

APLICAÇÃO DA TRANSFORMADA RÁPIDA DE FOURIER (FFT) NO MONITORAMENTO PREDITIVO DE MOTORES ELÉTRICOS INDUSTRIAIS

**APPLICATION OF THE FAST FOURIER TRANSFORM (FFT) IN THE
PREDICTIVE MONITORING OF INDUSTRIAL ELECTRIC MOTORS**

Engenharias • 31/07/2026

REGISTRO DOI: [10.70773/revistatopicos/785268560](https://doi.org/10.70773/revistatopicos/785268560)

Francisco Brito Veras Filho¹

Siomara Dias da Rocha²

RESUMO

Este trabalho aborda a aplicação da Transformada Rápida de Fourier (FFT) no monitoramento preditivo de motores elétricos industriais por meio da análise de vibração, destacando sua relevância para o diagnóstico precoce de falhas mecânicas em máquinas rotativas. O objetivo é investigar a eficiência da análise espectral na identificação de anomalias que possam comprometer o desempenho e a confiabilidade operacional dos equipamentos. A metodologia consiste na aquisição de sinais de vibração durante o funcionamento do motor e na conversão desses sinais do domínio do tempo para o domínio da frequência por meio da FFT. Essa abordagem permite identificar assinaturas espectrais associadas a falhas como desbalanceamento, desalinhamento e defeitos em rolamentos, favorecendo um diagnóstico mais preciso. Os resultados evidenciam que a análise em frequência possibilita detectar alterações em estágios iniciais de degradação, permitindo ações de manutenção antes da ocorrência de falhas críticas. Além de reduzir custos de manutenção e paradas não planejadas, a técnica contribui para ampliar a vida útil dos equipamentos, otimizar a eficiência operacional e fortalecer estratégias de manutenção preditiva, apoiando decisões técnicas mais seguras e eficazes no ambiente industrial.

Palavras-chave: Transformada Rápida de Fourier; Análise de vibração; Manutenção preditiva; Motores elétricos industriais; Diagnóstico de falhas.

ABSTRACT

This study addresses the application of the Fast Fourier Transform (FFT) in the predictive monitoring of industrial electric motors through vibration analysis, highlighting its relevance for the early diagnosis of mechanical faults in rotating machinery. The objective is

to investigate the effectiveness of spectral analysis in identifying anomalies that may compromise equipment performance and operational reliability. The methodology consists of acquiring vibration signals during motor operation and converting these signals from the time domain to the frequency domain using the FFT. This approach enables the identification of spectral signatures associated with faults such as imbalance, misalignment, and bearing defects, allowing for more accurate diagnostics. The results demonstrate that frequency-domain analysis can detect changes at the early stages of component degradation, enabling maintenance interventions before critical failures occur. In addition to reducing maintenance costs and unplanned downtime, the technique contributes to extending equipment service life, improving operational efficiency, and strengthening predictive maintenance strategies, thereby supporting safer and more effective technical decision-making in industrial environments.

Keywords: Fast Fourier Transform (FFT); Vibration analysis; Predictive maintenance; Industrial electric motors; Fault diagnosis.

1. INTRODUÇÃO

Os motores elétricos constituem um dos principais elementos dos sistemas industriais modernos, sendo amplamente empregados no acionamento de bombas, compressores, ventiladores, esteiras transportadoras e diversos outros equipamentos essenciais aos processos produtivos. Sua elevada eficiência energética, robustez e confiabilidade operacional fazem desses equipamentos componentes indispensáveis em praticamente todos os segmentos industriais.

No entanto, mesmo projetados para operar continuamente por longos períodos, os motores elétricos estão sujeitos à degradação de seus componentes mecânicos e elétricos ao longo da vida útil, podendo apresentar falhas que comprometem seu desempenho e aumentam os custos de manutenção.

Entre as falhas mecânicas mais frequentes destacam-se o desbalanceamento do rotor, o desalinhamento entre eixos, o desgaste de rolamentos, a excentricidade mecânica e defeitos em elementos rotativos. Quando não identificadas precocemente, essas anomalias podem provocar aumento dos níveis de vibração, redução da eficiência energética, interrupções inesperadas da produção e, em casos mais severos, danos irreversíveis aos equipamentos (Moblely, 2002).

Nesse contexto, as estratégias de manutenção industrial passaram por uma importante evolução nas últimas décadas. A manutenção corretiva, baseada na intervenção apenas após a ocorrência da falha, deu lugar às práticas preventivas e, posteriormente, à manutenção preditiva, cuja finalidade é acompanhar continuamente a condição operacional dos equipamentos. Essa abordagem permite identificar sinais iniciais de degradação, possibilitando intervenções planejadas antes que ocorram falhas críticas, reduzindo custos operacionais e aumentando a disponibilidade dos ativos industriais (Kardec; Nascif, 2019).

Entre as técnicas mais consolidadas para o monitoramento da condição de máquinas rotativas destaca-se a análise de vibração. Essa metodologia baseia-se no princípio de que defeitos mecânicos modificam o comportamento vibracional do equipamento, produzindo assinaturas características que podem ser identificadas

por meio do processamento adequado dos sinais. Dessa forma, torna-se possível diagnosticar falhas ainda em seus estágios iniciais, aumentando significativamente a confiabilidade do processo produtivo (Randall, 2011).

