

Análise de Custos de Manutenção e Diagnósticos de Falhas em Motores de Indução Trifásicos

Samuel Alessandro Cunha Silva
Centro de Engenharias – Departamento de Engenharia e
Tecnologia
Universidade Federal Rural do Semi-Árido – UFERSA
Mossoró, RN, Brasil
samuel.alexandro705@gmail.com

Dr. Victor de Paula Brandão Aguiar
Centro de Engenharias – Departamento de Engenharia e
Tecnologia
Universidade Federal Rural do Semi-Árido – UFERSA
Mossoró, RN, Brasil
victor@ufersa.edu.br

Resumo — A eficiência energética consiste num tema que é constantemente abordado na busca de redução dos gastos, de forma que se possa manter não só a quantidade, mas também a qualidade do serviço apresentado. Na matriz energética de consumo nacional, as indústrias ocupam uma posição de destaque e a maior parcela desse consumo se deve à utilização de motores elétricos. A manutenção e os diagnósticos de falhas de motores elétricos visam à previsão, ao controle e à solução de diversos tipos de problemas relacionados aos motores que podem gerar falhas e gastos não programados: tornando seu uso mais eficiente, diminuindo o tempo de parada e aumentando a vida útil do equipamento. Mas, dependendo do tipo de manutenção, da falha e do equipamento utilizado, entre outros fatores, a manutenção pode acarretar um custo elevado, tornando a sua implementação inviável. Logo, a pesquisa se propõe a estudar e analisar custos e a viabilidade econômica da utilização de alguns dos principais métodos de manutenção e diagnósticos de falhas em motores de indução trifásicos, com o objetivo de gerar conhecimentos que facilitarão a escolha dos tipos de procedimentos de manutenção em trabalhos posteriores. Para tanto, é realizada uma análise através de referenciais teóricos e dados do setor energético sobre os tipos e custos de manutenção e diagnósticos de falhas em motores de indução trifásicos.

Palavras-chave — *motores de indução trifásicos, manutenção, análise de falhas, custos, viabilidade*

I. INTRODUÇÃO

No Brasil, estima-se que as indústrias consomem cerca de 40% da energia elétrica consumida no país e que cerca de 70% desse valor estão relacionados a gastos com motores elétricos (cerca de 28% do nacional). Ademais, a maioria dos desperdícios energéticos nas indústrias está ligado a perdas com motores [1].

Os motores elétricos apresentam uma forte presença nos mais diversos ramos industriais, desde esteiras em indústrias alimentícias a bombas de irrigação, na produção de eletrodomésticos, além de indústrias de matéria-prima como petróleo e mineração. Muitas dessas empresas possuem um processo contínuo de produção que, em caso de falha em algum motor, pode ocasionar uma parada indesejada em uma linha de produção, gerando prejuízos consideráveis até que seja efetuado o devido reparo ou a troca do motor (que pode ter um valor elevado, considerando o tipo).

Considerando os fatores citados anteriormente há, dentre outros, a segurança da planta, danos, queima do equipamento, segurança dos colaboradores da empresa, etc. Assim, deve

existir uma manutenção contínua e periódica dos motores elétricos, além dos seus sistemas de acionamento e equipamentos ligados.

A manutenção e o diagnóstico de falhas devem ser realizados regularmente para aumentar a vida útil do equipamento. Tais cuidados podem ser os mais variados, dependendo do nível da tecnologia aplicada e do nível de controle que se procura no sistema. Entre algumas das principais medidas podem ser: inspeção periódica (como verificação do alinhamento do eixo, fixação da base e condição da correia), limpeza, verificação do desgaste da escova e do comutador, testes de isolamento dos rolamentos, verificação de lubrificação, verificação de calor, ruído e vibração excessivos, excesso de partidas, entre outras [2].

O plano de manutenção deverá ser aplicado conforme a necessidade da empresa e também deverá considerar fatores como tempo de máquina parada, a frequência, o custo de implementação e o valor das peças de substituição.

Um plano de manutenção que utilize tecnologias mais avançadas, e que tenha um controle maior que o necessário, pode gerar um aumento de custo para o empreendimento. O mesmo pode acontecer quando se utiliza um planejamento que não estime com precisão determinado comportamento que possa vir a se tornar uma falha, que pode danificar o equipamento ou a troca desnecessária de peça.

