



MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS PARA OPERAÇÕES INDUSTRIAIS

THREE-PHASE INDUCTION MOTORS FOR INDUSTRIAL OPERATIONS

MOTORES DE INDUCCIÓN TRIFÁSICOS PARA OPERACIONES INDUSTRIALES

Caroline Soares Rodrigues Neto ¹, Diego Resende Santos ², Eric Caetano Maurício Vieira ³, Jéssica Taveira da Rocha ^{4*}, Quéren Hapuque de Souza Eugenio ⁵, & Carlos da Mata Campos ⁶

^{1 2 3 4 5 6} Faculdade Doctum de Cataguases

¹ carolinesoares.kta@gmail.com ² diegoresende89@gmail.com ³ ericvieira37@gmail.com ^{4*} jessica.taveira@yahoo.com.br
⁵ querensouza21@gmail.com ⁶ prof.carlos.campos@doctum.edu.br

ARTIGO INFO.

Recebido: 15.09.2023

Aprovado: 16.11.2023

Disponibilizado: 02.12.2023

PALAVRAS-CHAVE: Motores de Indução Trifásicos; Falhas; Manutenção Preditiva.

KEYWORDS: Three-Phase Induction Motors; Failures; Predictive Maintenance.

PALABRAS CLAVE: Motores de Inducción Trifásicos; Fallas; Mantenimiento Predictivo.

*Autor Correspondente: Rocha, J. T., da.

RESUMO

Os motores de indução trifásicos pertencem à classe de motores de maior preferência e utilização na área industrial fabril, não somente a nível de Brasil, mas também mundialmente, essencialmente devido às suas características de resistência, acessibilidade e versatilidade na aplicação. A sua aplicação é vasta, com isso, a instalação e funcionamento cada vez mais vem sendo expostos a ambientes e condições de operações impróprias sujeitando-os a diversas falhas incipientes. Ocorrência de falhas inesperadas na indústria resulta em transtornos e podem significar prejuízos, sejam estes financeiros, redução de horas homem produtivas proporcionadas por parada, além de uma redução de produtos produzidos. Neste contexto, a manutenção preditiva é uma possível aliada para a execução de um controle e acompanhamento nos motores de indução trifásicos, pois esta é uma metodologia programática e alinhada com métodos modernos de detecção e diagnósticos de falhas possibilitam que processos e equipamentos tenham uma maior disponibilidade, proporcionando que atinjam uma máxima eficiência, minimizando perdas de produção e acentuando a lucratividade. O objetivo deste trabalho é apresentar uma visão geral dos motores de indução trifásicos para operações industriais, de forma a identificar e evidenciar os pontos relevantes relacionados ao tema.

ABSTRACT

Three-phase induction motors belong to the class of motors most preferred and used in the industrial manufacturing area, not only in Brazil, but also worldwide, essentially due to their characteristics of resistance, accessibility and versatility in application. Its application is vast; therefore,

the installation and operation are increasingly being exposed to environments and conditions of improper operations, subjecting them to several incipient failures. Occurrence of unexpected failures in the industry results in inconvenience and can mean losses, whether financial, reduction of productive man hours provided by stoppage, in addition to a reduction of products produced. In this context, predictive maintenance is a possible ally for carrying out control and monitoring of three-phase induction motors, as this is a programmatic methodology and aligned with modern methods of fault detection and diagnosis, allowing processes and equipment to have greater availability, allowing them to reach maximum efficiency, minimizing production losses and enhancing profitability. The objective of this work is to present an overview of Three-Phase Induction Motors for Industrial operations, in order to identify and highlight the relevant points related to the theme.

RESUMEN

Los motores de inducción trifásicos pertenecen a la clase de motores más preferidos y utilizados en el área de fabricación industrial, no solo en Brasil, sino también en todo el mundo, esencialmente debido a sus características de resistencia, accesibilidad y versatilidad en la aplicación. Su aplicación es vasta, por lo tanto, la instalación y operación están cada vez más expuestas a entornos y condiciones de operación inadecuados, lo que los somete a varias falhas incipientes. La aparición de falhas inesperadas en la industria resulta en inconvenientes y puede significar pérdidas, ya sean financieras, reducción de horas productivas proporcionadas por la detención, además de una reducción en la producción de productos. En este contexto, el mantenimiento predictivo es un aliado posible para llevar a cabo el control y monitoreo de los motores de inducción trifásicos, ya que se trata de una metodología programática y alineada con métodos modernos de detección y diagnóstico de fallas, lo que permite que los procesos y equipos tengan una mayor disponibilidad, lo que les permite alcanzar la máxima eficiencia, minimizando las pérdidas de producción y aumentando la rentabilidad. El objetivo de este trabajo es presentar una visión general de los motores de inducción trifásicos para operaciones industriales, con el fin de identificar y resaltar los puntos relevantes relacionados con el tema.