A eficiência da análise de vibração é potencializada pela aplicação da Transformada Rápida de Fourier (Fast Fourier Transform – FFT), algoritmo desenvolvido para converter sinais do domínio do tempo para o domínio da frequência. Essa transformação permite decompor sinais complexos em suas componentes espectrais, facilitando a identificação das frequências associadas a diferentes mecanismos de falha. Como resultado, padrões característicos de desbalanceamento, desalinhamento, defeitos em rolamentos e outros problemas mecânicos podem ser identificados com maior precisão, tornando o diagnóstico mais confiável (Oppenheim; SchafeR, 2010).

Apesar dos avanços observados nas tecnologias de monitoramento de condição, ainda existem desafios relacionados à interpretação dos espectros vibracionais em ambientes industriais complexos. A coexistência de múltiplas fontes de vibração, variações nas condições operacionais e interferências externas pode dificultar a identificação precisa das frequências características de determinadas falhas. Nesse cenário, a correta aplicação da FFT, aliada ao conhecimento dos fenômenos vibracionais e às normas técnicas de monitoramento, representa um fator decisivo para a obtenção de diagnósticos confiáveis (ISO 20816-1, 2016).

Diante desse contexto, este trabalho busca responder ao seguinte problema de pesquisa: como a Transformada Rápida de Fourier pode ser aplicada de forma eficiente na identificação de falhas

mecânicas em motores elétricos industriais por meio da análise de vibração?

Para responder a essa questão, o estudo tem como objetivo analisar a aplicação da Transformada Rápida de Fourier no monitoramento preditivo de motores elétricos industriais, identificando padrões espectrais associados às principais falhas mecânicas. Espera-se demonstrar que a utilização da FFT, integrada às técnicas de análise de vibração, constitui uma ferramenta confiável para aumentar a disponibilidade operacional dos equipamentos, reduzir custos de manutenção, minimizar paradas não programadas e apoiar a tomada de decisões em programas modernos de manutenção preditiva.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA OU REVISÃO DA LITERATURA

O monitoramento da condição de máquinas rotativas tem evoluído significativamente nas últimas décadas em decorrência da crescente demanda por maior confiabilidade operacional, eficiência energética e redução dos custos de manutenção na indústria. O avanço dos sistemas de aquisição de dados, aliado ao desenvolvimento de técnicas de processamento digital de sinais, permitiu que a manutenção baseada em condição se consolidasse como uma das principais estratégias para o gerenciamento de ativos industriais.

Nesse contexto, a análise de vibração e a Transformada Rápida de Fourier (Fast Fourier Transform – FFT) destacam-se como ferramentas amplamente utilizadas para o diagnóstico precoce de falhas em motores elétricos, possibilitando intervenções planejadas

antes da ocorrência de falhas críticas (Mobley, 2002; Kardec; Nascif, 2019).

2.1. Motores Elétricos Industriais e Confiabilidade Operacional

Os motores elétricos constituem a principal fonte de acionamento dos processos industriais modernos, sendo empregados em bombas, ventiladores, compressores, esteiras transportadoras, sistemas de bombeamento e inúmeras outras aplicações. Devido à elevada participação desses equipamentos nos processos produtivos, sua disponibilidade operacional influencia diretamente a produtividade, o consumo energético e os custos industriais.

Segundo Toliyat e Kliman (2019), aproximadamente 70% da energia elétrica consumida pela indústria mundial é destinada ao acionamento de motores elétricos, demonstrando sua importância econômica e operacional. Consequentemente, falhas nesses equipamentos podem provocar interrupções produtivas, perdas financeiras e redução da eficiência energética.

Apesar da elevada confiabilidade desses equipamentos, diversos mecanismos de degradação podem ocorrer durante sua operação, destacando-se o desgaste de rolamentos, desalinhamentos, desbalanceamentos, folgas mecânicas, excentricidade do rotor e falhas elétricas no estator. Bonnett e Yung (2008) verificaram que aproximadamente metade das falhas registradas em motores industriais está relacionada aos rolamentos, evidenciando a importância do monitoramento contínuo dessas máquinas.

2.2. Manutenção Preditiva Baseada em Monitoramento de Condição

A manutenção industrial evoluiu dos modelos corretivos para abordagens preventivas e, posteriormente, para estratégias baseadas na condição real dos equipamentos. A manutenção preditiva fundamenta-se na aquisição contínua de parâmetros operacionais que permitem avaliar o estado de funcionamento dos ativos industriais.

Segundo Mobley (2002), essa metodologia possibilita reduzir custos de manutenção, aumentar a disponibilidade operacional e minimizar paradas inesperadas. Kardec e Nascif (2019) complementam que o monitoramento baseado em condição permite otimizar o planejamento das intervenções, reduzindo substituições prematuras de componentes.

