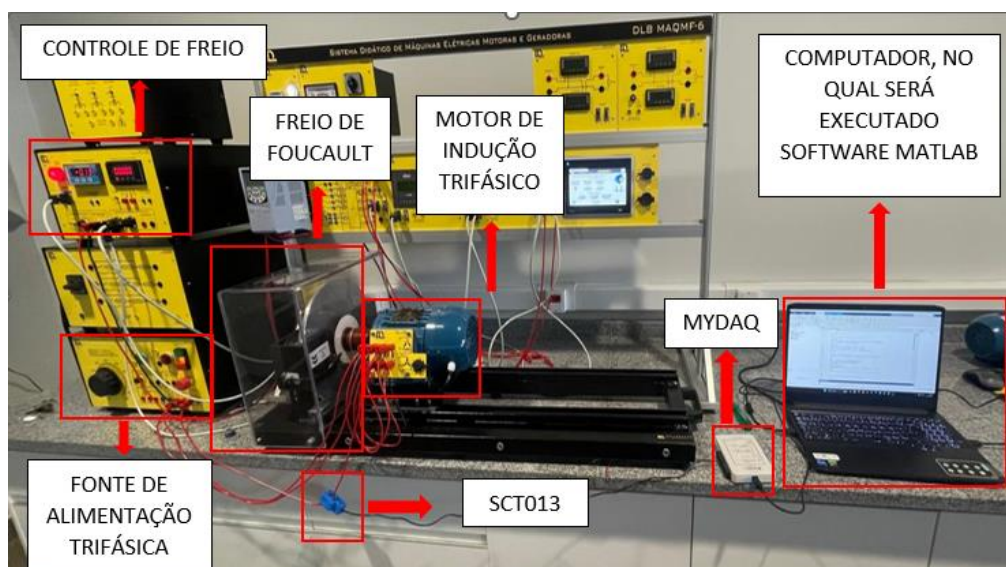
Foi utilizado a bancada de estudos de máquinas elétricas rotativas DLB MAQMF-6 da DeLorenzo, sendo composta por um freio de Foucault acoplado a um

motor de indução trifásico. A Figura 7 ilustra a bancada experimental utilizada para a implementação da metodologia deste trabalho, composta por um conjunto de equipamentos interligados para viabilizar a análise de vibração via assinatura de corrente em motores de indução trifásicos.

A alimentação do sistema é realizada por uma fonte trifásica, que energiza diretamente o motor, o qual está acoplado mecanicamente a um freio de Foucault. Esse freio, controlado por um painel com potenciômetro, permite simular diferentes condições de carga, ajustando o esforço resistivo sobre o eixo do motor. Para a coleta dos dados, foi utilizado o sensor de corrente do tipo clamp SCT013, conectado a uma das fases do motor, com o objetivo de capturar os sinais elétricos correspondentes ao seu funcionamento.

Esses sinais são transmitidos para o *hardware* de aquisição MYDAQ, que converte as medições analógicas em digitais e as encaminha para o computador. Neste sentido, o *software* MATLAB executa um *script* que realiza o tratamento dos dados e aplica a Transformada Rápida de Fourier (FFT), possibilitando a análise espectral das correntes em busca de padrões associados a falhas em rolamentos.

Figura 7 – Bancada Experimental



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

A disposição dos componentes e a integração dos dispositivos garantem a fidelidade da coleta e o controle das variáveis experimentais. As principais características do sistema são listadas:

- O motor de indução trifásico de 1 cv está sendo energizado por partida direta;
- O controlador do freio de Foucault é ajustável por meio de um potenciômetro, permitindo a configuração do motor para operar em diferentes níveis de carga;
- O SCT013 é um sensor de corrente que será acoplado a uma das fases para a coleta de dados. A Figura 8 ilustra o sensor;