Portanto, este artigo tem o objetivo de realizar um estudo sobre o custo e a viabilidade dos tipos de manutenção e análise de falhas, facilitando a seleção do tipo de manutenção em trabalhos posteriores. A pesquisa será realizada através de referenciais bibliográficos como livros, artigos científicos, dados do setor energético, entre outros.

II. MANUTENÇÃO INDUSTRIAL

Inicialmente, para que se tenha um melhor entendimento sobre o tema abordado, faz-se necessário abordar alguns conceitos fundamentais com relação à manutenção industrial, conceitos esses que serão importantes para melhor compreensão do desenvolvimento da pesquisa apresentada ao do artigo. Também serão abordados os principais tipos de manutenção mais utilizados atualmente no Brasil.

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), em sua Norma Brasileira 5492/1994 (NBR 5492/1994), coloca o termo manutenibilidade como a capacidade de manter ou realocar determinado item para realizar as funções ou ações requeridas. Isso acontece através de um conjunto de técnicas

e procedimentos já determinados previamente. O desempenho do seu suporte está ligado à capacidade da organização em prover os recursos necessários para desenvolver e realizar a manutenção [3].

É importante ressaltar que a manutenção em [4] também pode ser entendida como o conjunto de técnicas ou procedimentos que possuem o objetivo de garantir a confiabilidade e disponibilidade de um determinado equipamento ou instalação, para realizar a sua função, seja ela de produção ou serviço, com segurança, preservando o ambiente no qual o equipamento é inserido e com custos adequados.

A partir dos conceitos de manutenção dados anteriormente, é possível introduzir o conceito de confiabilidade e disponibilidade. O termo confiabilidade pode ser entendido como a probabilidade de um item, ou sistema, desempenhar suas tarefas de forma satisfatória dentro do que é desejado, em um determinado período de tempo, sobre condições determinadas pelo local de uso e seu objetivo [5].

Com base em [4], a confiabilidade pode ser dada pela expressão presente em (1), em que a confiabilidade é dada por $R(t)$, e é base do logaritmo neperiano, λ é o número de falhas do equipamento durante o seu período de operação (ou como é conhecida taxa de falhas), t é o período de tempo.

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (1)$$

Por sua vez, a disponibilidade pode ser compreendida como o percentual de tempo em que o equipamento se encontra disponível para realizar sua função em um determinado período de tempo. A disponibilidade deve levar em consideração os tempos de paradas, limpeza, manutenções, entre outros fatores [6]. Ela também pode ser entendida como a capacidade de o item estar em condições de uso satisfatórias para executar determinada tarefa em um determinado tempo, considerando aspectos como a confiabilidade e a manutenibilidade [3].

Em termos globais, é possível definir a disponibilidade utilizando a expressão em (2). A disponibilidade operacional é a que mais se aproxima do real, gerando interesse na empresa. O termo TMP se refere ao tempo médio de paralisações, incluindo o tempo de reparos, manutenções, inspeções, atrasos, deslocamento, entre outros que ocasionam a indisponibilidade do equipamento. O termo TMEM é tido como o tempo médio entre falhas, manutenções, etc., o qual é dado pelo tempo observado, em um período determinado e o número de observações [4].

$$Disp. Op. (\%) = \frac{TMEM}{TMEM + TMP} * 100 \quad (2)$$

Para fins de desenvolvimento da pesquisa, foram utilizados os três principais tipos de manutenção presentes atualmente no Brasil: manutenção corretiva (planejada e não planejada), preventiva e preditiva. Entretanto, é possível citar outras que mostram crescente aumento no uso no setor industrial, como no caso da manutenção detectiva e da engenharia de manutenção. Também existem ferramentas que utilizam as manutenções anteriores como base, como é o caso da Manutenção Preventiva Total (TPM), da Manutenção Centrada na Confiabilidade (RCM) e da Manutenção Baseada na Confiabilidade (RBM)

A. Manutenção Corretiva

A manutenção corretiva vê-se pertinente em virtude de surgimento de uma pane, cuja finalidade é recolocar o equipamento em condições de executar a sua funcionalidade [3]. Ele pode ser melhor visualizado quando um equipamento, mediante a um dano, quebra, há paradas imprevisíveis. Ele é consertado ou substituído imediatamente para que o funcionamento possa ser restabelecido. Entretanto, essa manutenção pode não ocorrer a tempo de evitar prejuízos maiores, os quais podem variar desde parada da linha de produção, gastos com quebras de peças, deslocamento de trabalhadores, risco à segurança do trabalhador, entre outros [5].