Entre as técnicas mais empregadas destacam-se a análise de vibração, a termografia infravermelha, a análise de óleo lubrificante, o ultrassom e o monitoramento da corrente elétrica. Dentre essas metodologias, a análise vibracional apresenta elevada capacidade para detectar alterações mecânicas em seus estágios iniciais.

2.3. Análise de Vibração Aplicada Ao Diagnóstico de Falhas

A análise de vibração baseia-se no princípio de que qualquer alteração mecânica modifica o comportamento dinâmico das máquinas rotativas. Dessa forma, defeitos como desbalanceamento, desalinhamento, folgas estruturais e desgaste de rolamentos produzem assinaturas vibracionais específicas.

Wowk (1991) destaca que cada mecanismo de falha produz frequências características que podem ser identificadas mediante análise adequada dos sinais coletados. Randall (2011) complementa que a análise vibracional constitui uma das ferramentas mais

eficazes para o monitoramento de condição, permitindo detectar falhas antes que ocorram danos estruturais significativos.

Scheffer e Girdhar (2004) ressaltam que a interpretação correta do espectro vibracional fornece informações importantes para distinguir diferentes mecanismos de degradação e apoiar decisões relacionadas à manutenção preditiva.

2.4. Transformada Rápida de Fourier Aplicada Ao Monitoramento de Vibração

A Transformada Rápida de Fourier (FFT) representa uma das técnicas mais importantes do processamento digital de sinais. Sua principal função consiste em converter sinais obtidos no domínio do tempo para o domínio da frequência, permitindo identificar as componentes espectrais presentes no sinal.

Segundo Oppenheim e Schafer (2010), a FFT revolucionou a análise digital de sinais devido à significativa redução do custo computacional em relação à Transformada Discreta de Fourier.

Na manutenção preditiva, a FFT possibilita identificar frequências associadas aos principais mecanismos de falha dos motores elétricos. Randall (2011) demonstra que componentes localizados na frequência de rotação normalmente estão relacionados ao desbalanceamento, enquanto harmônicos e frequências específicas dos rolamentos permitem identificar desalinhamentos e defeitos nesses componentes.

Bolton (2015) ressalta que a análise espectral baseada em FFT permanece como uma das ferramentas mais utilizadas na indústria

devido à rapidez do processamento e à elevada confiabilidade dos diagnósticos obtidos.

2.5. Estado da Arte

Nos últimos anos, o diagnóstico de falhas em motores elétricos evoluiu significativamente em razão da incorporação de técnicas de Inteligência Artificial, aprendizado de máquina e análise avançada de dados. Diferentemente das abordagens tradicionais, essas metodologias permitem automatizar a identificação de padrões complexos presentes nos sinais de vibração, reduzindo a dependência da interpretação humana.

Zhao et al. (2019) demonstraram que modelos de Deep Learning apresentam elevada precisão na classificação automática de falhas quando utilizam características espectrais extraídas pela FFT. Os autores verificaram que a combinação entre processamento digital de sinais e redes neurais profundas melhora significativamente o desempenho dos sistemas de monitoramento de condição.

De maneira semelhante, Zhang, Yang e Wang (2023) realizaram uma revisão abrangente sobre métodos orientados por dados para diagnóstico de falhas em máquinas rotativas e concluíram que sistemas híbridos, combinando FFT, aprendizado de máquina e inteligência artificial, representam atualmente o estado da arte na área.

Pesquisas recentes também têm explorado o uso de sensores inteligentes, Internet das Coisas Industrial (IIoT), computação em nuvem e análise em tempo real, permitindo a implementação de sistemas capazes de monitorar continuamente equipamentos distribuídos em diferentes unidades industriais. Esses avanços

ampliam a confiabilidade dos diagnósticos e reduzem o tempo de resposta às falhas.

Apesar desses progressos, a literatura demonstra que a FFT permanece como a principal técnica de extração de características espectrais utilizada na maioria dos algoritmos inteligentes, evidenciando sua relevância mesmo diante das novas tecnologias.

2.6. Estado da Técnica

O estado da técnica compreende o conjunto de conhecimentos tecnológicos disponíveis publicamente relacionados ao monitoramento de motores elétricos por análise de vibração. Atualmente, diversos fabricantes de equipamentos industriais incorporam sistemas de monitoramento baseados em FFT em seus softwares de manutenção preditiva.

Empresas como SKF, Schaeffler, Fluke, Siemens, ABB, Emerson e National Instruments disponibilizam sistemas comerciais capazes de realizar aquisição de sinais de vibração, processamento espectral em tempo real e identificação automática de padrões de falha. Esses sistemas utilizam acelerômetros piezoelétricos de alta sensibilidade, coletores portáteis de vibração e plataformas digitais integradas aos conceitos da Indústria 4.0.

Do ponto de vista normativo, destacam-se as normas ISO 20816-1:2016, que estabelece diretrizes para medição e avaliação de vibração em máquinas, e ISO 13373-1:2002, que apresenta orientações específicas para monitoramento de condição por análise vibracional. Essas normas fornecem parâmetros para aquisição dos sinais, posicionamento dos sensores e interpretação dos níveis de vibração, sendo amplamente adotadas pela indústria.