Figura 8 – Sensor de Corrente

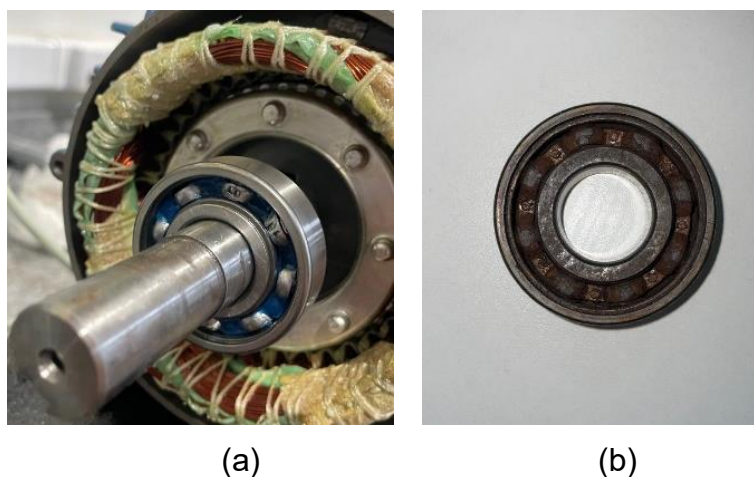


Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

- O MYDAQ funciona como um sistema de aquisição, que permite a medição da corrente elétrica e a conversão dos sinais analógicos em dados digitais para análise;
- O Software MATLAB é utilizado para a aquisição e processamento. O Script desenvolvido realiza o tratamento dos dados e exibe os resultados de formas estruturada, juntamente com apresentação de gráficos;

Para a simulação de falhas em rolamentos do MIT, foi utilizado um rolamento com duas esferas desgastadas e um rolamento totalmente desgastado, conforme observa-se na Figura 10.

Figura 10 – Desgaste em rolamentos: (a) esferas danificadas; (b) rolamento oxidado.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

A Tabela 1 apresenta a estrutura dos ensaios realizados para avaliação das falhas em rolamentos de motores de indução trifásicos. Foram conduzidos experimentos com três condições distintas de integridade dos rolamentos: rolamento em bom estado, rolamento oxidado e rolamento com esferas danificadas.

Tabela 1 – Métodos de Ensaios

Ensaios	Condições de operação do MIT	Frequência de amostragem
Rolamento Bom	A vazio - 1,6A	15 kHz
	Nominal do Motor- 2,8A	15 kHz
	Corrente de Fator de Serviço - 3,6A	15 kHz
Rolamento Oxidado	A vazio - 1,6A	15 kHz
	Nominal do Motor- 2,8A	15 kHz
	Corrente de Fator de Serviço - 3,6A	15 kHz
Rolamento com esferas danificadas	A vazio - 1,6A	15 kHz
	Nominal do Motor- 2,8A	15 kHz
	Corrente de Fator de Serviço - 3,6A	15 kHz

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Para cada uma dessas condições, o motor foi operado sob três níveis de carga distintos: a vazio (corrente de 1,6 A), em corrente nominal (2,8 A) e em corrente correspondente ao fator de serviço (3,6 A), totalizando nove ensaios distintos. Todos os testes foram realizados com uma frequência de amostragem de 15 kHz, valor adequado para capturar as componentes de alta frequência associadas às falhas nos rolamentos, garantindo resolução suficiente para aplicação da Transformada Rápida de Fourier (FFT) na identificação das assinaturas espectrais características. A padronização da taxa de aquisição contribui para a comparabilidade dos dados obtidos entre os diferentes cenários testados.

A seguir, na Seção 4, são apresentados e discutidos os resultados obtidos a partir dessa metodologia experimental.

4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Nesta seção, são apresentados e discutidos os resultados obtidos durante a realização dos experimentos e análises do motor de indução trifásico em diferentes condições operacionais. A análise busca evidenciar os efeitos de defeitos específicos nas esferas internas, além disso validar as metodologias utilizadas para os ensaios.