INTRODUÇÃO

O setor industrial possui por responsabilidade a produção e inserção de bens no mercado. Com base nisso, as manufaturas, a partir da disponibilização de suas fabricações contribuem fortemente para a economia dos países, uma vez que, essas são grandes geradoras de emprego, além de promotoras de transações pelos quais influenciam diretamente no Produto Interno Bruto (PIB), fortalecendo o setor econômico. Devido às inúmeras mudanças no setor e às demandas de mercado que foram surgindo, novas tecnologias foram criadas e/ou adaptadas para dar aporte aos processos produtivos e a novos modelos de negócio (Pisching, 2018).

Os motores de indução trifásicos (MIT) são para as unidades fabris, o “coração da industrialização”, isso se deve, em especial, ao fato de que os motores têm a responsabilidade de converter a energia elétrica que é recebida pelos terminais transformando-a em energia mecânica, disponibilizando, assim, cargas para a realização de trabalho no seu eixo (EPE, 2022).

A preferência pela utilização dos motores de indução trifásicos pela indústria, comparando aos demais, está fundamentada nas vantagens que esse modelo proporciona à organização, podendo citar como mais relevantes a sua robustez, versatilidade e baixo custo de manutenção, e com a associação com inversores de frequência possibilitando o controle de velocidade o torna adequado para a maioria das aplicações industriais (Altoé, 2017).

Devido à dominação desses motores nas unidades fabris, quando estes são afetados por alguma falha, automaticamente acarretam paradas nos processos produtivos, sejam essas parciais ou totais, levando à instituição de possíveis prejuízos – financeiros, por financiar a manutenção e/ou substituição dos equipamentos, produtivos, pela redução da produção e perda de horas disponíveis de produção pelos colaboradores, que ficam ociosos devido à parada (Stief et al., 2019).

A manutenção preditiva é uma das metodologias mais empregadas atualmente para o mapeamento de sinais que indicam situações de falha, possibilitando uma atuação antecipada e planejada sobre o equipamento com sinais de problemas. Para isso, esta metodologia trabalha em conjunto com sensores que têm a capacidade de obter informações sobre a condição de funcionamento das máquinas elétricas (Souza, 2022).

Contudo, o objetivo deste estudo é fornecer uma compreensão abrangente dos motores de indução trifásicos para operações industriais, destacando aspectos essenciais relacionados ao tema, com base em uma revisão da literatura existente. Nesse contexto, a metodologia adotada envolveu a pesquisa e análise de materiais impressos e virtuais, incluindo livros e artigos acadêmicos, que respaldam as informações apresentadas. A estrutura deste artigo seguirá uma abordagem que começa pela conceitualização dos motores de indução trifásicos, passando pela discussão de falhas, manutenção e tecnologias aplicadas, culminando em considerações finais que ressaltam a importância da manutenção preditiva e da monitorização contínua para a eficiência e produtividade dos motores de indução trifásicos em operações industriais.



METODOLOGIA

O presente trabalho apresenta uma pesquisa bibliográfica acerca do tema motores de indução trifásicos para operações industriais. Segundo Gil (2008), uma pesquisa bibliográfica é aquela cujo desenvolvimento tem por base material já elaborado, constituído principalmente de livros e artigos científicos.

Foi seguido os moldes de Revisão Integrativa de Pesquisa, que consiste em uma abordagem metodológica cujo propósito é realizar uma síntese sistemática e organizada dos resultados de pesquisas sobre um tema ou questão específica, visando contribuir para o aprofundamento do conhecimento nesse domínio.

Conforme destacado por Cooper (1982, 1989), essa metodologia envolve a agregação de resultados de estudos primários que abordam o mesmo tópico, com o intuito de analisar e sintetizar esses dados, com o objetivo de oferecer uma compreensão mais completa e abrangente de um fenômeno particular.

Foram utilizados como fonte de pesquisa materiais impressos e virtuais, disponíveis na rede mundial de computadores, como livros e artigos acadêmicos, usando como palavras chaves para pesquisa Motores de Indução Trifásicos; Falhas; Manutenção Preditiva. Logo, estudos como o de Souza (2022) e Correa (2015), foram estudados e analisados, justificando assim a relevância do assunto na atualidade, não apenas teoricamente, mas também condizendo com a aplicação na realidade profissional.