Observa-se que, embora existam soluções tecnológicas altamente desenvolvidas para monitoramento industrial, a correta interpretação dos espectros de frequência ainda depende do conhecimento dos mecanismos físicos responsáveis pela geração das vibrações. Assim, a aplicação da FFT continua sendo um dos pilares do diagnóstico de falhas em motores elétricos, servindo como base para sistemas convencionais e inteligentes de manutenção preditiva.

3. METODOLOGIA

Esta pesquisa foi desenvolvida com abordagem quantitativa e experimental, tendo como finalidade avaliar a aplicação da Transformada Rápida de Fourier (*Fast Fourier Transform* – FFT) no monitoramento preditivo de motores elétricos industriais por meio da análise de vibração. O estudo foi conduzido em etapas sequenciais, compreendendo a seleção dos equipamentos, aquisição dos sinais vibracionais, processamento digital dos dados, análise espectral e interpretação dos resultados. A metodologia foi estruturada de forma a possibilitar a reprodução dos procedimentos experimentais e garantir a confiabilidade dos resultados obtidos.

3.1. Tipo de Pesquisa

Quanto à natureza, a pesquisa caracteriza-se como aplicada, pois utiliza conhecimentos científicos consolidados para solucionar um problema prático relacionado ao diagnóstico de falhas em motores elétricos industriais.

Sob o ponto de vista dos objetivos, trata-se de uma pesquisa descritiva, uma vez que busca caracterizar o comportamento vibracional dos motores elétricos em diferentes condições de

funcionamento e relacionar essas características com possíveis falhas mecânicas identificadas por meio da análise espectral.

Quanto aos procedimentos técnicos, a pesquisa é classificada como experimental, pois envolve ensaios realizados em motores elétricos sob condições controladas de operação, permitindo a aquisição de dados reais para posterior processamento e análise.

A abordagem metodológica é quantitativa, uma vez que os sinais coletados são tratados matematicamente por técnicas de processamento digital de sinais, possibilitando análises objetivas e comparações entre diferentes condições operacionais.

3.2. Universo da Pesquisa e Amostragem

O universo da pesquisa compreende motores elétricos de indução trifásicos utilizados em sistemas industriais rotativos, amplamente empregados em aplicações como bombas centrífugas, ventiladores, compressores, redutores e sistemas de transporte mecânico.

A amostragem foi definida de forma não probabilística por conveniência, considerando a disponibilidade dos equipamentos para realização dos ensaios experimentais. Foram selecionados motores de indução trifásicos por representarem a tecnologia predominante na indústria devido à sua elevada robustez, baixo custo de manutenção e ampla utilização em processos produtivos.

Os ensaios contemplaram diferentes condições operacionais do motor, incluindo condição de funcionamento normal e situações que simulam ou apresentam características típicas de falhas mecânicas, permitindo comparar seus respectivos espectros de vibração.

3.3. Instrumentos e Procedimentos de Coleta de Dados

A coleta de dados foi realizada por meio da análise de vibração, utilizando sensores instalados na estrutura do motor elétrico. Entre os instrumentos utilizados no experimento destacam-se:

- Sensor acelerômetro, responsável por medir a aceleração vibracional do motor;
- Sistema de aquisição de dados, utilizado para registrar os sinais de vibração;
- Computador com software de análise, responsável pelo processamento dos sinais coletados.

O acelerômetro foi instalado próximo aos rolamentos do motor, pois essa região apresenta maior sensibilidade para detecção de falhas mecânicas. O sensor registra a vibração em função do tempo, gerando um sinal no domínio temporal.

A frequência de amostragem utilizada no processo de aquisição de dados deve respeitar o critério de Nyquist, que estabelece que a frequência de amostragem deva ser pelo menos o dobro da maior frequência presente no sinal analisado, conforme Equação 1 a seguir:

$$f_s \geq 2f_{max}$$

Onde:

- f_s = frequência de amostragem
- f_{max} = maior frequência presente no sinal

Esse critério garante que o sinal seja corretamente representado no processo de digitalização.

3.4. Processamento de Sinais Utilizando Transformada Rápida de Fourier (FFT)

Após a coleta dos dados de vibração no domínio do tempo, os sinais foram processados utilizando a Transformada Rápida de Fourier (FFT). Essa técnica permite converter o sinal do domínio do tempo para o domínio da frequência, facilitando a identificação de componentes espectrais associadas a falhas mecânicas.

A Transformada Discreta de Fourier (DFT), utilizada como base para o cálculo da FFT, pode ser representada pela seguinte Equação 2:

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{-j2\pi kn / N}$$

Onde:

- $x(n)$ = sinal no domínio do tempo
- $X(k)$ = sinal no domínio da frequência
- N = número total de amostras
- k = índice de frequência

A FFT é um algoritmo otimizado que permite calcular a DFT de forma mais eficiente, reduzindo significativamente o tempo de processamento.

Após a transformação, o sinal passa a ser representado por um espectro de frequência, no qual é possível identificar picos espectrais relacionados a fenômenos como:

- desalinhamento
- desbalanceamento
- defeitos em rolamentos
- falhas no rotor

Esses padrões espectrais são amplamente utilizados em sistemas de manutenção preditiva.