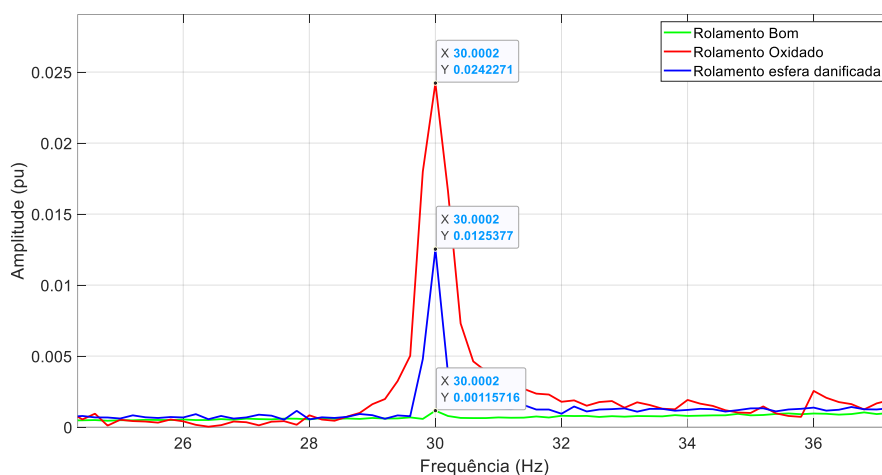
Nesse sentido, utilizou-se o cálculo da frequência de giro das esferas (*Ball Spin Frequency - BSF*), no qual foi considerado um ângulo de contato $\beta = 0^\circ$ entre as esferas e a pista externa. Aplicando a equação (6), obteve-se um valor de $BSF = 30,249 \text{ Hz}$, que serviu como referência para as análises.

A seguir serão apresentados nos gráficos a análise de amplitudes de todos os sinais coletados, sendo com falha ou sem falha, em todas as condições de cargas.

4.1 Análise com o motor a vazio.

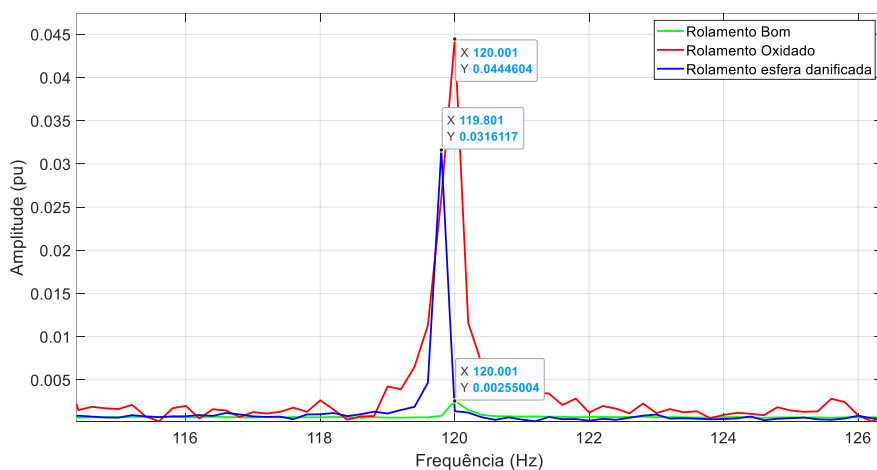
As figuras 11 e 12 ilustram respectivamente o espectro de frequência do sinal de BSF. Considerando o motor de indução operando a vazio, que apresenta as condições de rolamento bom, rolamento oxidado e rolamento com esferas danificadas.

Figura 11 – Espectro em 30 Hz: Motor de indução a vazio



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Figura 12 - Espectro 2º harmônica em 120 Hz: Motor de indução a vazio



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

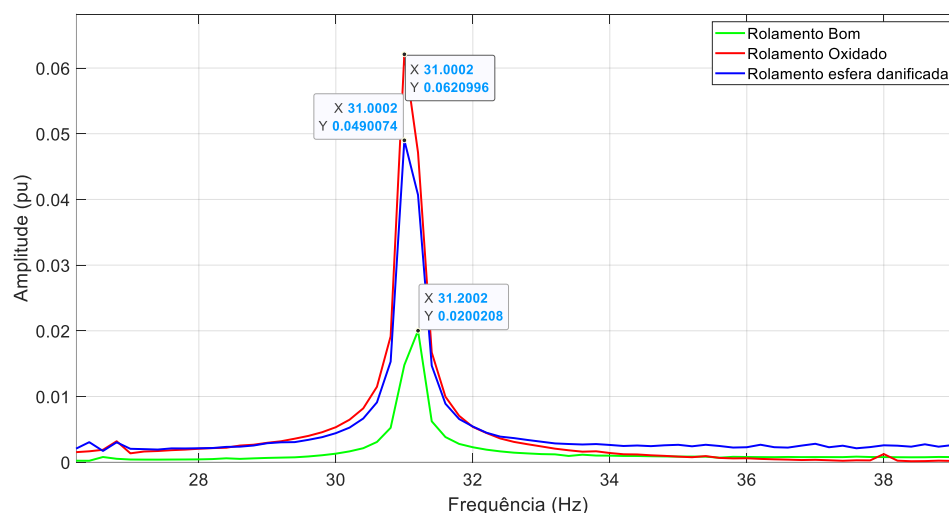
A análise dos espectros apresentados nas Figuras 11 e 12 revela variações significativas nas amplitudes de frequência entre os diferentes estados dos rolamentos, mesmo com o motor operando a vazio. Na Figura 11, observa-se que o rolamento com esferas danificadas apresenta um pico de amplitude mais acentuado

