

ANÁLISE TÉCNICO-ECONÔMICA DE MOTORES ELÉTRICOS DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS

Sandro Medice de Oliveira¹, Frederico Silva Moreira¹, Andrea Teresa Riccio Barbosa¹

¹Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Campo Grande, Brasil
(sandro.medice@ufms.br)

Resumo: Este artigo tem como objetivo apresentar uma análise técnico-econômica aplicada a motores elétricos, com foco na modernização ou substituição, correlacionando aspectos construtivos, operacionais e energéticos. São contemplados fatores que podem justificar a racionalização do motor existente, como a análise do rendimento, dimensionamento, controle de torque, sistema de acoplamento com a carga, sistemas de refrigeração e práticas de manutenção preventiva e preditiva

Palavras-chave: eficiência energética; motores elétricos; viabilidade técnica; análise econômica

INTRODUÇÃO

A crescente demanda por energia elétrica nas indústrias tem intensificado a busca por soluções que promovam a eficiência energética, especialmente em equipamentos de alto consumo, como é o caso dos motores elétricos de indução trifásicos. Esses motores estão entre os principais consumidores de eletricidade no setor industrial, representando uma parcela significativa dos custos operacionais das empresas (Pinheiro, Gomes; Oliveira, 2018).

Motores elétricos de indução trifásicos são amplamente utilizados no setor industrial devido à sua confiabilidade e custo relativamente baixo, tendo como função converter energia elétrica em energia mecânica, impulsionando uma variedade de processos industriais essenciais, como bombas, ventiladores, compressores e sistemas de transporte contínuo (Neto *et al.*, 2023).

O princípio de funcionamento desses motores está baseado no fenômeno da indução eletromagnética. O estator, ao ser alimentado por corrente alternada trifásica, gera um campo magnético girante, que induz uma corrente elétrica no rotor, o qual passa a girar em função da interação entre o campo magnético induzido e o campo girante do estator (Anastacio *et al.*, 2020).

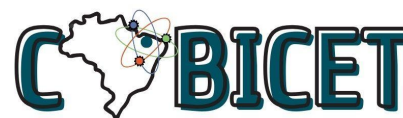
Podem ser descritos dois tipos principais de rotores em motores de indução trifásicos, sendo eles o rotor de gaiola de esquilo e o rotor bobinado, sendo que o mais utilizado é o tipo gaiola de esquilo, caracterizado pela simplicidade de construção e baixa manutenção. Já o rotor bobinado permite obter um controle mais preciso da velocidade, mas demanda cuidados adicionais devido à presença de escovas e anéis coletores (Neto *et al.*, 2023).

A eficiência energética dos motores de indução trifásicos está diretamente relacionada à qualidade de seu dimensionamento, condições de operação e estratégias de manutenção, sendo que o uso de inversores de frequência, por exemplo, permite ajustar a velocidade do motor conforme a necessidade da carga, contribuindo desta forma para a economia de energia elétrica e prolongamento da vida útil do equipamento (Pedro *et al.*, 2021).

Nóbrega Sobrinho *et al.* (2018) ressaltam que motores mal dimensionados, ou operando fora das condições ideais, estão sujeitos a falhas como sobrecarga, desequilíbrio de fases, vibrações excessivas e superaquecimento. Caso essas falhas não sejam monitoradas adequadamente, podem comprometer o desempenho, elevar os custos operacionais e representar riscos à segurança dos processos produtivos.

De acordo com Neto *et al.* (2023), as perdas de energia nos motores de indução trifásicos se dividem em constantes e variáveis. No primeiro caso, as perdas constantes incluem atrito e ventilação, enquanto as variáveis ocorrem principalmente nos enrolamentos, por efeito Joule. O controle dessas perdas é fundamental para garantir maior eficiência energética e reduzir o impacto ambiental associado ao uso prolongado desses equipamentos.

A relevância do tema se intensifica diante do reconhecimento da necessidade de racionalização do uso da energia, impulsionada por fatores econômicos, regulatórios e ambientais. No Brasil, o setor industrial responde por aproximadamente 44% do consumo de energia elétrica do país, sendo que os motores elétricos de indução consomem cerca de 55% desse total (Rezende; Bispo, 2015).



Rezende e Bispo (2015) ressaltam que a utilização de máquinas com baixo rendimento acarreta desperdício de energia e aumenta significativamente os custos com eletricidade. Nesse contexto, a necessidade de promover o uso de motores mais eficientes, como estratégia para reduzir custos e otimizar processos industriais, pode ser atendida de diferentes formas — desde a substituição direta por equipamentos de alto rendimento até a adoção de medidas complementares.

Entre essas medidas, podem ser mencionadas a utilização de inversores de frequência, a melhoria no acoplamento com a carga, o resfriamento forçado e a manutenção preditiva — ações que, se bem aplicadas, contribuem não apenas para a economia de energia, mas também para a ampliação da vida útil dos motores e para a melhoria da confiabilidade operacional (Thies; Zanoni, 2016).

Segundo Fortes, Sousa e Borba (2019), a adoção de motores de alto rendimento, regulamentados por normas como a NBR 17094-1 e a IEC 60034-30-1, proporciona ganhos substanciais em eficiência, reduzindo perdas elétricas e mecânicas, e naturalmente estes ganhos se refletem em redução da sobrecarga das usinas geradoras e no alívio da pressão sobre a matriz energética nacional.

Contudo, Pinheiro, Gomes e Oliveira (2018) reconhecem que nem sempre a substituição é a melhor alternativa. Em diversos casos, ações corretivas como o recondicionamento de motores, associadas à aplicação de ensaios normatizados, podem ser mais econômicas e eficientes, especialmente em motores de médio e grande porte, sendo que esta prática de recondicionamento, deve ser acompanhada de uma análise precisa de rendimento, já que rebobinagens mal executadas podem comprometer seriamente a performance do equipamento.

Outra oportunidade de promover a racionalização energética se dá por meio da substituição de motores sobredimensionados por modelos mais alinhados à carga real. Este fenômeno do sobredimensionamento é comum em instalações industriais, acarretando em baixo rendimento e desperdício de energia. Portanto, a substituição, desde que planejada pode contribuir de forma significativa para a redução do custo de operação e manutenção, ao elevar o desempenho do sistema (Rezende; Bispo, 2015).

Estes casos permitem afirmar que a análise técnico-econômica do ciclo de vida dos motores também é essencial na tomada de decisão, sendo que a economia gerada pode ser avaliada a partir do cálculo da economia anual de energia (EAE), associando-se as tarifas de energia, horas de operação e rendimento dos motores, abordagem que oferece uma estimativa realista do retorno do investimento e

facilita a escolha entre manutenção corretiva, recondicionamento ou troca completa (Fortes; Sousa; Borba, 2019).

Para além da perspectiva técnica e econômica, o impacto ambiental do uso de motores ineficientes não pode ser negligenciado, considerando que o descarte inadequado de motores antigos, a pegada de carbono e o uso de materiais não recicláveis são fatores que reforçam a necessidade de políticas de sustentabilidade associadas à gestão de motores elétricos. Nesse sentido, a aplicação de normas como a ISO 50001 contribui para o desenvolvimento de sistemas de gestão energética mais eficientes e alinhados com os objetivos globais de desenvolvimento sustentável (Thies; Zanoni, 2016).

Partindo dessas considerações, o objetivo deste estudo é realizar uma análise técnico-econômica da utilização de motores de indução trifásicos em ambientes industriais, com foco na viabilidade de modernização ou substituição desses equipamentos. A análise considera suas características construtivas, eficiência energética, custos associados e impacto ambiental, com base em dados de estudos de caso e em referências normativas atualizadas.

MATERIAL E MÉTODOS

A metodologia representa o conjunto de procedimentos sistemáticos que orientam o pesquisador ao longo de sua investigação, garantindo a organização lógica do estudo e permitindo a obtenção de resultados consistentes e válidos. Conforme argumenta Gil (2008), os procedimentos metodológicos são os instrumentos que estruturam a trajetória do pesquisador. Por sua vez, Andrade (2002) define método como o caminho adotado para alcançar um objetivo específico, a partir de estratégias e técnicas apropriadas à natureza da investigação.

De acordo com Silva e Menezes (2005), é possível classificar uma pesquisa com base em sua abordagem, natureza, objetivos e procedimentos adotados. Neste estudo, seguiram-se as etapas metodológicas de definição do tema, formulação do problema, delimitação dos objetivos, escolha da metodologia, coleta e análise de dados, interpretação dos resultados e elaboração das conclusões.

A investigação é caracterizada como descritiva, pois busca levantar e descrever, com riqueza de detalhes, os aspectos técnicos e operacionais relacionados aos motores de indução trifásicos, bem como sua aplicação no contexto industrial (Silva; Menezes, 2005). Trata-se ainda de uma pesquisa exploratória, tendo em vista seu propósito de ampliar o entendimento acerca da viabilidade técnica e econômica da modernização ou substituição de motores de baixa eficiência.