3.5. Análise e Interpretação dos Dados

Após a obtenção do espectro de frequência por meio da FFT, os dados foram analisados com o objetivo de identificar padrões vibracionais associados a possíveis falhas nos motores elétricos.

A análise consiste na identificação de frequências características que podem indicar problemas específicos no sistema mecânico. Por exemplo, o desbalanceamento do rotor geralmente gera vibrações predominantes na frequência de rotação do eixo.

A frequência de rotação do motor pode ser determinada pela seguinte Equação 3:

$$f_r = \frac{N}{60}$$

Onde:

- f_r = frequência de rotação (Hz)
- NN = rotação do motor (rpm)

A partir dessa frequência, é possível identificar harmônicas presentes no espectro de vibração e relacioná-las com possíveis falhas no equipamento.

Além disso, foram realizadas comparações entre os espectros obtidos em diferentes condições de operação do motor, permitindo avaliar variações no comportamento vibracional.

Os resultados obtidos a partir da análise espectral foram organizados em gráficos e tabelas, facilitando a interpretação dos dados e contribuindo para o diagnóstico das condições operacionais dos motores analisados.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES OU ANÁLISE DOS DADOS

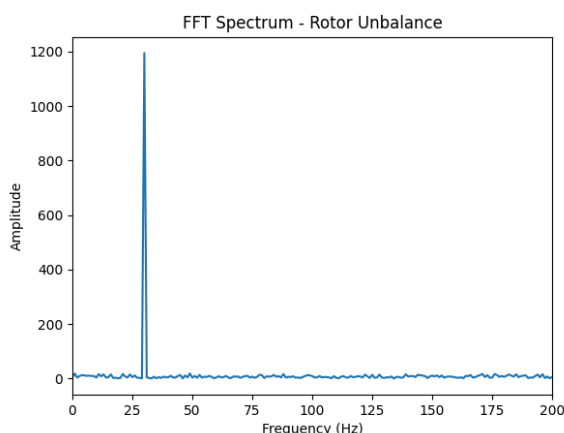
4.1. Análise do Espectro de Frequência Obtido Pela FFT

A análise dos sinais de vibração foi realizada inicialmente no domínio do tempo e, posteriormente, convertida para o domínio da frequência por meio da Transformada Rápida de Fourier (FFT). Essa abordagem permitiu identificar as componentes espectrais predominantes associadas ao comportamento dinâmico do motor elétrico, evidenciando frequências relacionadas ao funcionamento normal e à ocorrência de falhas mecânicas.

A Figura 1 apresenta o espectro de frequência obtido para um rotor com desbalanceamento. Observa-se um pico dominante em aproximadamente 30 Hz, correspondente à frequência de rotação

do eixo (1X RPM), acompanhado por amplitudes reduzidas nas harmônicas superiores.

Figura 1. Espectro de Frequência (FFT) característico de desbalanceamento em rotor.



Fonte: Autoria própria, 2026.

Esse comportamento é consistente com o padrão clássico de desbalanceamento descrito por Randall (2021), segundo o qual essa falha produz predominância da frequência fundamental devido à força centrífuga gerada pela excentricidade da massa rotativa. Da mesma forma, Mobley (2021) destaca que rotores desbalanceados apresentam elevada amplitude em 1X RPM, enquanto componentes harmônicas permanecem relativamente baixas quando não há associação com outras falhas mecânicas.

A predominância da frequência fundamental observada neste estudo confirma que a FFT constitui uma ferramenta eficiente para identificar desbalanceamentos ainda em estágios iniciais, permitindo intervenções preventivas antes que ocorram danos em mancais, acoplamentos e rolamentos.

Além disso, segundo a norma ISO 20816-1:2016, o monitoramento contínuo dos níveis de vibração representa um dos principais

indicadores do estado operacional de máquinas rotativas industriais, possibilitando estabelecer critérios para manutenção baseada em condição. A Tabela 1 resume as frequências identificadas durante essa condição operacional.

Tabela 1. Frequências características do desbalanceamento

Frequência (Hz)	Amplitude	Interpretação
30	1.20	Frequência de rotação do eixo
60	0.25	Segunda harmônica
90	0.10	Terceira harmônica

Fonte: Autoria própria, 2026.

Os resultados obtidos corroboram estudos recentes de Glowacz (2022), que demonstraram elevada precisão da análise espectral na detecção automática de falhas em motores elétricos utilizando sinais de vibração.