em 30 Hz quando comparado ao rolamento oxidado. De forma complementar, a Figura 12, correspondente à segunda harmônica (120 Hz), reforça esse comportamento, evidenciando que falhas mecânicas nos rolamentos impactam de maneira distinta as componentes harmônicas do espectro de corrente. Esses resultados demonstram a sensibilidade da análise espectral na detecção precoce de falhas e validam a metodologia empregada neste trabalho.

4.2 Análise com o motor operando e corrente nominal 2,8A.

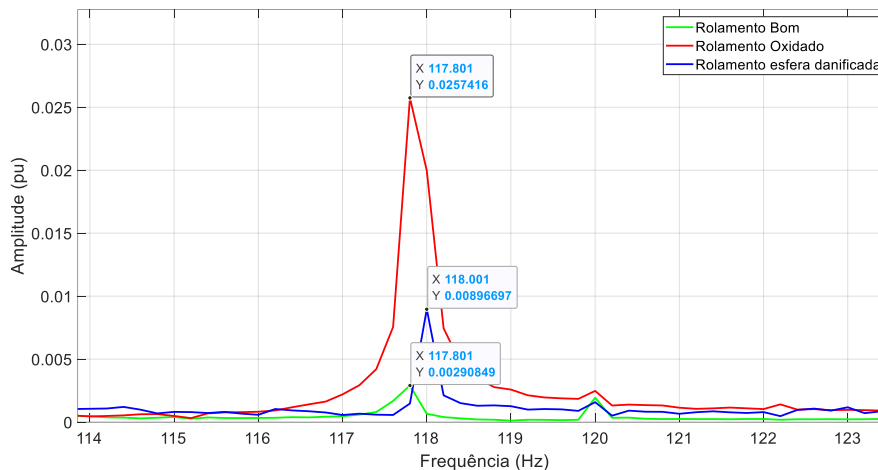
Considerando o motor de indução operando em sua corrente nominal de 2,8A, as figuras 13 e 14 mostram respectivamente o espectro de frequência do sinal de BSF, com as condições de rolamento bom, rolamento oxidado e rolamento com esferas danificadas.

Figura 13 - Espectro próximo à 30 Hz: Motor de indução atuando em sua corrente nominal 2,8A.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Figura 14 - Espectro 2º harmônica próximo à 120 Hz: Motor de indução atuando em sua corrente nominal 2,8A.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