O conceito de manutenção corretiva varia entre as empresas. Alguns autores consideram-na somente quando acontece a pane do sistema, outros a consideram quando há a ocorrência de falhas ou na identificação de algum desempenho deficiente, ficando a critério da empresa qual critério adotar para a tomada de decisão e criar seu plano de manutenção [6].

A manutenção corretiva se divide em dois tipos: não programada e programada. A manutenção corretiva não programada ou emergencial (como é conhecida) acontece desde a identificação da falha (quando o evento já ocorreu). Geralmente esse tipo de manutenção gera custos muito elevados, acarretando perdas na produção, diminuição da qualidade do produto, aumento dos custos de manutenção, dentre outros. Dependendo da linha e do setor que o equipamento opere, a falha pode comprometer outros equipamentos, acarretar danos maiores a outras linhas de produção, à estrutura física do empreendimento e até mesmo gerar riscos à segurança física dos trabalhadores [6].

A manutenção corretiva programada é um tipo de manutenção definida por decisão de caráter gerencial e de planejamento, que através da utilização de informações fornecidas pelo acompanhamento do equipamento (que muitas das vezes são fornecidas por métodos de manutenção preditiva) chegam à conclusão estratégica de que é mais vantajoso utilizar o equipamento até quebrar. Para esse tipo de manutenção, existe um planejamento com procedimentos preparados para o momento em que a máquina quebrar, como peças de reposição, “kit” de reparo rápido, etc., facilitando a troca, ou conserto do equipamento [4].

A manutenção corretiva programada, possui vantagens com relação à emergencial, como trabalho mais rápido, seguro e com um menor custo. Para a adoção da manutenção corretiva programada, é necessário considerar fatores como [6]:

- Conciliar os interesses da produção, com a necessidade de intervenção;
- As falhas não ocasionarem risco ao meio ambiente, funcionários, instalações e clientes;
- Não deve diminuir a qualidade do produto;
- Empresas que não necessitam de um grande volume pode ser mais vantajoso;
- A existência de peças sobressalentes, equipamentos e ferramentas em acesso fácil;
- Recursos humanos suficientes e capacitados;

B. Manutenção preventiva

A manutenção preventiva é realizada em intervalos periódicos determinados por critérios pré-estabelecidos. Ela tem o objetivo de diminuir a probabilidade de ocorrência de falhas, ou de deteriorações do funcionamento do item [3]. Ela acontece antes da falha ocorrer. Através da elaboração de um plano que se utiliza de probabilidades estatísticas, são programadas manutenções periódicas, buscando a diminuição do número de paradas imprevistas e deterioração dos equipamentos, que em alguns casos podem gerar danos à empresa, ou seja, defeitos pequenos que podem ocasionar danos maiores ao equipamento [7].

Esse tipo de manutenção aplica métodos baseados na previsão da durabilidade dos equipamentos em relação ao seu tempo de uso, a sua funcionalidade, e ao seu ambiente de trabalho, dentre outras condições, a fim de encontrar, solucionar, ou atenuar os defeitos que diminuem essa vida útil [5]. Ao aplicar ações preventivas, devem ser considerados fatores como os custos com mão de obra capacitada, peças, a necessidade de parada, entre outros fatores que serão vistos posteriormente na pesquisa [6].

Na manutenção preventiva, uma de suas principais características é a substituição de peças no período previsto no seu programa de manutenção. O estado da peça normalmente não é considerado, o que pode tornar seu uso desvantajoso em determinadas situações, já que pode haver a troca de peças que ainda estejam apropriadas para o uso. Mas há setores em que a troca periódica de peças pode ser fundamental, para evitar falhas que possam gerar catástrofes maiores. Também é bastante utilizado em indústrias de operação contínua, como indústrias petroquímicas, siderúrgicas, automobilísticas, etc. [8].