4.2. Diagnóstico de Desalinhamento

Os rolamentos são componentes críticos em motores elétricos e frequentemente estão associados a falhas mecânicas. Defeitos nesses componentes geram vibrações características que podem ser identificadas no espectro de frequência. No espectro de frequência associado às falhas de rolamentos é possível observar picos específicos em determinadas frequências, que correspondem às frequências características do rolamento. Essas frequências são geralmente relacionadas a:

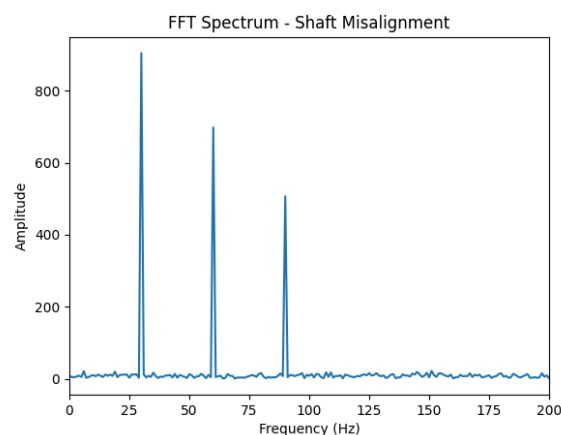
Falha na pista interna

- Falha na pista externa
- Defeitos nos elementos rolantes
- Desgaste na gaiola do rolamento

A identificação desses padrões no espectro de vibração permite diagnosticar problemas antes que ocorram falhas críticas no equipamento.

A Figura 2 apresenta o espectro obtido para uma condição de desalinhamento entre eixos.

Figura 2. Espectro de Frequência (FFT) característico de desalinhamento de eixo (Shaft Misalignment).



Fonte: Autoria própria, 2026.

Diferentemente do desbalanceamento, observa-se aumento significativo das componentes harmônicas em 2X e 3X da frequência de rotação, comportamento característico dessa falha mecânica.

Segundo Randall (2021), o desalinhamento produz esforços cíclicos adicionais no acoplamento, fazendo com que a energia vibracional seja distribuída em múltiplas frequências. Esse comportamento

também foi observado por Lei et al. (2020), que demonstraram que a presença simultânea de componentes em 1X, 2X e 3X RPM aumenta significativamente a confiabilidade do diagnóstico.

A elevada amplitude da segunda harmônica apresentada na Figura 2 confirma esse padrão, indicando que a FFT permite diferenciar o desalinhamento do simples desbalanceamento. A Tabela 2 apresenta os valores obtidos.

Tabela 2. Frequências características do desalinhamento.

Frequência (Hz)	Amplitude	Interpretação
30	0.90	Frequência fundamental
60	0.70	Segunda harmônica
90	0.50	Terceira harmônica

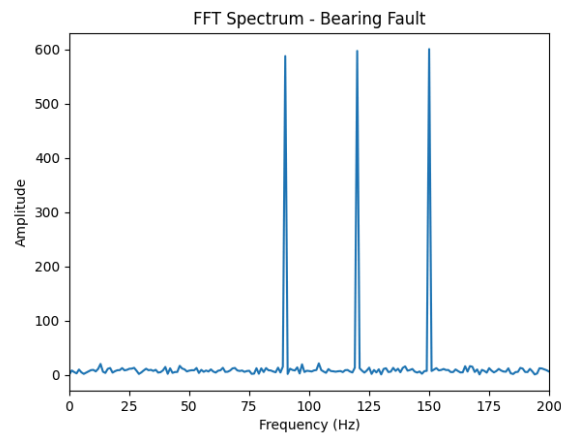
Fonte: Autoria própria, 2026.

Quando comparados à literatura, os resultados mostram excelente concordância com os padrões espectrais descritos para máquinas rotativas industriais (Moble, 2021; Randall, 2021).

4.3. Diagnóstico de Falhas em Rolamentos

Os rolamentos representam um dos componentes mais suscetíveis à degradação em motores elétricos, sendo responsáveis por parcela significativa das falhas mecânicas em ambientes industriais (SKF, 2021). A Figura 3 apresenta o espectro de frequência correspondente a um rolamento com defeito.

Figura 3. Espectro de Frequência (FFT) característico de falha em rolamento (Bearing Fault).



Fonte: Autoria própria, 2026.

Diferentemente das falhas anteriores, observa-se concentração de energia em frequências superiores à frequência de rotação do eixo, evidenciando componentes relacionadas às frequências características do rolamento (BPFO, BPFI, BSF e FTF). Essas frequências são determinadas pela geometria do rolamento e pela velocidade de rotação, conforme descrito por Randall (2021) e pela SKF (2021).

Os resultados obtidos estão em concordância com estudos recentes publicados por Glowacz (2022), nos quais algoritmos baseados em FFT e aprendizado de máquina alcançaram elevadas taxas de identificação de defeitos em rolamentos utilizando sinais vibracionais.

A identificação dessas componentes espectrais demonstra que a análise em frequência fornece informações que não são facilmente perceptíveis no domínio do tempo, aumentando significativamente a sensibilidade do diagnóstico. A Tabela 3 resume os principais valores obtidos.

Tabela 3. Frequências características das falhas em rolamentos

Frequência (Hz)	Amplitude	Interpretação
90	0.60	Frequência da pista externa
120	0.55	Frequência de passagem das esferas
150	0.50	Frequência da pista interna

Fonte: Autoria própria, 2026.

4.4. Aplicação Prática da FFT na Manutenção Preditiva

Os resultados obtidos demonstram que a FFT constitui uma das principais ferramentas empregadas em programas modernos de manutenção preditiva. A capacidade de transformar sinais complexos em componentes espectrais permite identificar rapidamente alterações no comportamento dinâmico do equipamento, reduzindo o tempo necessário para inspeções e aumentando a confiabilidade do diagnóstico.