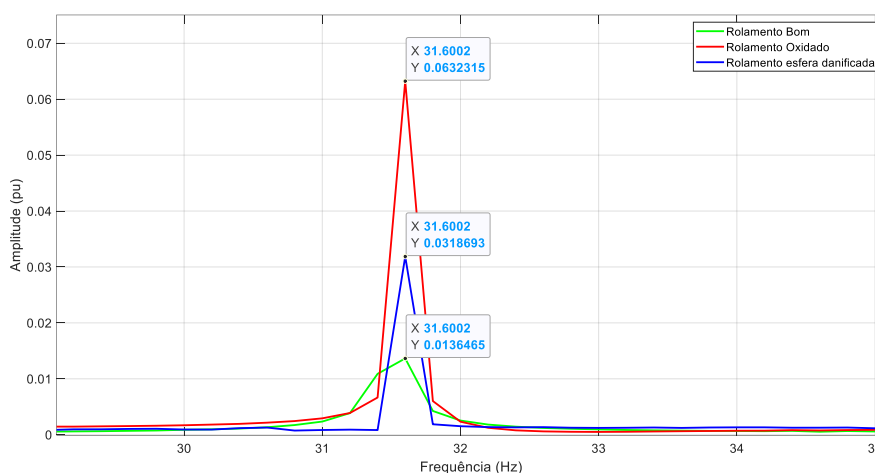
A análise dos espectros apresentados nas Figuras 13 e 14 revela variações significativas nas amplitudes de frequência entre os diferentes estados dos rolamentos, com o motor atuando em sua corrente nominal. Na Figura 13, observa-se que o rolamento bom gera baixas vibrações, com picos sutis indicando que o rolamento está funcionando de maneira eficiente. Por outro lado, o rolamento oxidado apresenta um pico de amplitude mais acentuado em 30 Hz, quando comparado ao rolamento com esferas danificadas. De forma complementar, a Figura 14, correspondente à segunda harmônica (120 Hz), reforça esse comportamento, evidenciando que falhas mecânicas nos rolamentos impactam de maneira distinta as componentes harmônicas do espectro de corrente. Esses resultados demonstram a sensibilidade da análise espectral na detecção precoce de falhas e validam a metodologia empregada neste trabalho.

4.3 Análise com o Motor operando em corrente de fator de serviço 3,6A.

Considerando o motor de indução operando em sua corrente de fator de serviço de 3,6A, as figuras 15 e 16 mostram respectivamente o espectro de frequência

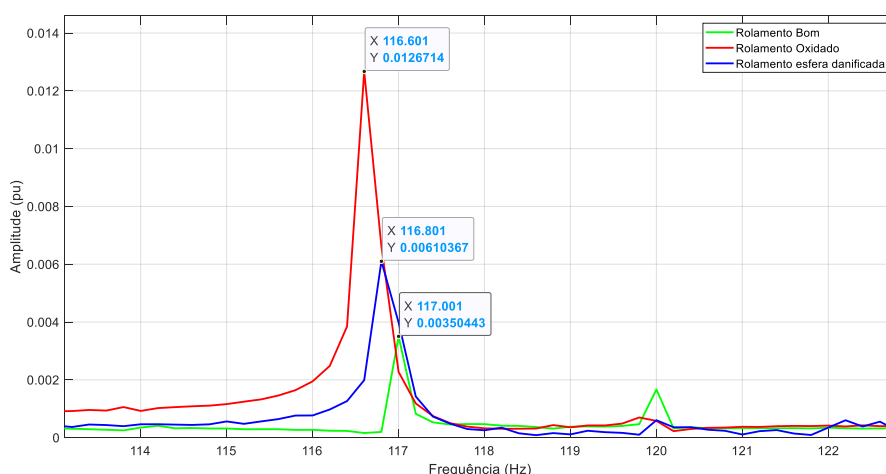
do sinal de BSF, com as condições de rolamento bom, rolamento oxidado e rolamento com esferas danificadas.

Figura 15 - Espectro próximo à 30 Hz: Motor de indução atuando em sua corrente de fator de serviço 3,6A.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Figura 16 - Espectro 2º harmônica próximo à 120 Hz: Motor de indução atuando em sua corrente de fator de serviço 3,6A.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

A análise dos espectros apresentados nas Figuras 15 e 16 revela variações significativas nas amplitudes de frequência entre os diferentes estados dos rolamentos, com o motor atuando em sua corrente de fator de serviço. Na Figura 15, observa-se que o rolamento bom gera baixas vibrações, com picos sutis indicando que o rolamento está funcionando de maneira eficiente. Por outro lado, o rolamento com esfera danificada e oxidado apresenta um pico de amplitude mais acentuado em 30 Hz. De forma complementar, a Figura 14, apresenta amplitudes elevadas próximas da segunda harmônica (120 Hz), evidenciando que falhas mecânicas nos rolamentos impactam de maneira distinta as componentes harmônicas do espectro de corrente. Esses resultados demonstram a sensibilidade da análise espectral na detecção precoce de falhas e validam a metodologia empregada neste trabalho.