Considerando os autores em [4], [6] e [8], podemos citar algumas vantagens e desvantagens como:

1) Vantagens:

- Aumento da vida útil dos equipamentos;
- Aumento do controle de data de manutenção, número de realizações intervenções, consumo de materiais (como troca de peças) e outros custos procedentes;
- Melhora a qualidade do produto apresentado, já que diminui o número de falhas ocasionadas por deterioração;
- Diminuição do número de interrupções no processo produtivo.

2) Desvantagens:

- O risco de trocas de peças em boas condições de funcionamento;
- Aparecimento de defeitos inexistentes, ocasionados por falhas humanas, falhas de peças sobressalentes (ou a sua falta), contaminações de óleos e falhas dos procedimentos de manutenção.

C. Manutenção preditiva

A manutenção preditiva, também chamada manutenção controlada, utiliza técnicas de análise, controle e monitoramento da condição do equipamento, baseando-se assim em meios de supervisão centrada e em amostragem. Buscando-se, pois, a redução da necessidade do uso de outros tipos como a preventiva e a corretiva [3].

Ela tem o objetivo de prever (ou prevenir) quando as falhas vão ocorrer. Através do acompanhamento de diversos parâmetros, ela objetiva-se em permitir a operação da máquina por um maior tempo possível. Com auxílio desse controle, ela otimiza a troca de peças e os intervalos de manutenção, utilizando as peças ou os componentes analisados, até próximos do limite de sua vida, diminuindo assim os custos do elemento e prevenindo com uma eficiência maior interrupções futuras. Apesar de algumas tecnologias disponíveis serem novas, perante certas técnicas, a manutenção preditiva possui um valor elevado, apresentam bons resultados [7].

Para se adotar a manutenção preditiva, são necessárias algumas condições básicas como: o equipamento ou a instalação deve permitir o uso dos tipos de monitoramento, a falha deverá ser de causas que sejam possíveis o monitoramento. Quanto ao custo do item analisado, se valerá a pena o uso da técnica. Deverá ser implantado um plano de acompanhamento, análise, diagnóstico sistematizado [4].

A manutenção preditiva pode utilizar dois tipos de monitoramento: o subjetivo e o objetivo. O subjetivo não usa instrumentos de medição, utiliza-se somente dos conhecimentos do operador para desempenhar ações como escutar ruídos incomuns, sentir vibração e temperatura incomuns do equipamento, etc. O monitoramento objetivo utiliza instrumentos e técnicas especializadas, fornecendo uma medição mais precisa, não dependendo somente do operador. Para aplicar uma boa manutenção preditiva é necessária mão-de-obra qualificada. Os principais parâmetros utilizados são: análises de vibrações, temperatura, pressão, qualidade do lubrificante, entre outros [6].

Tomando como base [4], [6], [7], podemos definir as principais vantagens e desvantagens para se ter um melhor entendimento. Elas são:

1) Vantagens:

- Diminui a troca desnecessária de peças;
- Redução dos custos com intervenções, já que evita intervenções desnecessárias;
- Aumenta a disponibilidade do equipamento para a linha;
- Aumento da segurança do equipamento.

2) Desvantagens

- Custo inicial elevados para utilização de equipamentos mais sofisticados de constante atualização;
- Incapacidade de alguns gestores em fazer alterações no local de trabalho.

III. MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO

O Motor de Indução Trifásico (MIT) é amplamente utilizado nas indústrias por precisar relativamente menos manutenção que os concorrentes, tem uma vida útil elevada, não possui chaveamento e permite o uso em altas cargas [9].

Ao nível global, motores de potência média (1 cv – 500 cv) possuem uma população estimada de cerca de 300 milhões de unidades (dados de 2013). Cerca de 80% são de motores de indução trifásicos (em torno de 240 milhões instalados), sendo produzidos 30 milhões por ano. No Brasil, segundo a PROCEL, em 2013, 98% dos motores instalados possuíam

potência máxima de 100 cv, população de 7 milhões, sendo vendidos 500 mil anualmente [10].