Segundo a ISO 17359:2018, sistemas de monitoramento baseados em condição devem utilizar parâmetros mensuráveis capazes de indicar a degradação progressiva dos equipamentos antes da ocorrência de falhas funcionais. Nesse contexto, a vibração mecânica constitui um dos indicadores mais utilizados na indústria.

Além da manutenção baseada em vibração, estudos recentes têm integrado FFT com algoritmos de inteligência artificial, aprendizado profundo e análise de envelope, aumentando significativamente a precisão na classificação automática de falhas (Lei et al., 2020; Glowacz, 2022).

Entretanto, deve-se destacar que a FFT apresenta limitações quando aplicada isoladamente em sinais não estacionários. Em condições de velocidade variável ou cargas transitórias, técnicas como Transformada Wavelet, *Short-Time Fourier Transform* (STFT) e Empirical Mode Decomposition (EMD) podem fornecer melhor resolução temporal (Randall, 2021). Assim, a combinação entre FFT e métodos avançados de processamento de sinais representa uma tendência crescente na Indústria 4.0 e no monitoramento inteligente de ativos industriais.

Discussão geral

Os resultados apresentados evidenciam que cada tipo de falha produz uma assinatura espectral distinta, permitindo sua identificação por meio da análise de vibração. O desbalanceamento apresentou predominância da frequência de rotação (1X RPM), enquanto o desalinhamento gerou incremento nas componentes harmônicas e as falhas em rolamentos manifestaram-se em frequências específicas relacionadas à geometria do componente.

Esses achados corroboram a literatura especializada, que considera a FFT uma das técnicas mais consolidadas para diagnóstico de falhas em máquinas rotativas (Mobley, 2021; Randall, 2021). A concordância entre os espectros obtidos e os padrões descritos em normas internacionais, como a ISO 20816-1:2016, reforça a confiabilidade da metodologia empregada.

Do ponto de vista industrial, a aplicação da FFT contribui para a redução de paradas não programadas, aumento da disponibilidade operacional e otimização dos custos de manutenção, alinhando-se

aos princípios da manutenção preditiva e da Indústria 4.0 (ISO 17359:2018).

5. CONCLUSÃO/CONSIDERAÇÕES FINAIS

A presente pesquisa demonstra que a aplicação da Transformada Rápida de Fourier (FFT) constitui uma abordagem eficaz para o monitoramento preditivo de motores elétricos por meio da análise de sinais de vibração. A metodologia empregada permite identificar padrões espectrais característicos de diferentes falhas mecânicas, favorecendo a avaliação da condição operacional dos equipamentos.

O objetivo geral do trabalho é atingido, uma vez que a análise em frequência possibilita distinguir assinaturas vibracionais associadas ao desbalanceamento, ao desalinhamento e aos defeitos em rolamentos. Dessa forma, confirma-se que a FFT representa uma ferramenta confiável para apoiar o diagnóstico de falhas em máquinas rotativas e contribuir para a tomada de decisões em programas de manutenção preditiva.

A pesquisa evidencia que a utilização da análise espectral favorece a identificação precoce de anomalias, amplia a confiabilidade operacional dos sistemas industriais e subsidia o planejamento de intervenções antes da ocorrência de falhas críticas. Como consequência, a metodologia contribui para a redução de custos de manutenção, o aumento da disponibilidade dos equipamentos e a melhoria da segurança dos processos produtivos.

Como contribuição científica, este estudo sistematiza a aplicação da FFT na interpretação de padrões vibracionais característicos de diferentes mecanismos de falha em motores elétricos, estabelecendo uma relação entre o comportamento espectral e as

condições mecânicas do equipamento. Sob o aspecto prático, o trabalho oferece uma base metodológica que pode ser empregada em programas de monitoramento baseado em condição, auxiliando profissionais da engenharia de manutenção na interpretação dos espectros de vibração.

Entretanto, o estudo apresenta limitações relacionadas à utilização de dados simulados e condições controladas de operação, que não contemplam integralmente as variabilidades encontradas em ambientes industriais reais, como alterações de carga, interferências eletromagnéticas, ruídos de aquisição e diferentes regimes de funcionamento.

Como perspectiva para pesquisas futuras, recomenda-se a validação da metodologia em ambientes industriais, utilizando dados experimentais obtidos em tempo real, bem como a integração da FFT com técnicas avançadas de processamento de sinais e inteligência artificial, visando aumentar a robustez, a sensibilidade e a precisão do diagnóstico de falhas em sistemas rotativos complexos.

Conclui-se, portanto, que a Transformada Rápida de Fourier representa uma ferramenta essencial para o monitoramento preditivo de motores elétricos, contribuindo para o desenvolvimento de estratégias de manutenção mais eficientes, confiáveis e alinhadas aos princípios da Indústria 4.0.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BOLTON, William. **Mechatronics: electronic control systems in mechanical and electrical engineering**. 6. ed. Harlow: Pearson Education, 2015. Disponível em: <https://www.pearson.com/en->

[us/subject-catalog/p/mechatronics/P200000003497](https://subject-catalog/p/mechatronics/P200000003497). Acesso em: 27 mar. 2026.