4.4 Resultados das amplitudes obtidas nos ensaios.

A Tabela 2 ilustra os resultados das amplitudes obtidas nos ensaios realizados. Essa tabela sintetiza os valores registrados para cada ensaio, permitindo uma análise comparativa mais detalhada.

Tabela 2 – Resultado detalhado dos ensaios

Condições de operação do MIT		Amplitude (pu)					
		Frequência (Hz)					
		30	60	90	120	180	300
Rolamento Bom	A vazio	0,001	1	0,0001	0,002	0,01	0,003
	Corrente Nominal 2,8A	0,02	1	0,001	0,002	0,006	0,004
	Corrente fator de serviço 3,6A	0,01	1	0,0015	0,003	0,004	0
Rolamento com esferas danificadas	A vazio	0,0125	1	0,01	0,031	0,02	0,019
	Corrente Nominal 2,8A	0,049	1	0,029	0,008	0,018	0,008
	Corrente fator de serviço 3,6A	0,031	1	0,029	0,006	0,009	0,0024
Rolamento Oxidado	A vazio	0,024	1	0,028	0,044	0,025	0,034
	Corrente Nominal 2,8A	0,044	1	0,041	0,025	0,032	0,02
	Corrente fator de serviço 3,6A	0,063	1	0,03	0,012	0,011	0,0026

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

A análise da tabela 2 mostra que, para o rolamento com esferas danificadas, com o MIT operando em condições "a vazio", a maior amplitude ocorre na frequência de 120 Hz sendo de 0,031 pu. Em contrapartida, nas condições de operação "corrente nominal 2,8A" e "corrente fator de serviço 3,6A", as maiores amplitudes são observadas em 30 Hz sendo de 0,049 pu e 0,031 pu, respectivamente. No caso do rolamento oxidado, as maiores amplitudes são registradas na frequência de 120 Hz, com 0,044 pu para condições de operação do MIT "a vazio". Para condições de "corrente nominal 2,8A" e "corrente fator de serviço 3,6A", as maiores amplitudes são observadas na frequência de 30 Hz, com valores de amplitude de 0,044 pu e 0,063 pu, respectivamente. Este comportamento indica que a frequência de 30 Hz apresenta consistentemente as maiores amplitudes, o que pode ser indicativo de falhas mecânicas ou degradação dos rolamentos, destacando a importância de monitorar as variações de amplitude nas frequências mais relevantes para a detecção precoce de falhas.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho teve como objetivo investigar a aplicação da análise de vibração por meio da assinatura de corrente elétrica na detecção de falhas em rolamentos de motores de indução trifásicos. A metodologia adotada envolveu a simulação de diferentes condições de falha (rolamento oxidado e com esferas danificadas) e a operação do motor sob distintas cargas, com a coleta dos sinais realizada por meio de sensor de corrente SCT013 e posterior análise espectral via Transformada Rápida de Fourier (FFT). Os resultados obtidos demonstraram variações perceptíveis nas amplitudes dos espectros de frequência, o que permitiu identificar padrões associados a falhas nos rolamentos mesmo em operação a vazio. Esse comportamento valida o uso da análise de corrente como ferramenta não invasiva e de baixo custo para manutenção preditiva.

Em geral, os rolamentos com falhas apresentaram amplitudes mais elevadas nas frequências características (30, 60, 90, 120, 180 e 300 Hz), em comparação ao rolamento em bom estado. Destaca-se, por exemplo, que o rolamento com esferas danificadas operando a vazio gerou amplitude de 0,125 pu em 30 Hz, significativamente superior ao valor correspondente no rolamento sem falhas. Esse padrão de aumento da amplitude nas faixas críticas reforça a eficácia da metodologia proposta para identificar e distinguir o tipo e o grau de degradação dos rolamentos, mesmo sob variações operacionais do motor.

Entretanto, algumas limitações foram observadas ao longo do desenvolvimento. O sistema apresentou sensibilidade a ruídos elétricos, especialmente com o motor alimentado por inversor de frequência, o que inviabilizou ensaios com velocidades variadas. Por esse motivo os ensaios foram realizados via partida direta, e essa interferência ressalta a necessidade de implementar filtros adequados — tanto analógicos quanto digitais — para atenuar distorções e preservar os componentes relevantes da análise espectral.