Segundo Yin (2015), esse tipo de pesquisa é apropriado quando se deseja obter uma visão aprofundada de um fenômeno pouco explorado, o que é pertinente neste trabalho ao investigar os critérios que justificam ou não a substituição de motores antigos por modelos de alto rendimento. A pesquisa assume finalidade descritiva ao buscar compreender as características construtivas e operacionais dos motores elétricos, relacionando-as com o desempenho energético, custos operacionais e condições de instalação.

A coleta de dados é realizada por meio de estudos de caso, análises técnicas e revisão de dados documentais, permitindo ao pesquisador interpretar comportamentos de desempenho e propor alternativas de eficiência energética baseadas em evidências práticas (Gil, 2008; Goldenberg, 2007). Classifica-se também como uma pesquisa básica, uma vez que se orienta para a produção de novos conhecimentos sobre o comportamento dos motores de indução trifásicos, sem a pretensão de desenvolver um produto comercial.

Conforme apontam Gerhardt e Silveira (2009), esse tipo de pesquisa busca compreender fenômenos e ampliar o conhecimento científico de maneira geral, com foco na formulação de fundamentos teóricos. Ainda segundo Fonseca e Moraes (2002), a pesquisa básica pode ir além da simples revisão bibliográfica, incorporando dados técnicos de equipamentos e resultados obtidos a partir de diagnósticos energéticos aplicados, o que confere atualidade e relevância à discussão proposta.

Essa abordagem é reforçada por Prodanov e Freitas (2013), que destacam a importância da coleta de informações contextuais para enriquecer a fundamentação e aplicação teórica. A abordagem qualitativa é utilizada nesta pesquisa, com base na análise detalhada das variáveis envolvidas no desempenho energético dos motores elétricos e suas implicações econômicas. De acordo com Bicudo (2011), os dados qualitativos são apropriados quando se busca compreender realidades complexas, que envolvem múltiplas dimensões e interpretações.

Essa abordagem permite examinar aspectos subjetivos e contextuais relacionados às decisões de substituição ou reaproveitamento de motores elétricos, considerando desde fatores técnicos e operacionais até impactos ambientais e econômicos. Conforme destacam Gonçalves e Meirelles (2004), a pesquisa qualitativa visa compreender a dinâmica das relações envolvidas em um fenômeno, permitindo ao pesquisador interpretar com profundidade os dados e extrair significados relevantes para o tema.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Características e técnicas operacionais dos motores de indução trifásicos

O motor elétrico é um dispositivo responsável por converter energia elétrica em energia mecânica, atingindo sua maior eficiência quando opera com cargas entre 75% e 100% da sua potência nominal (Anastacio *et al.*, 2020). De forma geral, motores elétricos são máquinas capazes de transformar a energia elétrica fornecida pela rede em energia mecânica. No setor industrial, os motores de indução trifásicos se destacam como os mais utilizados entre os dispositivos de corrente alternada para o acionamento de cargas mecânicas (Neto *et al.*, 2023).

Pedro *et al.* (2021) definem o motor de indução como o “coração da indústria”, já que sua ausência inviabilizaria o funcionamento eficiente de equipamentos como braços robóticos, esteiras transportadoras, entre outras aplicações. Além disso, esses motores apresentam baixo custo, são de fácil transporte, limpeza e simples operação. Segundo Neto *et al.* (2023), com base no Anuário Estatístico de Energia Elétrica, a indústria foi o maior consumidor de energia elétrica no Brasil em 2021, representando 36,3% do total consumido no país.

Esse alto consumo está diretamente relacionado ao uso intenso e contínuo dos motores elétricos, justificando o título de “coração da indústria” atribuído a eles (Neto *et al.*, 2023). A velocidade de funcionamento desses motores pode ser ajustada com o uso de um inversor de frequência, já que o número de rotações por minuto (RPM) depende diretamente da frequência aplicada na entrada do circuito (Pedro *et al.*, 2021).

Uma das principais características do motor de indução é que apenas o estator é conectado à rede elétrica. As correntes que circulam no rotor são geradas por indução eletromagnética, o que explica sua denominação como “motor de indução” (Pedro *et al.*, 2021). Esse tipo de motor, ilustrado na Figura 1 e inventado por Nikola Tesla, é amplamente utilizado devido à sua robustez, simplicidade de construção, baixo custo e alta eficiência (Anastacio *et al.*, 2020).

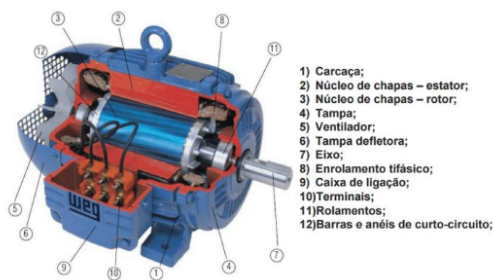


Figura 1. Motor elétrico de indução trifásico

De acordo com Anastacio *et al.* (2020), a estrutura básica de um motor elétrico é composta pelos seguintes componentes:

- Rotor: acoplado ao eixo, é o responsável por transmitir a energia mecânica gerada para a carga;
- Estator: abriga as bobinas que produzem os campos magnéticos e o núcleo, formado por chapas metálicas, que serve de suporte estrutural para essas bobinas;
- Ventilador: atua na dissipação de calor, auxiliando no resfriamento do motor;
- Rolamentos: permitem o giro do eixo em relação à carcaça, reduzindo o atrito e o desgaste.

Pedro *et al.* (2021) também destacam a carcaça, estrutura que sustenta todo o conjunto do motor. Essa parte geralmente é feita de ferro fundido, aço ou alumínio injetado, materiais resistentes à corrosão e que frequentemente apresentam aletas para melhorar a ventilação. Além disso, o autor menciona o núcleo de chapas magnéticas e o enrolamento trifásico, formado por três conjuntos idênticos de bobinas – uma para cada fase – que compõem o sistema trifásico conectado à rede elétrica.

O estator, parte fixa do motor, recebe a corrente elétrica e gera o campo eletromagnético necessário para o funcionamento do equipamento. Esse campo, por sua vez, induz uma força magnetomotriz no rotor, que é a parte móvel e gira em torno de seu próprio eixo devido à interação com esse campo magnético, gerando o torque. Ambos – estator e rotor – compartilham um mesmo eixo, no qual estão inseridos os enrolamentos que formam os três circuitos simétricos do sistema trifásico. É a atuação conjunta dessas partes que permite a conversão da energia elétrica em energia mecânica (Neto *et al.*, 2023).

Existem diversos tipos de motores de indução disponíveis no mercado, desenvolvidos para atender às mais variadas demandas da indústria (Anastacio *et al.*, 2020). A Figura 2 apresenta os dois principais tipos de rotores utilizados em motores de indução: o rotor em gaiola de esquilo e o rotor bobinado.



Figura 2. Comparação entre o rotor gaiola de esquilo e o rotor bobinado.

Segundo Neto *et al.* (2023), o rotor bobinado apresenta algumas vantagens específicas em relação a outros tipos de rotores, destacando-se pela

capacidade de ajustar a velocidade do motor por meio do controle das correntes, de acordo com diferentes níveis de carga. Essa característica é possível em decorrência da variação da resistência em um reostato, o que altera o valor do escorregamento e, por consequência, modifica a velocidade do rotor, otimizando a relação torque-velocidade para diversas aplicações. Além disso, a alteração da tensão e da frequência fornecidas ao motor pode ser realizada por meio do uso de inversores de frequência, conforme ilustra a Figura 3.



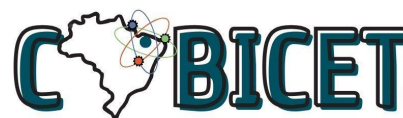
Figura 3. Inversor de frequência

Conhecer as características específicas da carga que será acionada é essencial para escolher o motor mais adequado. Um motor com maior rendimento apresenta melhor eficiência e menores perdas energéticas provocadas por fatores como aquecimento e atrito. O uso de materiais de alta qualidade em sua fabricação também contribui significativamente para reduzir essas perdas e melhorar o desempenho do equipamento (Anastacio *et al.*, 2020).

Na indústria, uma parcela significativa das aplicações de motores está relacionada às chamadas cargas centrífugas, como bombas, ventiladores e compressores. Nestes casos, o controle do fluxo pode ser obtido pelo ajuste da velocidade dos motores com o uso de inversores de frequência, representando um grande potencial para a redução do consumo energético. Entre os principais benefícios desse recurso estão a redução de custos, o controle remoto, a versatilidade, o aumento da qualidade e da produtividade, além de um uso mais eficiente da energia (Anastacio *et al.*, 2020).

Apesar de suas vantagens, Neto *et al.* (2023) observam que os rotores bobinados são empregados apenas em aplicações específicas. Isso se deve, principalmente, à alta demanda de manutenção dos anéis coletores e das escovas de carvão, bem como à elevada inércia desses rotores.