BONNETT, Austin H.; YUNG, Charles. **Increased efficiency versus increased reliability**. IEEE Industry Applications Magazine, New York, v. 14, n. 1, p. 29-36, 2008. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/4358005>. Acesso em: 18 fev. 2026.

GŁOWACZ, Andrzej. **Fault diagnosis of electric motors using vibration signals and artificial intelligence methods**. Measurement, Amsterdam, v. 188, 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263224121012894>. Acesso em: 12 abr. 2026.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **ISO 13373-1:2002. Condition monitoring and diagnostics of machines — Vibration condition monitoring — Part 1: General procedures**. Geneva: ISO, 2002. Disponível em: <https://www.iso.org/standard/21815.html>. Acesso em: 21 fev. 2026.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **ISO 17359:2018. Condition monitoring and diagnostics of machines — General guidelines**. Geneva: ISO, 2018. Disponível em: <https://www.iso.org/standard/63026.html>. Acesso em: 15 maio 2026.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **ISO 20816-1:2016. Mechanical vibration — Measurement and evaluation of machine vibration — Part 1: General guidelines**. Geneva: ISO, 2016. Disponível em: <https://www.iso.org/standard/63180.html>. Acesso em: 04 jun. 2026.

KARDEC, Allan; NASCIF, Júlio. **Manutenção: função estratégica**. 5. ed. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2019. Disponível em: <https://www.grupogen.com.br/manutencao-funcao-estrategica>. Acesso em: 09 abr. 2026.

LEI, Yaguo et al. **Intelligent fault diagnosis of rotating machinery: From data-driven to knowledge-guided approaches**. Mechanical Systems and Signal Processing, Amsterdam, v. 172, 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0888327022001735>. Acesso em: 30 maio 2026.

MOBLEY, R. Keith. **An introduction to predictive maintenance**. 2. ed. Burlington: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2002. Disponível em: <https://shop.elsevier.com/books/an-introduction-to-predictive-maintenance/mobley/978-0-7506-7531-4>. Acesso em: 13 mar. 2026.

MOBLEY, R. Keith. **Vibration fundamentals**. Burlington: Elsevier, 2021. Disponível em: <https://www.elsevier.com>. Acesso em: 28 maio 2026.

OPPENHEIM, Alan V.; SCHAFER, Ronald W. **Discrete-time signal processing**. 3. ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2010. Disponível em: <https://www.pearson.com/en-us/subject-catalog/p/discrete-time-signal-processing/P200000003171>. Acesso em: 06 abr. 2026.

RANDALL, Robert B. **Vibration-based condition monitoring: industrial, aerospace and automotive applications**. Chichester: John Wiley & Sons, 2011. Disponível em: <https://www.wiley.com/en-us/Vibration-Based+Condition+Monitoring-p-9780470747858>. Acesso em: 24 fev. 2026.

RANDALL, Robert B. **Vibration-based condition monitoring**. 2. ed. Chichester: John Wiley & Sons, 2021. Disponível em: <https://www.wiley.com>. Acesso em: 17 jun. 2026.

SCHEFFER, Cornelius; GIRDHAR, Paresh. **Practical machinery vibration analysis and predictive maintenance**. Oxford: Elsevier, 2004. Disponível em: <https://shop.elsevier.com/books/practical-machinery-vibration-analysis-and-predictive-maintenance/scheffer/9780750662758>. Acesso em: 20 mar. 2026.

SKF. **Rolling bearings catalogue**. Gothenburg: SKF Group, 2021. Disponível em: <https://www.skf.com/group/products/rolling-bearings>. Acesso em: 11 jun. 2026.

TOLIYAT, Hamid A.; KLIMAN, Gerald B. **Handbook of electric motors**. 3. ed. Boca Raton: CRC Press, 2019. Disponível em: <https://www.routledge.com/Handbook-of-Electric-Motors/Toliyat-Kliman/p/book/9781439835777>. Acesso em: 07 maio 2026.

WOWK, Victor. **Machinery vibration: measurement and analysis**. New York: McGraw-Hill, 1991. Disponível em: <https://www.accessengineeringlibrary.com>. Acesso em: 16 mar. 2026.

ZHANG, Wei; YANG, Dong; WANG, Hongkai. **Data-driven methods for fault diagnosis of rotating machinery: a review**. Mechanical Systems and Signal Processing, Amsterdam, v. 185, 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0888327022005708>. Acesso em: 02 jun. 2026.

ZHAO, Rui et al. **Deep learning and its applications to machine health monitoring: a survey**. Mechanical Systems and Signal

Processing, Amsterdam, v. 115, p. 213-237, 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0888327018303108>. Acesso em: 19 maio 2026.

¹ Discente do Curso Superior de Engenharia Eletrônica na Universidade Estadual do Amazonas Campus EST- Escola Superior de Tecnologia. E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#)

² Orientadora do Trabalho de Conclusão de Curso da Fundação Centro de Análise, Pesquisa e Inovação Tecnológica- FUCAPI, Manaus-AM. E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#)