Para consolidar as informações coletadas e apresentar uma visão abrangente dos desafios e soluções, utilizaremos uma metodologia de síntese de dados. Isso envolverá a categorização e organização das descobertas em temas e tópicos relevantes, permitindo uma análise mais clara e estruturada.

Dessa forma, este artigo parte da conceitualização até a descrição mais detalhada do tema abordado, baseando-se em trabalhos existentes na literatura. Objetiva-se, portanto, apresentar uma visão geral dos motores de indução trifásico para operações industriais, de forma a identificar pontos relevantes relacionados ao assunto.

REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo, entraremos no âmago do conhecimento teórico que sustenta nossa análise sobre os motores de indução trifásicos e suas relações com a manutenção preditiva. Antes de explorar os detalhes e nuances dos motores de indução e das técnicas de manutenção, é essencial estabelecer uma base sólida de compreensão.

Motores de indução trifásicos, como fundamentais fontes de energia mecânica nas indústrias, desempenham um papel crítico na produção e no funcionamento eficaz de uma variedade de equipamentos. Para entender plenamente sua relevância, estrutura e operação, é fundamental partir dos princípios conceituais. A energia elétrica é transformada em energia mecânica por esses dispositivos, impulsionando uma ampla gama de processos industriais. Antes de mergulharmos nas especificidades dos motores de indução e de suas falhas, este capítulo estabelecerá o contexto e a base teórica necessária para compreender os temas subsequentes.



O capítulo inicia explorando os conceitos essenciais relacionados aos motores de indução trifásicos, discutindo sua estrutura, operação e as diferenças entre os rotores de gaiola de esquilo e os rotores bobinados. Em seguida, aborda-se a relação crítica entre falhas, manutenção e tecnologias, destacando a importância da manutenção preditiva como uma abordagem inovadora que busca otimizar a eficiência e prolongar a vida útil desses motores. Através dessa base teórica, o leitor estará preparado para explorar em detalhes as técnicas, metodologias e ferramentas que capacitam a manutenção preditiva de motores de indução trifásicos.

3.1 Motores de Indução Trifásicos

Conceitualmente, motores elétricos consiste em dispositivos ou máquinas que possuem capacidade de transformar a energia elétrica resgatada da rede de distribuição em energia mecânica. No setor industrial, os motores de indução trifásicos é o modelo de dispositivo de corrente alternada de maior destaque em utilização para acionar cargas mecânicas (Petruzella, 2013).

O Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2022 apresenta como resultado de seus estudos que a indústria é atualmente o principal consumidor de energia elétrica no Brasil, correspondendo a 36,3% do consumo de energia elétrica no país no ano de 2021, isso se deve a intenso e constante utilização de motores elétricos, uma vez que estes desempenham um importante papel no setor e podem ser classificados como “o coração das máquinas modernas” (EPE, 2022).

Justificados por sua robustez, os motores de indução têm uma ampla utilização que não pode ser negada. Com necessidade mínima de manutenção, acessibilidade e versatilidade na aplicação, utilizá-los é uma opção prática, pois se adaptam aos mais diversos ambientes e aplicações, construído para resistir a várias condições adversas (Altoé, 2017).

Estruturalmente, os motores de indução possuem o estator, parte estática que recebe a corrente elétrica e tem por responsabilidade produzir o campo eletromagnético, permitindo a indução de uma força magneto motriz, e o rotor, parte móvel, que tem por característica a ação de girar em torno de seu próprio eixo devido à interação com o campo magnético e por consequência tem a produção de torque. Os dois elementos utilizam-se conjuntamente de um eixo onde é inserido o enrolamento de condutores pertencentes a três circuitos simétricos do sistema trifásico e a partir do mútuo funcionamento das partes se obtém a transformação da energia elétrica para mecânica (Petruzella, 2013).

Em se tratando de rotores de motores de indução trifásico, existem dois modelos distintos, rotor gaiola de esquilo e rotor bobinado apresentados na imagem a seguir:

Figura 1. Comparação entre o rotor gaiola de esquilo e o rotor bobinado.



Fonte: Adaptado de IMD (2019).