De modo geral, os motores de indução são considerados altamente confiáveis e exigem pouca manutenção. No entanto, como qualquer



equipamento, eles estão sujeitos ao desgaste e eventual falha, influenciados por fatores como o ambiente de operação, o regime de trabalho, a forma de instalação e características do processo de fabricação. Um exemplo recorrente de falha em motores de indução trifásicos é a ruptura de barras do rotor, bastante comum em diversas aplicações industriais (Nóbrega Sobrinho *et al.*, 2018).

Correntes de partida elevadas, especialmente em situações de ventilação insuficiente, podem causar sérias perturbações térmicas e mecânicas no motor, resultando em trincas ou até mesmo na quebra das barras do rotor. Além disso, cargas mecânicas de natureza pulsante, como as geradas por compressores alternativos ou trituradores de carvão, impõem elevados níveis de tensão mecânica sobre a gaiola do rotor. Outro fator que pode contribuir para a quebra dessas barras são falhas no processo de fabricação da própria gaiola do rotor (Nóbrega Sobrinho *et al.*, 2018).

Lucena Júnior (2019) classifica as falhas em rolamentos em três categorias principais: defeitos em ponto único, defeitos em múltiplos pontos e rugosidade generalizada. O defeito em ponto único, também conhecido como falha cíclica ou localizada, afeta apenas um componente do rolamento e pode ser identificado por meio de uma frequência característica presente nos sinais de vibração, corrente elétrica, ruído ou emissão acústica.

Por outro lado, as falhas por rugosidade generalizada — também chamadas de falhas distribuídas ou não cíclicas — resultam da degradação de uma extensa área da superfície do rolamento, que se torna áspera, irregular ou deformada. Nesse caso, não há um ponto específico de falha a ser identificado. Esse tipo de desgaste pode ser causado por contaminação, falta ou perda de lubrificação, passagem de corrente elétrica pelo eixo do motor, desalinhamento ou até pelo agravamento de falhas previamente localizadas (Lucena Júnior, 2019).

O desalinhamento ocorre quando o eixo do motor não está devidamente alinhado com a carga ou com o componente de acoplamento. Esse desalinhamento pode transferir forças danosas do eixo para o motor, provocando vibrações axiais e radiais no sistema, desgaste prematuro de rolamentos, vedações e acoplamentos, elevação da temperatura na carcaça próxima aos rolamentos, vazamentos de óleo nas vedações dos mancais, aumento da temperatura do óleo e até afrouxamento dos parafusos de fixação. Esses efeitos culminam em perda de energia e redução da eficiência operacional do motor (Pedro *et al.*, 2021).

Características predominantes na avaliação da adequação dos motores

A confiabilidade e a disponibilidade dos motores de indução são fatores fundamentais para assegurar o funcionamento contínuo e eficiente das operações industriais (Araújo, 2022). De acordo com Louzada *et al.* (2022), esses motores são responsáveis por aproximadamente 40% do consumo global de energia elétrica, e esse número pode chegar a cerca de 50% nos países desenvolvidos. Apesar de sua construção robusta, os motores de indução trifásicos (MITs) estão sujeitos a uma variedade de falhas, tanto de origem elétrica quanto mecânica.

Durante sua operação, esses motores enfrentam inevitáveis tensões mecânicas, elétricas, térmicas e ambientais, resultantes de fatores como variações na carga externa, instabilidades na alimentação elétrica, superaquecimento, falhas na lubrificação, vedação inadequada, ambientes com alto nível de poeira, falhas de fabricação e o próprio desgaste natural ao longo do tempo. Tais condições podem ocasionar falhas em diferentes componentes do motor (Araújo, 2022).

Araújo (2022) enfatiza a importância de manter os motores em bom estado de funcionamento, pois qualquer falha pode levar à paralisação parcial ou completa da produção, resultando em prejuízos financeiros significativos. Segundo o autor, os principais responsáveis por falhas nos motores elétricos são os rolamentos e os estatores. No entanto, quando essas falhas são identificadas precocemente por meio de manutenção preditiva, é possível prolongar a vida útil do equipamento e evitar danos maiores.

Entre as falhas mecânicas mais comuns estão: defeitos nos rolamentos, excentricidade do rotor, flexão ou desalinhamento do eixo, desalinhamentos provocados por acoplamentos mal posicionados, contaminações internas, entre outros. Por outro lado, falhas elétricas frequentes envolvem curto-circuitos ou rupturas em espiras do estator, bem como quebras em barras ou anéis terminais do rotor (Louzada *et al.*, 2022).

Grandezas elétricas como corrente, tensão e torque também podem fornecer indicativos relevantes sobre o estado operacional do motor, tornando-se ferramentas eficazes para a detecção precoce de falhas (Louzada *et al.*, 2022). Estudos e pesquisas voltadas ao setor industrial indicam que uma parcela significativa das falhas em motores elétricos de indução tem origem no estator (Louzada *et al.*, 2022). Segundo Araújo (2022), a distribuição estimada das falhas nos componentes desses motores é a seguinte:

- Falhas nos rolamentos: entre 41% e 42%
- Falhas nos enrolamentos do estator: entre 28% e 36%
- Falhas no rotor: entre 8% e 9%

- Outros tipos de falhas: entre 14% e 28%

Com base nesses dados, constata-se que os problemas nos rolamentos e nos enrolamentos do estator representam juntos pelo menos 69% das falhas totais nos motores de indução. Ainda que a ocorrência de falhas no rotor ou no eixo seja proporcionalmente menor, os danos mais severos aos rolamentos geralmente estão relacionados a condições como excentricidade do rotor, desalinhamento ou desbalanceamento do eixo, e, em alguns casos, falhas no enrolamento causadas pelo atrito com rotores danificados ou desalinhados (Araújo, 2022).

Em complemento, Pinheiro, Gomes e Oliveira (2018) destacam que a norma brasileira NBR 17094-3:2018 trata especificamente dos motores de indução trifásicos, estabelecendo os ensaios e procedimentos necessários para a avaliação de seu rendimento. Conforme a norma, o primeiro passo é a determinação dos parâmetros do circuito equivalente, que deve ser realizada por meio de três ensaios fundamentais:

- Ensaio de resistência do enrolamento do estator;
- Ensaio com rotor bloqueado;
- Ensaio a vazio.

Após a realização dos ensaios elétricos iniciais, procede-se com o ensaio térmico, cuja finalidade é determinar a temperatura de referência na qual os parâmetros do circuito equivalente devem estar baseados. Esse procedimento é essencial para que se possa calcular o rendimento real do motor em condições padronizadas. Em seguida, realiza-se um ensaio de carga variável, no qual se altera a carga aplicada ao eixo do motor de indução trifásico (MIT), com o objetivo de determinar o rendimento do motor sob diferentes níveis de carregamento (Pinheiro; Gomes; Oliveira, 2018).

O monitoramento baseado na condição operacional da máquina é uma prática que visa melhorar o desempenho e a eficiência dos motores, prolongando sua vida útil e aumentando a produtividade. Esse tipo de monitoramento contribui significativamente para a redução de danos internos e externos, prevenindo falhas inesperadas e diminuindo o tempo de paradas não programadas (Lyra, 2019).

Os métodos de detecção de falhas em motores de indução trifásicos geralmente se baseiam na aquisição de sinais relacionados ao seu funcionamento, como corrente elétrica, vibrações mecânicas e emissões acústicas, que são posteriormente processados para a extração de informações relevantes sobre o estado da máquina. A incorporação de sistemas inteligentes a esses

métodos tradicionais tem sido amplamente pesquisada e aplicada, visando aprimorar a detecção e o diagnóstico de falhas (Lyra, 2019). A Figura 4 apresenta um esquema que ilustra a classificação dos tipos de falhas.

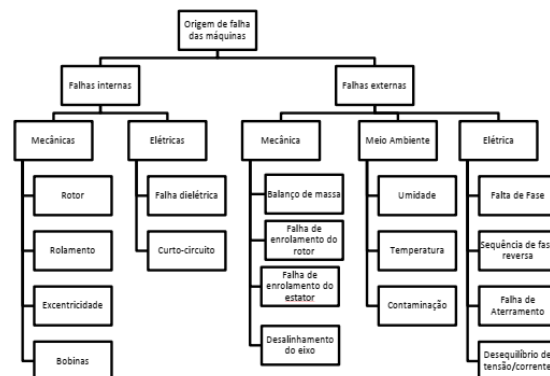


Figura 4. Classificação das falhas

Segundo Louzada *et al.* (2022), a literatura técnica apresenta uma variedade de estudos voltados à identificação de falhas em motores de indução trifásicos (MITs), empregando métodos como análise espectral, análise discriminante linear, entre outras técnicas. Em muitos desses trabalhos, é comum a combinação de diferentes abordagens com o intuito de aprimorar a caracterização das falhas. No entanto, observa-se que, na maioria dos casos, não há uma investigação aprofundada sobre quais atributos ou variáveis possuem maior relevância na identificação de defeitos, o que poderia potencializar a precisão dos diagnósticos.