Como proposta para trabalhos futuros, sugere-se o uso de técnicas de pré-processamento de sinais com filtros passa-faixa sintonizados nas frequências características de falhas, de modo a reduzir os efeitos do ruído e melhorar a acurácia diagnóstica. Além disso, recomenda-se a aplicação de redes neurais artificiais para a classificação automática das falhas detectadas, considerando os espectros extraídos como vetores de entrada. Essa abordagem pode contribuir para a construção de um sistema inteligente de diagnóstico, capaz de operar em tempo real e com maior robustez frente às variações de carga e às incertezas dos dados de campo.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16889**: Motores de indução alimentados por conversores de frequência - parâmetros de desempenho e critérios de aplicação. 1.0 ed. Rio de Janeiro, 60 p, 2020.

AZEEZ, Abid Abdul; ALKHEDHER, Mohammad; GADALA, Mohamed S. Thermal imaging fault detection for rolling element bearings. In: **2020 Advances in Science and Engineering Technology International Conferences (ASET)**. IEEE, 2020. p. 1-5.

BENITO, Cesar Luís Guimaraes et al. Análise biespectral em sinal de corrente do motor de indução trifásico para detecção de falha no estator Bispectrum analysis in three-phase induction motor current sign with for detection stator fault. 2023.

BIANCHINI, Carolina Alves et al. **Diagnóstico de falhas localizadas de rolamento em motores de indução trifásicos a partir de um modelo matemático**. 2023. Dissertação de Mestrado. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

BRITO, Jorge Nei. **Desenvolvimento de um sistema inteligente híbrido para diagnóstico de falhas em motores de indução trifásicos**. 2002. Tese de Doutorado. [sn].

CHAPMAN, Stephen J. **Fundamentos de máquinas elétricas [recurso eletrônico]**; tradução: Anatólio Laschuk. – 5. ed. Dados eletrônicos. – Porto Alegre: AMGH, 2013.

COSTA, Igor Brutkowski Vieira da et al. **Detecção de barra quebrada em rotores de motores de indução através da análise da deformação dinâmica do estator**. 2016. Dissertação de Mestrado. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

DA SILVA PEREIRA, Klariman Yasmin; GRANDE, Campo. Diagnóstico de falhas elétricas em motores de indução trifásico utilizando método de análise de vibração e análise do espectro de corrente. 2021.

DALMOLIM, Alexandre Alves. Bancada didática para ensaios de motores de indução trifásicos. 2019.

DALVAND, Fardin et al. Current noise cancellation for bearing fault diagnosis using time shifting. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 64, n. 10, p. 8138-8147, 2017.

DEMS, Maria; KOMEZA, Krzysztof. Designing an energy-saving induction motor operating in a wide frequency range. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 69, n. 5, p. 4387-4397, 2021.

DENG, Wu et al. A novel fault diagnosis method based on integrating empirical wavelet transform and fuzzy entropy for motor bearing. **IEEE access**, v. 6, p. 35042-35056, 2018.

DOS SANTOS, HERMAN LUCAS et al. PROPOSTA E IMPLEMENTAÇÃO DE UM SISTEMA NÃO-INVASIVO UTILIZANDO SINAIS SONOROS PARA DETECÇÃO DE FALHAS EM MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICO. In: **Congresso Brasileiro de Automática-CBA**. 2019.

FITZGERALD, Arthur Eugene; KINGSLEY, Charles; UMANS, Stephen D. *Electric machinery*. 2003.

GARCIA, Vilson. Detecção de faltas em motores de indução por meio de campo magnético externo auxiliado por conversor sigma-delta: estudo em rotor com barras rompidas. 2024.

GLOWACZ, Adam. Acoustic based fault diagnosis of three-phase induction motor. **Applied Acoustics**, v. 137, p. 82-89, 2018.

HECKBERT, Paul. Fourier transforms and the fast Fourier transform (FFT) algorithm. **Computer Graphics**, v. 2, n. 1995, p. 15-463, 1995.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC 60034-26**: Rotating electrical machines - Part 26: Effects of unbalanced voltages on the performance of three-phase cage induction motors. 1.0 ed. International Standard, 21 p, 2006.