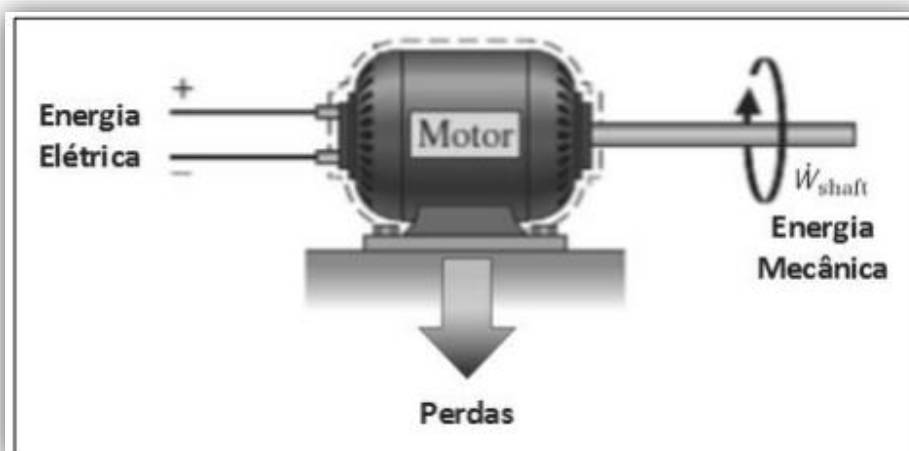
O rotor bobinado é constituído por enrolamentos trifásicos similares aos pertencentes ao estator. Neste modelo, a ligação trifásica é comumente em estrela (Y) e os terminais são acoplados aos anéis deslizantes do eixo do rotor. Os enrolamentos são curto-circuitados por escovas que se sustentam nos anéis deslizantes. O rotor bobinado, possibilita a inserção de resistências extras ao circuito e as correntes podem ser mensuradas, sendo possível modificar a característica de conjugado versus velocidade do motor (Chapman, 2013).

Este modelo de rotor possui algumas vantagens distintas sobre os demais tipos de rotores, como a habilidade de regular a velocidade através do controle das correntes, para diferentes níveis de cargas. Isso se deve à variação da resistência do reostato, acarretando a mudança no valor do escorregamento, e, conseqüentemente uma modificação da velocidade do rotor aperfeiçoando o torque-velocidade para diferentes utilizações. Contudo, esses rotores têm seus empregos limitados a cenários exclusivos, não sendo largamente utilizados nas manufaturas e muito disso se deve a sua alta necessidade de manutenção nos anéis deslizantes e às escovas de carvão, além da alta inércia do rotor (Fitzgerald et al., 2003; Tong, 2014).

Diferentemente dos rotores bobinados, os rotores do modelo gaiola de esquilo são amplamente utilizados pelas indústrias. Estruturalmente, esse modelo de rotor é constituído por um encadeamento de condutores disposto sobre as ranhuras superficiais contidas nesta parte do equipamento postas em colapsos através de anéis localizados em suas periferias. Devido a sua constituição possuir traços similares à aparência de gaiolas rotativas para roedores de pequeno porte, este tipo de rotor recebeu essa nomenclatura para identificação do mesmo no mercado (Chapman, 2013).

Ainda sobre os rotores gaiola de esquilo, se pode citar dentre seus atributos e peculiaridades de funcionamento que estes, comumente operam com a velocidade constante, valores de corrente de partida muito elevados resultando na oscilação da tensão de linha (Petruzella, 2013).

Figura 2. Esquema simplificado de conversão de energia de motores elétricos.



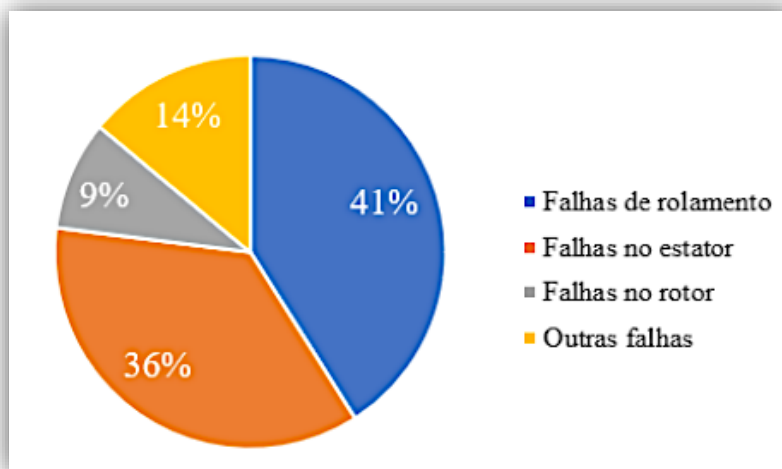
Fonte: (TORO, 1994, apud Mendes, 2023)



Motores elétricos, cuja função é a de conversão de energia, tem o intuito de suprir cargas de diferentes tipos. Com isso, no decorrer desse processo, há perdas de energia, podendo estas ser de caráter constantes (podendo citar, por exemplo, atrito e ventilação), perdas de magnetização ou mesmo perdas variáveis, provenientes do aquecimento dos enrolamentos do rotor e estator (Mendes, 2023) (Figura 2).