Os parâmetros do circuito equivalente do motor de indução trifásico têm papel fundamental em qualquer estudo técnico envolvendo essa máquina, uma vez que todo o modelo matemático do motor é formulado com base nessas grandezas. Por esse motivo, é essencial que esses parâmetros sejam determinados com a maior precisão possível. A norma NBR 17094-3:2018 apresenta, de forma detalhada, os procedimentos que devem ser seguidos na execução dos ensaios destinados à obtenção desses parâmetros (Pinheiro; Gomes; Oliveira, 2018).

Análise Termográfica

O ensaio térmico tem como finalidade avaliar a elevação de temperatura em partes específicas do motor, acima da temperatura ambiente, quando este opera sob uma condição de carga determinada (Pinheiro; Gomes; Oliveira, 2018). Durante sua operação, o motor elétrico realiza a conversão da energia elétrica em energia mecânica e também térmica, sendo esta última uma consequência inevitável do funcionamento (Araújo, 2022).

Segundo Araújo (2022), quanto maior for o esforço mecânico exigido do motor, maior será a dissipação de calor gerada por esse trabalho. Contudo, existe um limite máximo de temperatura que os componentes internos e externos do motor podem suportar. O aquecimento excessivo pode ser um sinal indicativo de falhas ou anomalias no funcionamento do equipamento.

Uma das formas mais eficazes de identificar essas condições é por meio da análise termográfica, uma técnica não invasiva utilizada para avaliar o estado térmico do motor. Essa análise faz uso de câmeras sensíveis à radiação infravermelha, capazes de captar o calor emitido pelos componentes do motor e transformá-lo em imagens térmicas. Através dessas imagens, é possível mapear visualmente as regiões com diferentes temperaturas superficiais, permitindo identificar pontos críticos e prevenir falhas por superaquecimento (Araújo, 2022).

Método de detecção via emissão sonora

Dentre os métodos que vêm ganhando destaque nas últimas décadas, destaca-se a análise por emissão acústica, impulsionada pela popularização e redução de custos dos dispositivos de medição sonora. O uso de sinais sonoros tem se mostrado eficaz no aumento da confiabilidade dos sistemas de diagnóstico, uma vez que alterações audíveis podem ser identificadas precocemente, permitindo a detecção antecipada de falhas (Nóbrega Sobrinho; Sena; Lima Filho, 2021).

Segundo Lyra (2019), a vibração pode ser definida como a oscilação de um corpo em torno de uma posição de equilíbrio. Em máquinas, esse fenômeno pode se transformar em um processo destrutivo, levando à falha por fadiga dos componentes. Nesse contexto, a vibração representa uma resposta às forças dinâmicas, que ocorrem em diferentes frequências e se propagam por toda a estrutura do equipamento. Essas frequências podem ser identificadas e, em muitos casos, associadas diretamente a tipos específicos de falhas.

Cada componente da máquina produz uma excitação característica, gerando padrões próprios de vibração, o que torna a análise vibracional uma ferramenta altamente eficiente para diagnóstico. Justamente por essa particularidade, defeitos em determinados elementos da máquina podem ser detectados com precisão (Lyra, 2019).

Em um estudo experimental descrito por Nóbrega Sobrinho, Sena e Lima Filho (2021), foi realizado um ensaio com o motor operando a vazio, com uma carga de 25 Nm, correspondente a 122,5% da carga nominal. A Figura 5 apresenta a distribuição de energia no enrolamento para condições com e sem falha.

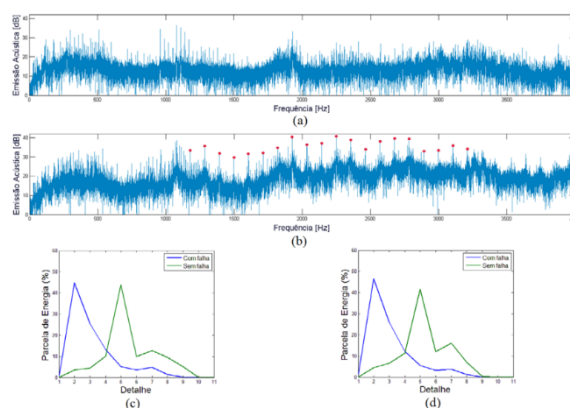


Figura 5. Detecção de falha na pista externa do rolamento pela análise da emissão acústica.

Onde (a) é a Transformada Rápida de Fourier (FFT) da emissão acústica sem falha, (b) é a FFT da emissão acústica com falha, (c) e (d) é a Energia dos detalhes para duas aquisições - motor em vazio.

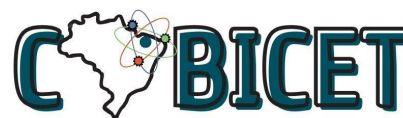
Conforme ilustrado na Figura 5, observaram-se picos espaçados de 107 Hz dentro da faixa de 1000 a 3500 Hz, o que indica uma possível falha na pista externa do rolamento, tendo em vista que essa é a frequência característica associada a esse tipo de falha. Tecnicamente, verificou-se uma alteração significativa na distribuição de energia entre as condições com e sem falha no rolamento. A diferença observada foi de aproximadamente 40% no nível de energia do detalhe D2, considerando o motor operando com e sem carga (Nóbrega Sobrinho; Sena; Lima Filho, 2021).

Análise econômica da substituição de motores

Além de contribuir para a redução do consumo total de energia, a eficiência energética também impulsiona o desenvolvimento do país e gera mais oportunidades de emprego. Esse tema ganha ainda mais relevância quando é considerado o aumento expressivo da demanda energética global nos últimos anos — entre 1973 e 2015, o consumo mundial de energia primária cresceu mais de 50% (Fortes; Sousa; Borba, 2019).

Segundo Fortes, Sousa e Borba (2019), em 2015 o consumo energético global atingiu 13.647 milhões de toneladas equivalentes de petróleo (Mtoe). Deste total, 82,3% foram supridos por fontes como carvão, petróleo, hidrelétricas e gás natural (IEA, 2017). A previsão é que essa demanda continue crescendo, com um aumento estimado de 28% até 2040. No caso do Brasil, os dados mostram que o setor industrial lidera o consumo de energia elétrica, utilizando cerca de 44% da energia produzida no país.

Diante do impacto significativo do uso de motores elétricos na matriz energética nacional e da necessidade de promover a eficiência energética desses equipamentos, foi criada a Portaria



Interministerial nº 1, de 29 de junho de 2017. Essa norma definiu o rendimento mínimo exigido para os motores MITRGE, com classificação equivalente a IR3, e passou a valer em agosto de 2019 (Gonçalves Júnior, 2021).

De acordo com Lima *et al.* (2022), os motores de indução trifásicos com rotor tipo gaiola de esquilo fabricados no Brasil atualmente são do tipo IR3, equivalentes ao nível "premium" nos Estados Unidos e ao IE3 na Europa. O parágrafo 4 da portaria determina que máquinas equipadas com motores que ainda seguem os antigos níveis mínimos de eficiência energética poderiam ser fabricadas e importadas até 1º de março de 2021, e comercializadas até 30 de agosto do mesmo ano. Assim, atualmente, motores classificados como IR2 (Índice de Rendimento 2) já não podem mais ser produzidos nem importados (Gonçalves Júnior, 2021).

Lima *et al.* (2022) destacam que substituir motores não é uma tarefa simples. Isso porque, além do aumento constante nas tarifas de energia elétrica — o que nos obriga a considerar o custo real da energia consumida ao longo de toda a vida útil do equipamento —, é essencial avaliar tanto o nível de carregamento do motor atual quanto o do novo motor. De maneira geral, os motores operam com carga entre 50% e 80%, o que indica que, ao realizar a substituição, deve-se optar por um motor com menor potência, mas com maior aproveitamento de carga.

Motores com maior eficiência energética têm ganhado espaço nas indústrias, especialmente por serem projetados para oferecer um rendimento superior aos modelos convencionais. Esses novos projetos permitem a redução no consumo de energia ao otimizar a potência de entrada, mantendo a mesma potência útil entregue no eixo. Esse ganho de eficiência se deve às melhorias no design e nos componentes do motor, planejados desde o início para minimizar as perdas (Fortes; Sousa; Borba, 2019).

Segundo Gonçalves Júnior (2021), a análise de Custo do Ciclo de Vida (CCV) é amplamente usada para determinar qual projeto ou equipamento oferece melhor viabilidade econômica. Quando se trata de motores MIT, essa análise é relativamente simples, como apontam Lima *et al.* (2022), sendo representada pela Equação 1:

$$CCV = I + E \quad (1)$$

No cálculo do Custo do Ciclo de Vida (CCV), a variável **I** representa o investimento inicial necessário para o projeto, o qual inclui a aquisição, instalação, comissionamento, testes, sistemas de proteção e controle. Já **E** corresponde ao custo da energia elétrica consumida durante toda a vida útil do

equipamento. Não há necessidade de considerar outros custos, uma vez que os equipamentos analisados possuem similaridade tecnológica (Lima *et al.*, 2022).