LOPES, T. D. et al. Aplicação do Algoritmo Random Forest como Classificador de Padrões de Falhas em rolamentos de Motores de Indução. **XIII Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente, Porto Alegre**, 2017.

MARQUES, Ana Claudia; BRITO, Jorge Nei. Importância da manutenção preditiva para diminuir o custo em manutenção e aumentar a vida útil dos equipamentos. **Brazilian Journal of Development**, v. 5, n. 7, p. 8913-8923, 2019.

MARTINEZ-HERRERA, Ana L. et al. Multiple fault detection in induction motors through homogeneity and kurtosis computation. **Energies**, v. 15, n. 4, p. 1541, 2022.

MATEER, Todd. **Fast Fourier transform algorithms with applications**. 2008. Tese de Doutorado. Clemson University. 2008.

MEDEIROS, João Telésforo Nóbrega de. Fadiga de contato de discos metálicos não-conformes submetidos a ensaios a seco de rolamento cíclico. 2002.

NAYANA, B. R.; GEETHANJALI, Paul. Analysis of statistical time-domain features effectiveness in identification of bearing faults from vibration signal. **IEEE Sensors Journal**, v. 17, n. 17, p. 5618-5625, 2017.

NISHAT TOMA, Rafia; KIM, Jong-Myon. Bearing fault classification of induction motors using discrete wavelet transform and ensemble machine learning algorithms. **Applied Sciences**, v. 10, n. 15, p. 5251, 2020.

OJAGHI, Mansour; SABOURI, Mahdi; FAIZ, Jawad. Analytic model for induction motors under localized bearing faults. **IEEE Transactions on energy conversion**, v. 33, n. 2, p. 617-626, 2017.

OKWUOSA, Chibuzo Nwabufo; AKPUDO, Ugochukwu Ejike; HUR, Jang-Wook. A cost-efficient MCSA-based fault diagnostic framework for SCIM at low-load conditions. **Algorithms**, v. 15, n. 6, p. 212, 2022.

OTANI, Mario; MACHADO, Waltair Vieira. A proposta de desenvolvimento de gestão da manutenção industrial na busca da excelência ou classe mundial. **Revista Gestão Industrial**, v. 4, n. 2, 2008.

RADECKI, Andrzej et al. Evaluation of a diagnostic information on common electrical faults contained in signals of an inverter-fed AC IM drive with current-oriented control. In: **2016 10th International Conference on Compatibility, Power Electronics and Power Engineering (CPE-POWERENG)**. IEEE, 2016. p. 286-291.

RAMALHO, Geraldo Luis Bezerra et al. Detecção de falhas em motores elétricos através da classificação de padrões de vibração utilizando uma rede neural ELM. **Holos**, v. 4, p. 185-194, 2014.

RANJAN, Rakesh; GHOSH, Subrata Kumar; KUMAR, Manoj. Fault diagnosis of journal bearing in a hydropower plant using wear debris, vibration and temperature analysis: A case study. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering**, v. 234, n. 3, p. 235-242, 2020.

SOUALHI, Moncef et al. Health monitoring of bearing and gear faults by using a new health indicator extracted from current signals. **Measurement**, v. 141, p. 37-51, 2019.

SOUZA, Rodrigo Bastos de. Manutenção inteligente: plataforma para aquisição de dados em atuadores elétricos. 2018.

TAHKOLA, Mikko et al. A novel machine learning-based approach for induction machine fault classifier development—a broken rotor bar case study. **Energies**, v. 15, n. 9, p. 3317, 2022.

TOLIYAT, Hamid A. et al. **Electric machines: modeling, condition monitoring, and fault diagnosis**. CRC press, 2012.

VERARDI, Marcelo. Análise do escoamento e da geração de ruído no sistema de ventilação externo de um motor de indução trifásico. 2008.

WANG, Ziwei et al. Fault diagnosis of a rolling bearing using wavelet packet denoising and random forests. **IEEE Sensors Journal**, v. 17, n. 17, p. 5581-5588, 2017.

WEG, S. A. Guia de especificação— motores elétricos. set. 2024.



Esta obra está licenciada com Licença Creative Commons Atribuição-Não Comercial 4.0 Internacional.
[Recebido/Received: Dezembro 18 2024; Aceito/Accepted: Janeiro 29, 2025]