Contudo, motores de indução trifásicos estão muito susceptíveis a desgastes naturais, sendo geralmente causados por questões referentes à sobrecarga mecânica, ambientes inadequados com excesso de umidade e elevada temperatura. Fatores que acentuam o processo de deterioração do equipamento, reduzindo consideravelmente sua vida útil (Yetgin, 2019).

Figura 3. Distribuição de falhas de um motor de indução trifásico.



Fonte: Liang, Ali, & Zhang (2020).

Aproximadamente 36% das falhas dos motores são provenientes de problemas de enrolamento no estator, 41% relacionadas a falhas de rolamento, 14% são referentes às questões como excentricidade, acoplamento, desalinhamento e as falhas no rotor totalizam apenas 9% (Liang, Ali, & Zhang, 2020) (Figura 3).

A partir da observação do funcionamento das máquinas de indução, pode-se extrair particularidades que auxiliam na distinção entre operação normal (em condições dentro das margens pré-estabelecidas pelo fabricante) e estado de falha (estado que apresenta alguma divergência funcional do equipamento), sendo esta de caráter elétrico ou mecânico (Cherif et al., 2020). Com isso, o desenvolvimento de técnicas não invasivas (TNI) tem apresentado ascendência no setor industrial no que tange o diagnóstico de falhas em MITs com o intuito de melhorar a presciência de falhas em máquinas elétricas (Lucas et al., 2020).

A Figura 4 abaixo retrata um resumo dos diferentes tipos de fontes de falhas em um motor de indução, separando primeiramente as falhas internas e externas e depois abrindo o campo de análise de forma a visualizar separadamente as falhas elétricas das falhas mecânicas (Liang, Ali, & Zhang, 2020).



Figura 4. Resumo dos diferentes tipos de fontes de falhas em um motor de indução.



Fonte: Liang, Ali & Zhang (2020).

A interrupção no processo produtivo devido a uma falha no equipamento, ou por suspensão inesperada desta, traz impactos para a indústria pelas horas sem produzir. Assim, “conforme tendência do atual mercado globalizado, onde se exige maior produção com menor custo, não existe mais margem para planos de manutenção ineficientes” (Gonçalves, 2019).

3.2 Falhas x Manutenção x Tecnologias

De acordo com a normativa ABNT NBR 5462, o termo manutenção pode ser conceituado como a “combinação de todas as ações técnicas e administrativas, incluindo as de supervisão, destinadas a manter ou recolocar um item em um estado no qual possa desempenhar uma função requerida”.

A gestão de manutenção é uma peça fundamental no controle das atividades e no monitoramento da saúde dos maquinários em uma empresa, e o bom uso de suas funções e da preferência em agir de forma planejada, faz com que a vida útil dos maquinários seja preservada e/ou até mesmo estendida, além de proporcionar um melhor aproveitamento das horas disponíveis da equipe operacional, possibilita melhorar a rastreabilidade das ocorrências, entre outras atividades ligadas ao suporte, redução dos custos e prevenção a perdas, sejam estas de FTEs, produção ou rentabilidade via comercialização do produto (Onílio et al., 2021).

Nesse sentido, Corrêa (2015) afirma que:

As falhas podem ser previstas a partir de técnicas e procedimentos, com base no tempo e na condição, a partir de técnicas de predição. Mesmo com a previsão das falhas de cada componente de um determinado processo, ainda assim a manutenção pode ser custosa devido a dispersão das estimativas ao longo do tempo.



Com isso, a cada dia, as indústrias buscam manter-se atualizadas tecnologicamente e fazem uso de práticas, métodos e/ou metodologias eficientes na manutenção, com o intuito de melhorar a eficiência e aumentar a disponibilidade da produção. Atualmente, a tecnologia tem se tornado cada vez mais um grande colaborador para a melhoria contínua, levando as mais diversas áreas e equipamentos a praticidade, confiabilidade e eficácia. Na literatura, dentro desse universo computacional e tecnológico, a inteligência artificial é uma das técnicas que tem apresentado grande ascendência e está sendo muito implementada na indústria, contribuindo na estimativa de performances dos equipamentos, prevendo a necessidade de manutenção, além de provisionar possíveis modos de falhas e aspectos semelhantes com antecedência (Bukhsh et al., 2019).