Lima *et al.* (2022) ressalta que o investimento para aquisição do MIT é realizado integralmente antes do início da operação, enquanto os custos com energia exigem um acompanhamento contábil preciso ao longo do tempo.

Gonçalves Júnior (2021) cita que um estudo, ao aplicar a metodologia do CCV no mercado de Brunei, observou que, embora os veículos elétricos apresentem um custo operacional menor ao longo de sua vida útil, o alto custo inicial ainda representa um obstáculo. Isso afeta negativamente sua rentabilidade em comparação aos veículos convencionais movidos a combustíveis fósseis.

Em outro estudo, que avaliou a viabilidade técnica e a rentabilidade de motores de indução de baixa potência com rendimento melhorado após rebobinagem, a análise com base no CCV indicou que os motores rebobinados apresentaram maior rentabilidade do que a simples substituição por motores IR3/IE3/Premium disponíveis no mercado. Observou-se que o maior tempo de retorno observado entre os motores rebobinados foi de dois anos, quando comparado com a troca direta por um motor novo (Gonçalves Júnior, 2021).

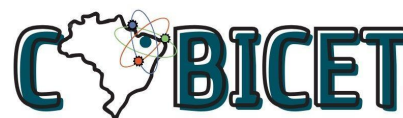
O custo anual da energia consumida por um MIT (CE) é representado pela Equação 2. Nessa equação, **T** corresponde à tarifa da energia elétrica, expressa em R\$/kWh, que pode variar ao longo do tempo (**t**) (Lima *et al.*, 2022).

$$C_E = \frac{P \cdot L \cdot T(t) \cdot H}{\eta(L)} \quad (2)$$

O rendimento (η) também varia de acordo com a carga (**L**) aplicada, e **H** representa as horas anuais de operação do MIT. O crescimento da tarifa de energia elétrica é calculado com base em uma média histórica, refletindo a tendência de aumento. Essa tendência é expressa pela taxa de escalada da energia elétrica ($\hat{e}$), que representa a média anual das diferenças entre o reajuste tarifário da eletricidade e a inflação (Lima *et al.*, 2022).

O Valor Presente Líquido (VPL) do fluxo de caixa relacionado ao uso de um motor elétrico pode ser calculado levando em conta a taxa de desconto (**d**) e a taxa de escalada da energia elétrica ($\hat{e}$), que altera o valor da tarifa (**T**) a cada ano. A fórmula considera a variação anual ao longo do tempo, dentro de um ciclo de vida útil de "**m**" anos para o motor, e está expressa na Equação 3 (Lima *et al.*, 2022).

$$VP = \sum_{t=0}^m C_t \cdot \left(\frac{1+\hat{e}}{1+d} \right)^t \quad (3)$$



Além disso, conforme aponta Saldanha *et al.* (2020), o tempo necessário para recuperar o investimento feito na substituição de um motor pode ser estimado utilizando o método do *Payback*. Esse indicador corresponde à divisão entre o valor investido e a economia obtida com a substituição, permitindo avaliar em quanto tempo o investimento se paga.

Gonçalves Júnior (2021) menciona também o Método da Economia Líquida aplicada (Equação 4), dedicado a medição da relação custo-benefício, ou rentabilidade, entre projetos de eficiência energética, cuja proposta é mensurar a rentabilidade da troca de motores, ao comparar o Valor Presente Líquido (VPL) ao longo do ciclo de vida das opções de investimento.

$$VPL = \sum_{t=0}^n \frac{(C_{op,a}(t) - C_{op,b}(t))}{(1+r)^t} - \Delta C_{inv} \quad (4)$$

Onde:

- VPL é o Valor Presente Líquido da economia.
- $C_{op,a}(t)$ é o custo operacional do motor atual no tempo t .
- $C_{op,b}(t)$ é o custo operacional do novo motor (mais eficiente) no tempo t .
- r é a taxa de desconto (ou taxa mínima de atratividade).
- ΔC_{inv} é o investimento adicional necessário para a troca do motor.
- n é o período de análise (ciclo de vida do motor, por exemplo).

No estudo realizado por Pinheiro, Gomes e Oliveira (2018), foi constatado que, para motores com potência superior a 7,5 cv, o recondicionamento pode ser uma alternativa mais viável economicamente do que a substituição completa por um motor novo. Isso porque o custo de reparo nesses casos é inferior à metade do valor de aquisição de um motor novo equivalente, tornando o recondicionamento a escolha mais vantajosa sob a ótica financeira.

Entretanto, é importante destacar que, após o processo de recondicionamento, diversas informações técnicas do motor podem ser alteradas ou até mesmo perdidas — entre elas, o rendimento do equipamento. Essa incerteza dificulta uma análise precisa do consumo total de energia, especialmente considerando que, no contexto brasileiro, os motores elétricos têm papel relevante no consumo nacional de energia elétrica (Pinheiro; Gomes; Oliveira, 2018).

Saldanha *et al.* (2020) também apresentam uma fórmula proposta pela empresa WEG para estimar o consumo de energia em termos monetários. Nessa equação, o kWh atual refere-se ao consumo do motor atualmente instalado, enquanto o kWh proposto

representa o consumo do novo motor a ser adquirido. Já o R\$/kW corresponde à tarifa de energia vigente na região, expressa em reais por quilowatt-hora, conforme apresentado na Equação 5.

$$Economia = (kWh_{atual} - kWh_{proposto}) * R\$/kW \quad (5)$$

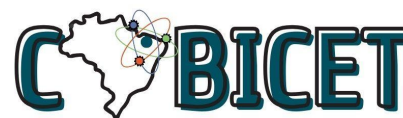
No estudo conduzido por Fortes, Sousa e Borba (2019), foi identificado que motores da categoria super premium, com 2 a 8 pólos, apresentam uma economia mais significativa em determinadas faixas de potência. Em especial, os motores com potência entre 1,5 e 10 cv geram um impacto expressivo, com uma economia estimada em aproximadamente R\$ 5,7 bilhões ao longo de um período de 10 anos. Os autores também verificaram uma redução significativa no consumo energético, totalizando cerca de 41.584.309 MWh considerando as potências e o número de pólos analisados.

O maior impacto em termos de economia e eficiência energética ocorre justamente nos motores de menor potência, tanto pela sua ampla presença no mercado quanto pelas variações mais expressivas nos seus índices de rendimento, quando comparados aos motores de maior porte. Apesar da percepção comum de que motores abaixo de 10 cv são pequenos demais para justificar sua substituição em larga escala — geralmente sendo descartados ou trocados apenas quando apresentam falhas —, os dados mostram o contrário (Fortes; Sousa; Borba, 2019). Segundo os autores, motores de pequeno porte representam cerca de 89% dos motores instalados no país. Além disso, a substituição por modelos mais eficientes pode gerar um ganho de 4 a 6,5 pontos percentuais no rendimento, enquanto em motores de grande porte essa melhoria tende a ser bem menor, em torno de 1 a 2 pontos percentuais.

Alternativas técnicas para aumento da eficiência sem necessidade de substituição

Atualmente, uma série de alternativas técnicas podem ser aplicadas com o objetivo de elevar a eficiência de motores de indução trifásicos sem que haja a necessidade de substituí-los. Miranda *et al.* (2023) propõem a combinação entre a técnica de controle vetorial indireto (IFOC) e um controlador baseado em modelo de perdas (LMC). Esse arranjo permite um ajuste dinâmico da corrente de excitação do motor (ids) conforme a demanda de torque, promovendo uma operação otimizada, especialmente em regimes de carga parcial. O controle vetorial permite, assim, separar o controle de torque e fluxo, o que, aliado ao ajuste fino do fluxo magnético, resulta na minimização das perdas elétricas.

Ainda no escopo do controle eletrônico, Miranda *et al.* (2023) também aplicam a modulação por vetores espaciais (*Space Vector Modulation* – SVM) ao



sistema de acionamento, a fim de reduzir distorções harmônicas e perdas por comutação nos inversores. Essa técnica, ao maximizar a utilização do barramento CC, aumenta a precisão na aplicação dos sinais de tensão ao motor, contribuindo diretamente para a melhoria da eficiência energética em diferentes regimes de operação.

Paralelamente às estratégias de controle, Rios (2019) destaca o papel das tecnologias baseadas em Internet das Coisas (IoT) no monitoramento em tempo real de variáveis como corrente, tensão e temperatura. A adoção de microcontroladores como o ESP32, integrados a redes sem fio e sensores, permite que os motores sejam supervisionados de forma remota, com coleta contínua de dados. Essa abordagem proporciona não apenas diagnósticos instantâneos, mas também embasa decisões estratégicas quanto à operação e manutenção dos motores.

Nesse sentido, Neto *et al.* (2023) reforçam a importância da manutenção preditiva como fator chave para a eficiência operacional. A partir da análise de sinais de vibração, temperatura e corrente, é possível prever falhas em componentes críticos, como rolamentos e enrolamentos do estator, evitando paradas inesperadas e prolongando a vida útil das máquinas. Além disso, os autores ressaltam que essa abordagem preditiva se beneficia fortemente dos dados gerados por sistemas IoT, como destacado por Rios (2019).

Complementando essas estratégias, Jung (2020) enfatiza a influência negativa de distorções no sinal de alimentação e sugere a implementação de filtros ativos ou passivos e o balanceamento das cargas trifásicas como métodos eficientes para reduzir harmônicos, melhorando o fator de potência e, por consequência, o rendimento do motor. Essa abordagem contribui para o funcionamento estável e eficiente da máquina, mesmo em ambientes com qualidade de energia comprometida.

Anastacio *et al.* (2020) abordam outra vertente tecnológica: o uso de inversores com funções embutidas de economia de energia, como o controle *Variable Voltage Variable Frequency* (VVVF). Ao ajustar automaticamente a tensão e a frequência fornecida ao motor em função da carga exigida, essas soluções permitem operar com menor fluxo magnético quando possível, diminuindo perdas no cobre e no ferro e aumentando a eficiência em aplicações com carga variável.

Além dos aspectos elétricos e eletrônicos, fatores mecânicos também impactam diretamente a eficiência dos motores. Anastacio *et al.* (2020) ressaltam que o balanceamento inadequado da carga mecânica, desalinhamentos ou folgas podem elevar o torque resistivo, exigindo mais corrente elétrica para manter a rotação desejada. Dessa forma, a verificação

periódica e a correção de tais desalinhamentos representam uma estratégia de manutenção simples, mas eficaz.

Para identificar perdas localizadas, Jung (2020) recomenda o uso de termografia, que permite visualizar pontos de aquecimento anormal na carcaça, mancais ou bornes. Esses *hotspots* geralmente indicam problemas como atrito excessivo ou contatos elétricos frouxos, cujas correções – muitas vezes simples, como reaperto de conexões ou lubrificação – geram ganhos expressivos na eficiência do motor e evitam falhas mais graves.

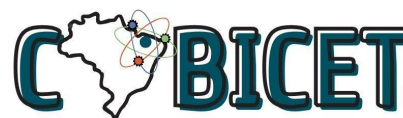
Neto *et al.* (2023) também destacam a importância do monitoramento do isolamento elétrico dos enrolamentos, realizado por meio de testes com megômetro. A resistência de isolamento é diretamente correlacionada ao estado de limpeza e umidade do motor, e sua deterioração pode levar a perdas dielétricas significativas. Ao identificar esses problemas antecipadamente, evita-se o funcionamento ineficiente e o risco de falha catastrófica.

Além disso, Neto *et al.* (2023) acreditam que o uso de dados históricos pode embasar decisões como o escalonamento de cargas e o desligamento de equipamentos em horários de baixa demanda, promovendo uma operação mais estratégica e sustentável. Para que isso ocorra, o treinamento da equipe técnica e a atualização dos processos internos são fundamentais.

Controle vetorial com otimização de fluxo

O controle vetorial com otimização de fluxo, também conhecido como controle orientado por campo (*Field-Oriented Control* – FOC), constitui uma técnica avançada de acionamento que permite controlar independentemente o torque e o fluxo magnético de motores de indução trifásicos, aproximando seu comportamento ao dos motores de corrente contínua. Miranda *et al.* (2023) destacam que a estratégia *Indirect Field-Oriented Control* (IFOC), em particular, possibilita um controle dinâmico preciso, especialmente em aplicações que exigem resposta rápida e estabilidade em baixas rotações.

Em seu estudo, Miranda *et al.* (2023) propõem a integração do IFOC com o controlador baseado em modelo de perdas (LMC – *Loss Model Controller*), que ajusta a corrente do eixo direto (ids) com base na minimização da potência ativa consumida, tendo como referência o modelo matemático das perdas internas do motor. Essa abordagem permite identificar o ponto de maior eficiência para cada condição de carga e velocidade, resultando em ganhos substanciais de rendimento, especialmente em regimes de operação fora do ponto nominal, onde



os motores tradicionalmente apresentam baixa eficiência.

O controle de fluxo baseado em modelo de perdas trabalha com a ideia de que o fluxo magnético ideal não deve ser fixo, mas sim ajustado em tempo real conforme a carga aplicada ao eixo do motor. Em cargas reduzidas, por exemplo, manter o mesmo fluxo magnético nominal implica em perdas desnecessárias por corrente de magnetização. Ao reduzir a corrente ids de forma controlada, é possível diminuir essas perdas sem comprometer a geração de torque (Miranda *et al.*, 2023).

Miranda *et al.* (2023) validaram esse conceito por meio de simulações e testes experimentais, observando que a relação ótima entre corrente de excitação e torque varia suavemente com a velocidade e a carga, permitindo que o controlador LMC atue com alta estabilidade.

Anastacio *et al.* (2020) corroboram esse enfoque ao destacar que a aplicação de estratégias de controle adaptativas, como a otimização de fluxo, representa uma evolução natural na busca por eficiência energética em motores de indução trifásicos. Dessa forma, a conjugação entre controle vetorial e otimização de fluxo apresenta-se como uma solução técnica de alto desempenho, capaz de atender às exigências contemporâneas de economia de energia e sustentabilidade na indústria.

Sistemas de acionamento inteligente com IoT

O uso de sistemas de acionamento inteligentes baseados em Internet das Coisas (IoT) tem emergido como uma alternativa eficiente e de baixo custo para otimização energética de motores de indução trifásicos, sobretudo em ambientes industriais que demandam monitoramento contínuo e decisões automatizadas (Rios, 2019).

Rios (2019) discorre sobre a importância da instrumentação conectada em tempo real via redes sem fio — como Wi-Fi, ZigBee e WirelessHART — que permite a coleta e transmissão de variáveis elétricas e térmicas como corrente, tensão, temperatura e vibração. Esses dados, quando integrados a plataformas de supervisão ou sistemas em nuvem como ThingSpeak e Telegram, podem ser analisados com apoio de algoritmos para identificação de padrões de consumo, previsão de falhas e otimização da operação.

Rios (2019) pôde constatar que essa arquitetura distribuída reduz a dependência de infraestrutura física, diminui custos com cabeamento e manutenção, e favorece a escalabilidade do sistema. Além disso, Neto *et al.* (2023) enfatizam o papel da IoT como facilitadora da manutenção preditiva, permitindo que intervenções sejam realizadas com

base em dados de desempenho ao invés de intervalos fixos de tempo.

Neto *et al.* (2023) argumenta que em sistemas onde sensores inteligentes monitoram continuamente o comportamento do motor, é possível identificar variações sutis em parâmetros operacionais que indicam perdas de eficiência ou o início de um processo de falha. Rios (2019) também destaca a relevância de plataformas embarcadas como o ESP32, que combina capacidade de processamento local com conectividade sem fio, possibilitando o desenvolvimento de sistemas autônomos de acionamento e supervisão.

Rios (2019) destaca que quando acoplado a inversores com capacidade de controle vetorial, o sistema IoT atua como um elo entre a automação de baixo nível e a gestão energética em tempo real, viabilizando decisões baseadas em dados para ajustar a operação do motor às condições reais de carga e demanda, promovendo ganhos efetivos de eficiência e sustentabilidade operacional.

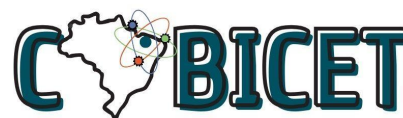
Melhoria da qualidade do sinal de alimentação

A melhoria da qualidade do sinal de alimentação elétrica representa uma possibilidade de aumentar a eficiência de motores de indução trifásicos, especialmente em ambientes industriais onde distorções harmônicas e desequilíbrios de tensão são frequentes. Jung (2020) destaca que distúrbios na forma de onda da tensão de alimentação, como harmônicos de ordem elevada e desbalanceamentos entre as fases, resultam em aumento das perdas no cobre e no ferro do motor, além de gerar esforços térmicos e magnéticos desnecessários.

Jung (2020) ressalta que esses efeitos deterioram o rendimento da máquina e reduzem sua vida útil. Como solução, propõe o uso de filtros passivos sintonizados ou filtros ativos de potência (APF), capazes de atenuar essas distorções e restabelecer a qualidade do fornecimento trifásico. Além disso, a correção do fator de potência por meio de bancos de capacitores ou controladores automáticos de potência reativa contribui para a diminuição da corrente total circulante, reduzindo as perdas ôhmicas e aumentando a eficiência do sistema de acionamento como um todo.

Anastacio *et al.* (2020) reforçam que o balanceamento das cargas entre as fases é uma prática relevante, embora muitas vezes negligenciada nas instalações industriais, considerando que um sistema trifásico desequilibrado acarreta circulação de corrente pela componente de sequência negativa, provocando aquecimento adicional e oscilações de torque, que resultam em vibração e ineficiência.