Dentre os modelos existentes de manutenção, a preditiva é a pioneira na quebra de paradigma na manutenção, contrariando o senso comum e revolucionando o tradicionalismo no que tange às técnicas de manutenção através da associação com métodos de monitoramento e controle contínuo dos equipamentos. De acordo com Souza (2013):

A Manutenção Preditiva ou Condicionada surgiu na década de 70 como um conceito evoluído da manutenção preventiva sistemática em que, em vez de ações de manutenção em intervalos de tempo definidos para trocas de componentes, teremos ações de inspeção em intervalos de tempo definidos. Manutenção preditiva é aquela que indica as condições reais de funcionamento das máquinas com base em dados que informam os seus desgastes ou processo de degradação. Trata-se da manutenção que prediz o tempo de vida útil dos componentes das máquinas e equipamentos e as condições para que esse tempo de vida seja bem aproveitado, daí o nome manutenção condicionada.

O avanço tecnológico é um grande aliado dos sistemas de monitoramento desde a implantação ao uso cotidiano para controle e diagnóstico com a capacidade de se identificar o desempenho real e momentâneo dos equipamentos e possíveis condições adversas, possibilitando uma avaliação confiável sem a necessidade de parar o processo de produção. Com a captação e análise das informações extraídas e identificação de alguma falha ou baixo desempenho, permite que se atue preventivamente através de uma manutenção corretiva planejada. Portanto, pode-se afirmar que a manutenção preditiva instaura benefícios sobre os demais modelos, pois suas atuações são efetuadas com o equipamento produzindo (Kardec & Nascif, 2009).

O monitoramento e o diagnóstico de motores de indução trifásicos são provenientes de informações captadas diretamente dos equipamentos a partir da utilização de sensores ou demais instrumentos que possuem similares capacidades. Uma vez extraídos, esses dados são devidamente tratados, de modo a evidenciar características que podem proporcionar a realização de uma análise detalhada, fundamentada e confiável. Existem diversos sinais que podem ser coletados para estudo, dentre os quais podem-se destacar os sinais de vibração (Amezquita-Sanchez et al., 2017).



É perceptível que as vibrações são fundamentais no apoio à manutenção preditiva. Um motor, mesmo em condição normal de funcionamento, possui uma vibração específica. Levando-se em consideração os intervalos apresentados em condições normais é factível fazer um exame comparativo com o valor obtido nas medições periódicas e verificar o comportamento dos motores de modo a observar se este está dentro do padrão ou se tem alguma divergência (Holanda, 2016).

Na indústria moderna (4.0) existe uma busca pelo interfaceamento direto das máquinas (MTIs) com computadores para identificação de falhas via a visualização de sinais, os sistemas integrados têm se amparado na construção e utilização de padrões que de forma muito eficiente contribuem significativamente para o diagnóstico de anomalias. Os sensores são peças-chave na construção dessa automatização, são ferramentas inteligentes, pois participam da coleta, prepara, processa e transforma os dados captados nos equipamentos em informações, disponibilizando-as para análise de forma integrada, gerando um valor agregado à aplicação (Sick, 2023).

Outro ponto relevante referente à manutenção é o teste de ensaio de resistência de isolamento em motores elétricos, essencial para avaliar o estado do dielétrico do motor. Um material dielétrico é isolante e pode exibir uma estrutura de dipolo elétrico. Durante o teste uma alta tensão de corrente contínua é aplicada entre os enrolamentos e a carcaça do motor. A corrente de fuga resultante aumenta à medida que o isolamento se deteriora. De acordo com Almeida (2004), a tensão de teste para motores de indução trifásica de baixa potência é de 500 Volts mais duas vezes a tensão nominal. Os resultados desse teste estão relacionados ao estado de limpeza e secagem do motor: uma alta resistência indica isolamento limpo e seco; enquanto um valor abaixo do esperado sugere isolamento sujo e úmido (Almeida, 2004).

Contudo, pode se afirmar que a manutenção preditiva, permite a potencialização dos recursos, além de garantir uma maior assertividade, confiabilidade e rapidez nas tomadas de decisões e nas ações de manutenção atuando de forma prévia e planejada. O setor de manutenção, utilizando-se da manutenção preditiva, é capaz de contribuir positivamente para se atingir os objetivos da organização, refletindo na ascendência e competitividade dessa em seu segmento de mercado (Souza, 2022).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A discussão sobre motores de indução trifásicos e sua importância nas operações industriais destaca-se como um tema central na indústria. Esses motores desempenham um papel fundamental na conversão de energia elétrica em energia mecânica, impulsionando a produção e a eficácia de diversos processos industriais. Suas vantagens incluem robustez, versatilidade e baixo custo de manutenção, o que os torna amplamente adotados no setor.