A identificação desses problemas pode ser feita com o uso de analisadores de qualidade de energia e



softwares de diagnóstico, que permitem visualizar em tempo real o espectro de harmônicos e a simetria das tensões e correntes. A partir dessa análise, é possível implementar ações corretivas pontuais, envolvendo a redistribuição de cargas e instalação de transformadores de isolamento ou filtros específicos (Anastacio *et al.*, 2020).

Anastacio *et al.* (2020) acreditam que tais medidas não apenas restauram o desempenho eletromagnético ideal do motor, como também previnem falhas em equipamentos sensíveis e aumentam a confiabilidade de todo o sistema de potência. Dessa forma, a abordagem além de preservar os motores, representa uma medida importante para promover maior eficiência energética no campo industrial.

Calibração e balanceamento de carga mecânica

A calibração e o balanceamento da carga mecânica associada aos motores de indução trifásicos contribui para a eficiência energética, e também para a integridade mecânica do sistema. Anastacio *et al.* (2020) destacam que desalinhamentos de eixo, cargas excêntricas e acoplamentos mal ajustados geram esforços adicionais sobre o rotor, exigindo maior corrente de alimentação para vencer resistências mecânicas indesejadas.

Como consequência disso, esse aumento de corrente implica em maiores perdas por efeito Joule nos enrolamentos do estator e aquecimento excessivo do motor, o que reduz seu rendimento e pode levar a falhas prematuras. O balanceamento da carga, nesse contexto, não se limita à simetria do torque aplicado ao eixo, mas envolve também a adequação da inércia do sistema acoplado, o correto dimensionamento do acoplamento, seja ele elástico ou rígido, e a verificação de folgas ou desgastes em componentes rotativos (Anastacio *et al.*, 2020).

Além disso, Neto *et al.* (2023) afirma que a calibração periódica dos componentes mecânicos permite identificar variações na rigidez do acoplamento, folgas nos mancais ou desbalanceamentos em polias e volantes que podem gerar vibrações indesejadas. Estes autores também destacam a importância de se monitorar sinais de vibração e temperatura como indicadores indiretos de desequilíbrio mecânico, utilizando sensores e técnicas de manutenção preditiva para antecipar correções antes que danos maiores ocorram.

Vibrações acima dos níveis normais, por exemplo, são frequentemente causadas por desbalanceamentos que afetam diretamente a eficiência do motor ao impor cargas oscilantes e resistências não lineares ao movimento rotacional. Portanto, a atuação preventiva sobre esses fatores, por meio de intervenções simples como reapertos, alinhamentos ou troca de rolamentos, pode restabelecer as condições ideais de

operação, contribuindo para o desempenho energético ideal do motor (Neto *et al.*, 2023).

Uso de inversores com funções de economia de energia e monitoramento de isolamento elétrico

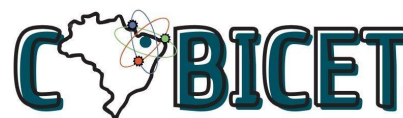
Anastacio *et al.* (2020) mencionam o uso de inversores de frequência com funções de economia de energia como uma alternativa para aumentar a eficiência de motores de indução trifásicos, principalmente em aplicações que operam frequentemente com cargas parciais. Segundo os autores, esses dispositivos, ao operarem com controle de tensão e frequência variáveis, do original, *Variable Voltage Variable Frequency* (VVVF), ajustam dinamicamente os parâmetros elétricos fornecidos ao motor conforme a demanda real do processo.

Em situações onde a carga é inferior à nominal, os inversores são capazes de reduzir a tensão aplicada sem comprometer a produção de torque, o que diminui as perdas por magnetização excessiva e reduz significativamente o consumo de energia. Compreende-se que esse ajuste automático é particularmente vantajoso em sistemas com variação de carga ao longo do tempo, como ventiladores, bombas centrífugas e compressores (Anastacio *et al.*, 2023).

Além disso, Miranda *et al.* (2023) descrevem que inversores modernos tem como diferencial integrar algoritmos de otimização energética, como o controle de fluxo otimizado (*flux optimization control*) e o modo “*sleep*” para cargas intermitentes, que desligam o motor ou o colocam em modo de baixa potência quando a carga não é exigida. Esses recursos aumentam o fator de carga médio e reduzem o tempo de operação desnecessária do motor, impactando diretamente na eficiência global do sistema.

Miranda *et al.* (2023) também ressaltam que a integração dos inversores com sistemas de controle vetorial e técnicas de modulação eficientes, como a *Space Vector Modulation* (SVM), contribui para uma comutação mais precisa das fases e uma entrega de potência mais estável, maximizando o rendimento. Isto permite afirmar que essa sinergia entre *hardware* (inversores) e *software* de controle representa uma das estratégias mais promissoras para a se obter ganhos de eficiência energética em ambientes industriais.

No que se refere ao monitoramento do isolamento elétrico, essa prática segundo Neto *et al.* (2023) permite conferir segurança operacional e maior desempenho eficiente em motores de indução trifásicos. Os autores explicam que a resistência de isolamento entre os enrolamentos e a carcaça do motor se deteriora ao longo do tempo devido à umidade, contaminação, envelhecimento térmico e



vibrações, podendo resultar em fugas de corrente, perdas dielétricas e até curtos-circuitos.

A realização periódica de testes com megômetro, prática que é descrita como Teste de Resistência de Isolamento, permite identificar precocemente a degradação do dielétrico. Em se tratando especificamente de motores de baixa potência, a tensão de teste deve ser de 500 V mais duas vezes a tensão nominal, o que assegura a detecção de falhas mesmo em estágios iniciais de deterioração (Neto *et al.*, 2023).

Jung (2020) destaca que um isolamento comprometido leva à elevação de perdas indesejadas por correntes de fuga e superaquecimento dos enrolamentos, o que diminui a eficiência do motor e pode acelerar o envelhecimento do sistema. Além disso, a continuidade da operação sob tais condições pode provocar paradas não planejadas, incêndios e riscos à integridade dos operadores.

Em seu estudo, Jung (2020) observa que, em ambientes industriais com alta umidade ou presença de agentes contaminantes, o monitoramento contínuo do isolamento deve ser integrado a sistemas de supervisão e controle, utilizando sensores dedicados ou módulos de análise embarcados. Dentro desse contexto, a correção pode envolver desde procedimentos simples, como secagem e limpeza do motor, até a substituição de componentes isolantes. Portanto, é possível afirmar que o monitoramento ativo e programado do isolamento elétrico não apenas protege o motor contra falhas, mas contribui diretamente para a manutenção de sua eficiência operacional e prolonga sua vida útil.

CONCLUSÃO

Como resultado da pesquisa, conclui-se que a modernização ou substituição de motores elétricos de indução trifásicos em instalações industriais representa uma estratégia viável e relevante para a melhoria do desempenho energético e operacional.

Foram demonstrados os principais pontos de falha que podem ocorrer em motores elétricos de indução trifásicos, abordagens técnicas adotadas para avaliação de falhas, e análises econômicas que possam embasar a adequação ou substituição de motores. Embora a substituição direta por motores mais eficientes seja muitas vezes justificável, a racionalização do equipamento existente pode ser igualmente vantajosa, desde que acompanhada por melhorias operacionais e gestão adequada.

Ademais, a pesquisa justifica sua relevância pelo apoio à tomada de decisões mais assertivas e tecnicamente fundamentadas dentro do setor industrial.

AGRADECIMENTOS

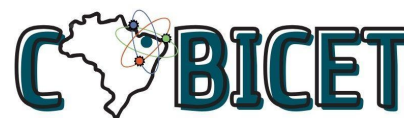
O presente trabalho foi realizado com apoio da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul – UFMS/MEC – Brasil e da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (Capes) – Código de Financiamento 001.

REFERÊNCIAS

- ARAÚJO, Álvaro de Souza. Análise, avaliação e validação do uso de técnicas de inteligência artificial para o diagnóstico de falhas em motores de indução. Salvador, BA, 2022. 89 p. Dissertação (Mestrado em Modelagem Computacional e Tecnologia Industrial). Salvador, 2022. Disponível em: <http://repositoriosenaiba.fieb.org.br/handle/fieb/1231>. Acesso em: 26 mar. 2025.
- ANASTACIO, Breno P.; PIRES, Douglas M.G.; MAGALHÃES, Jéssica de L. A.; DIAS, Marcelo P. Eficiência energética em motores elétricos de indução. ANALECTA - Centro Universitário Academia, v. 5, n. 5, 2020. Disponível em: <https://seer.uniacademia.edu.br/index.php/ANL/article/viewFile/2351/1570>. Acesso em: 26 mar. 2025.
- ANDRADE, Mario M. de. Como preparar trabalhos para cursos de pós-graduação. São Paulo: Atlas, 2002.
- BICUDO, M. A. V. Pesquisa qualitativa e pesquisa qualitativa segundo a abordagem fenomenológica. São Paulo: Cortez, 2011.
- FONSECA, João José Saraiva de; MORAES, A. Metodologia da pesquisa científica. Apostila. Fortaleza: UEC, 2002.
- FORTES, Marcio Zamboti; SOUSA, Leandro Braz; BORBA, Bruno Soares Moreira Cesar. Análise do impacto econômico no setor industrial com a utilização de motores de alto rendimento. Revista Brasileira de Energia, vol. 25, n. 3, 2019. Disponível em: <https://www.academia.edu/download/73405982/454.pdf>. Acesso em: 26 mar. 2025.
- GERHARDT, Tatiana Engel; SILVEIRA, Denise Tolfo (Orgs.). Métodos de pesquisa. Porto Alegre: UFRGS, 2009.
- GIL, Antônio Carlos. Métodos e técnicas de pesquisa social. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2008.
- GOLDENBERG, Mirian. Arte de pesquisar: como fazer pesquisa qualitativa em Ciências Sociais. Rio de Janeiro: Record, 2007.
- GONÇALVES, Carlos A.; MEIRELLES, Anthero M. Projetos e relatórios de pesquisa em Administração. São Paulo: Atlas, 2004.



- GONÇALVES JÚNIOR, Adriano Araújo. Avaliação técnico-econômica da troca de motores em parques fabris de médio porte: simulação de cenários em regiões distintas do Brasil. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal Rural do Semiárido, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Mossoró, 2021. Disponível em: <https://repositorio.ufersa.edu.br/items/82071acd-5cd2-4a2f-b050-899b69975114>. Acesso em: 31 mar. 2025.
- IEA. *Key world energy statistics*. Secure Sustainable Together, Paris, 2017. Disponível em: https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/publications/reports/2017/09/key-world-energy-statistics-2017_glg83526/key_energ_stat-2017-en.pdf. Acesso em: 25 mar. 2025.
- JUNG, Clecio. Melhoria da robustez e eficiência em acionamentos de motores de indução trifásicos combinando as técnicas IFOC, IMC e MRAC. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2020. Disponível em: <https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/24529>. Acesso em: 1 abr. 2025.
- LIMA, Kelly C. D.; JUNIOR, Marcos Antônio L. M.; AGUIAR, Victor P. B.; GALVÃO, Raclenir L.; MOURA, Adriano A. F. de; PONTES, Ricardo S. T. Avaliação Técnico-Econômica da Troca de Motores Industriais pela Análise do Carregamento e Cálculo da Economia Líquida em uma Indústria Salineira. Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos-SBSE, v. 1, n. 1, 2020. Disponível em: https://www.sba.org.br/open_journal_systems/index.php/sbse/article/view/2227. Acesso em: 31 mar. 2025.
- LOUZADA, Ailton; SOUZA, Wesley Angelino de; CASTOLDI, Marcelo Favoretto; GOEDEL, Alessandro. Diagnóstico de Curto-Circuito entre Espiras de Estator de Motores de Indução Usando Fluxo de Dispersão e Dados Estatísticos. In: Congresso Brasileiro de Automática-CBA. 2022. Disponível em: https://sba.org.br/open_journal_systems/index.php/cba/article/view/3272. Acesso em: 31 mar. 2025.
- LUCENA JÚNIOR, José Anselmo de. Análise de falha em rolamentos de motores de indução trifásico através do som utilizando densidade de máximos. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal da Paraíba, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, João Pessoa, 2019. Disponível em: <https://repositorio.ufpb.br/jspui/handle/123456789/18467>. Acesso em: 26 mar. 2025.
- LYRA, Gabriela Jordão. Sistema inteligente para diagnóstico de falhas em rolamentos de motores de indução trifásicos via análise sonora. 2019. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal da Paraíba, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, João Pessoa, 2019. Disponível em: <https://repositorio.ufpb.br/jspui/handle/123456789/19360>. Acesso em: 26 mar. 2025.
- MIRANDA, Lucas Gaspar; BELUSSO, Maria Helena; MINETTO, Tamara; TORRICO, César Rafael Claire. Implementação de controle para melhoria da eficiência energética em motores de indução trifásicos. In: 11th Seminar on Power Electronics and Control (SEPOC 2018). Brasil, 2023. Disponível em: <https://repositorio.ufsm.br/handle/1/30600>. Acesso em: 1 abr. 2025.
- NETO, Caroline Soares Rodrigues Neto; SANTOS, Diego Resende; VIEIRA, Eric Caetano Mauricio; ROCHA, Jéssica Taveira da; EUGENIO, Quêren Hapque de Souza; CAMPOS, Carlos da Mata. Motores de indução trifásicos para operações industriais. Brazilian Journal of Production Engineering, São Mateus, Espírito Santo, Brazil, v. 9, n. 4, p. 278–289, 2023. Disponível em: <https://periodicos.ufes.br/bjpe/article/view/42440>. Acesso em: 26 mar. 2025.
- NÓBREGA SOBRINHO, C. A.; LIMA FILHO, Abel Cavalcante; SENA, Alexander Patrick Chaves de; BRITO, Jorge Nei; SILVA, Jobson Francisco da; MAFALDO, Ícaro Meireles. Transformada Wavelet para detecção de barras quebradas em Motores de Indução Trifásicos. Revista Principia, [S. l.], v. 1, n. 42, p. 72–83, 2018. Disponível em: <https://periodicos.ifpb.edu.br/index.php/principia/article/view/1663>. Acesso em: 26 mar. 2025.
- NÓBREGA SOBRINHO, C. A.; SENA, A. P. C.; LIMA FILHO, A. C. Estratégias para Detecção de Falhas em Rolamentos de Motores de Indução Trifásicos. Revista Principia, [S. l.], v. 1, n. 55, p. 108–118, 2021. DOI: 10.18265/1517-0306a2021id4154. Disponível em: <https://periodicos.ifpb.edu.br/index.php/principia/article/view/4154>. Acesso em: 31 mar. 2025.
- PEDRO, Evandro J. P.; FIRMINO, Lucas B.; GUIMARÃES, Rodrigo G.; SOUZA, Tamiris A. Sistema eletrônico para monitorar a operação dos motores elétricos de indução na indústria. ANALECTA - Centro Universitário Academia, v. 6, n. 3, 2021. Disponível em:



- <https://seer.uniacademia.edu.br/index.php/ANL/article/download/2750/1830>. Acesso em: 26 mar. 2025.
- PINHEIRO, Vinicius M.; GOMES, Luciano C.; OLIVEIRA, Cassio. A de. Plataforma experimental para análise do rendimento de motores de indução trifásicos por meio de ensaios específicos recomendados na norma técnica NBR17094-3:2018. ForScience, v. 7, n. 2, 26 set. 2019. Disponível em: <https://forscience.ifmg.edu.br/index.php/forscienc e/article/view/633>. Acesso em: 26 mar. 2025.
- PRODANOV, Cleber Cristiano; FREITAS, Ernani Cesar de. Metodologia do trabalho científico: métodos e técnicas da pesquisa e do trabalho acadêmico-2ª Edição. Editora Feevale, 2013.
- REZENDE, P.H.O.; BISPO, D. Análise Econômica em Motores de Indução Trifásicos. Revista Horizonte Científico, v. 9, n. 1, 2015. Disponível em: <https://seer.ufu.br/index.php/horizontecientifico/article/view/8051/15712>. Acesso em: 26 mar. 2025.
- RIOS, Artur de Almeida. Aplicação de internet das coisas no monitoramento de corrente, tensão e temperatura em motor de indução trifásico. 2019. 112 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2019. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/26442>. Acesso em: 26 mar. 2025.
- SALDANHA, Sarah L. S.; SOUZA, Jorgeane M.; ARAUJO, Everton R. S.; FERREIRA, Cristiany de N. M. do Amaral. Estudo econômico referente à substituição de motores elétricos indutivos em uma indústria de papel celulose. In: Congresso Brasileiro de Automática-CBA. 2020. Disponível em: https://sba.org.br/open_journal_systems/index.php/cba/article/view/1509. Acesso em: 26 mar. 2025.
- SILVA, E.; MENEZES, E. Metodologia da pesquisa e elaboração de dissertação. Florianópolis: UFSC, 4. ed. 2005.
- THIES, Eduardo; ZANONI, Cícero. Eficiência energética em sistema eletromotriz de ventilação: uma análise comparativa entre motor de indução trifásico x motor de imã permanente. Interdisciplinary Journal of Applied Science, [S. l.], v. 1, n. 2, p. 16–29, 2016. Disponível em: <https://sou.ucs.br/etc/revistas/index.php/ricaucs/article/view/4744>. Acesso em: 27 mar. 2025.
- YIN, Robert K. Estudo de caso: planejamento e métodos. Livro, Editora Bookman, 5.ed. - Porto Alegre, 2015.