Contudo, a prevalência desses motores também os torna vulneráveis a falhas, que podem resultar em paradas inesperadas e custos significativos. A manutenção preditiva surgiu como uma abordagem inovadora para antecipar e planejar a manutenção com base em dados que indicam problemas iminentes. O uso de sensores desempenha um papel crucial na obtenção



de informações sobre o funcionamento das máquinas elétricas, permitindo a detecção precoce de falhas.

A análise revelou que as falhas mais comuns em motores de indução trifásicos estão relacionadas a problemas de enrolamento no estator e falhas de rolamento. Isso destaca a necessidade de métodos eficazes de monitoramento para identificar essas falhas e evitar paradas não planejadas.

A manutenção preditiva se destaca como uma abordagem eficaz para otimizar a eficiência e prolongar a vida útil dos motores de indução trifásicos. A tecnologia desempenha um papel fundamental, com a inteligência artificial e sistemas de monitoramento integrados permitindo análises em tempo real.

À medida que avançamos, há várias oportunidades de pesquisa que merecem destaque. Primeiramente, o desenvolvimento de modelos preditivos mais avançados, incorporando algoritmos de aprendizado de máquina e análises avançadas de dados, pode aumentar a precisão na detecção de falhas.

Além disso, a integração de sistemas de Internet das Coisas (IoT) oferece potencial para a coleta de dados em tempo real de uma variedade de sensores, tornando o monitoramento mais abrangente. É fundamental investigar como a manutenção preditiva pode ser aplicada com sucesso em ambientes industriais adversos.

Um tópico crucial que merece mais atenção é a avaliação do impacto econômico da manutenção preditiva. Estudos que quantifiquem os benefícios financeiros de adotar essa abordagem seriam inestimáveis para as empresas.

Finalmente, investir em treinamento e qualificação de pessoal é essencial para garantir a implementação eficaz de sistemas de manutenção preditiva.

Em resumo, a manutenção preditiva é essencial para garantir a eficiência e confiabilidade dos motores de indução trifásicos nas operações industriais. Investigações futuras nessas áreas prometem melhorar ainda mais a gestão de ativos industriais, impulsionando a competitividade das organizações.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este artigo sublinha, de maneira inequívoca, a centralidade dos motores de indução trifásicos nas operações industriais, enfatizando sua contribuição fundamental para a eficiência e produtividade de diversos processos na indústria. A onipresença e a confiabilidade desses motores os tornam verdadeiros pilares da produção industrial, desempenhando um papel insubstituível em inúmeras aplicações.

Contudo, essa disseminação e importância também trazem consigo o desafio inerente de manter esses ativos operacionais de forma consistente, eficaz e econômica. A parada não planejada de um motor de indução trifásico pode acarretar custos substanciais para as indústrias. É aqui que a manutenção preditiva se destaca como uma abordagem revolucionária para a gestão desses motores.



A capacidade de monitorar continuamente o estado de funcionamento deles por meio de sensores e a análise de dados permite a identificação precoce de problemas iminentes, proporcionando uma oportunidade de intervenção antes que ocorra uma falha crítica. Essa previsibilidade é um trunfo inegável, contribuindo para a redução de custos, o aumento da vida útil dos motores e a otimização dos processos produtivos.

Este estudo aprofundou a investigação sobre as falhas mais comuns nos motores de indução trifásicos, destacando especialmente as relacionadas a problemas de enrolamento no estator e falhas de rolamento. A identificação destes padrões de falhas oferece uma base sólida para a implementação de sistemas de manutenção preditiva mais eficazes e direcionados.

É importante ressaltar que a manutenção preditiva não se limita apenas à identificação de falhas. Também se estende à otimização do desempenho, economia de energia e à melhoria contínua dos processos de produção. Com o avanço da tecnologia, a integração de sistemas de Internet das Coisas (IoT) e a inteligência artificial têm ampliado ainda mais as capacidades de monitoramento e análise de dados, promovendo uma manutenção preditiva ainda mais eficiente.

Entretanto, embora as vantagens da manutenção preditiva sejam claras, a sua implementação bem-sucedida requer um comprometimento abrangente. Isso inclui o desenvolvimento de modelos preditivos avançados, o investimento em treinamento e qualificação de pessoal, bem como a avaliação do impacto econômico dessa abordagem.

Em síntese, este artigo oferece uma visão abrangente sobre a importância inegável dos motores de indução trifásicos na indústria e destaca a manutenção preditiva como um alicerce inovador para garantir a operação ininterrupta e eficiente desses motores. Suas contribuições científicas, metodológicas e práticas incluem a ênfase na prevenção de falhas, a incorporação de tecnologias avançadas, bem como a identificação de desafios e oportunidades para pesquisas futuras nesse campo.

No horizonte industrial do futuro, a combinação de motores de indução trifásicos robustos e manutenção preditiva inteligente promete elevar ainda mais a competitividade das organizações, impulsionando a inovação e a eficiência nas operações industriais. Esse é, sem dúvida, um caminho a ser trilhado por empresas que buscam manter-se na vanguarda de suas respectivas indústrias, garantindo a sustentabilidade de seus processos e a excelência operacional.

REFERÊNCIAS

- ABNT. NBR 5462:1994, *Confiabilidade e manutenibilidade*.
- Almeida, J. E. (2004). *Motores Elétricos: Manutenção e Testes* (3ª ed.). Editora Hemus.
- Altoé, L., et al. (2017). *Políticas públicas de incentivo à eficiência energética*. Viçosa: Estudos avançados.
- Amezquita-Sanchez, J., et al. (2017). Fractal dimension and fuzzy logic systems for broken rotor bar detection in induction motors at start-up and steady-state regimes. *Measurement Science and Technology*, 28(7).
- Bukhsh, Z. A., et al. (2019). Predictive maintenance using tree-based classification techniques: A case of railway switches. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 101.
- Chapman, S. J. (2013). *Fundamentos de máquinas elétricas*. AMGH Editora.
- Cherif, H., et al. (2020). Early detection and localization of stator inter-turn faults based on discrete wavelet energy ratio and neural networks in induction motor. *Energy*, 212, 118684.
- Corrêa, R. F. (2015). *Otimização de periodicidade nos planos de manutenção preventiva: uma modelagem matemática*.
- EPE, Brasil. (2022). *Anuário estatístico de energia elétrica 2022: Ano base 2021*. In: Fitzgerald, A. E., Kingsley Junior, C., & Umans, S. D. (2003). *Electric Machinery* (6ª ed.). New York: McGraw-Hill.
- Gil, A. C. (2008). *Como elaborar projetos de pesquisa* (4ª ed.). São Paulo: Atlas.



- Gonçalves, J. L. (2019). *Aplicação de Manutenção Centrada em Confiabilidade em Equipamentos de Laboratório*. Monografia, Universidade Tecnológica Federal do Paraná.
- Holanda, S. M. S. (2016). *Aplicação da Manutenção Preditiva por análise de vibrações em equipamentos de trens urbanos com plano de manutenção proposto*.
- Kardec, A. & Nascif, J. (2009). *Manutenção - Função Estratégica* (3ª ed.). Rio de Janeiro: Qualitymark.
- Liang, X., Ali, M. Z., & Zhang, H. (2020). Induction motors fault diagnosis using finite element method: A review. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 56(2), 1205-1217.
- Lucas, G. B. (2020). *Uma nova técnica para monitoramento e diagnóstico de desequilíbrios de tensão aplicada em motores de indução trifásicos empregando sensores de emissão acústica e Transformada Wavelet*. Dissertação de mestrado, Universidade Estadual Paulista (UNESP).
- Mendes, M. H. R. (2023). *Estudo sobre acionamentos de motores elétricos aplicado a uma indústria de fabricação de ração animal*. Monografia, Universidade Federal de Uberlândia.
- Onílio, A. S., et al. (Dezembro de 2021). *IoT em Motores De Indução Trifásicos*. Repositório Universitário da Ânima (RUNA).
- Petruzella, F. D. (2013). *Electric Motors and Control Systems* (1ª ed.). New York: The McGraw-Hill Global Educations Holdings.
- Pisching, M. A. (2018). *Arquitetura para descoberta de equipamentos em processos de manufatura com foco na indústria 4.0*. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo.
- SICK Brasil. (2023). Disponível em: [URL].
- Souza, V. C. (2013). *Organização e Gerência da Manutenção* (5ª ed.). São Paulo: All Print.
- Souza, V. C., et al. (2022). *Utilização das tecnologias da indústria 4.0 na manutenção preditiva através do monitoramento de equipamentos e instalações*. *Brazilian Journal of Development*, 8(1), 7063-7083.
- Stief, A., et al. (2019). *A PCA and two-stage bayesian sensor fusion approach for diagnosing electrical and mechanical faults in induction motors*. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 66(12), 9510-9520.
- Tong, W. (2014). *Mechanical design of electric motors*. CRC Press.
- Toro, V. D. (1994). *Fundamentos de Máquinas Elétricas*. Rio de Janeiro, RJ: LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S. A, p.107-109.
- Yetgin, A. G. (2019). Effects of induction motor end ring faults on motor performance: Experimental results. *Engineering Failure Analysis*, 96, 374-383.