A. Características do motor de indução

Os motores de indução trifásicos possuem um funcionamento que utiliza como base na formação de um campo magnético rotativo produzido pela passagem de corrente alternada (CA) nas bobinas no estator, esse por sua vez induz uma tensão através da abertura de ar dentro do enrolamento do estator, o que produz corrente no rotor e um campo magnético associado. A corrente no rotor se opõe ao campo rotativo, fazendo o rotor girar. Ele possui 3 conjuntos de bobinas, as quais são alimentadas por um sistema trifásico, com tensões defasadas de 120° [2] e [11].

Alguns autores dividem esse tipo de motor em duas partes principais, o estator e o rotor. Partindo dessas considerações é possível dividir em outros elementos [11].

B. Principais elementos do estator

- **Carcaça:** exerce função de suportar as partes móveis e fixas do motor, servindo como invólucro protetor. Ela pode ser aberta ou totalmente fechada. Quando totalmente fechada, deve ser aletada para facilitar a transferência de calor gerado com o ambiente. Ela pode ser de ferro fundido (mais comum), alumínio e aço injetado. Nos dois, não precisa possuir aletas. A carcaça necessita de certo grau de proteção de acordo com o ambiente empregado, como ambientes sujeitos a poeira, sol, água, entre outros [10].
- **Núcleo de chapas:** é constituído por chapas finas de aço magnético, sobrepostas, localizadas na superfície do estator. Esse núcleo laminado auxilia na redução da corrente de Foucault, que causa calor excessivo ao motor [9].
- **Enrolamentos:** são dimensionados por material condutor, faz parte do circuito magnético e fica sobre o núcleo, sendo alimentado eletricamente [11].

C. Principais elementos do rotor

- **Eixo:** é o componente responsável pela transferência da potência mecânica do motor.
- **Ventilador:** função de trocar o calor interno com o ambiente, refrigerando internamente. O ar que circula internamente retira a maioria do calor, o que sobra é disperso pela carcaça [9].
- **Núcleo de chapas:** semelhante ao que acontece com o estator, ele é constituído por chapas finas de aço magnético sobrepostas. Esse núcleo laminado auxilia na redução da corrente de Foucault, que ocasiona aquecimento do motor [9].
- **Barras e anéis (rotor gaiola de esquilo):** são constituídos por barras sólidas que são fundidas no rotor e curto-circuitadas na extremidade do rotor através de anéis feitos de alumínio fundido [12].
- **Enrolamento (rotor bobinado):** semelhante ao enrolamento do estator, é feito de material condutor, ficando sobre o núcleo do rotor.
- **Rolamentos:** é o componente que fica fixo no eixo do rotor, geralmente são do tipo esfera (mas pode ser também do tipo rolo, dependendo da necessidade).

Eles podem ser acompanhados de mancais e podem fazer o movimento de rotação, diminuindo o atrito do rotor [11] e [9].

Esses elementos explicados podem ser melhor visualizados na Fig.1.



Fig. 1. Componentes de um motor de indução trifásico [13].

Os motores trifásicos podem ser de dois tipos, dependendo do formato do seu rotor pode ser gaiola de esquilo ou rotor bobinado. O rotor gaiola de esquilo possui uma série de barras condutoras encaixadas dentro nas ranhuras do rotor e são curto-circuitadas nas extremidades através de anéis condutores (sua estrutura interna na Fig. 1). Ele é o mais utilizado devido a sua simplicidade, robustez e valor financeiro [12].

Outras características desse tipo de motor é que ele opera com uma velocidade constante, próximo do valor da velocidade síncrona. Caso haja permuta entre fases, o sentido de rotação irá se inverter. Necessita de valor de corrente de partida elevados, podendo gerar variações na linha. Quando o motor está acionado, se uma das fases deixar de funcionar, o motor passará a funcionar de forma semelhante a um motor monofásico [12].

O motor de rotor bobinado possui um enrolamento trifásico semelhante ao do estator, sendo que os dois também possuem o mesmo número de polos. Seus enrolamentos possuem terminações que se conectam com anéis deslizantes presentes no eixo do rotor. Os enrolamentos do rotor são curto-circuitados por escovas de carvão que se apoiam nos anéis deslizantes. Essas escovas podem acessar as correntes do rotor [14]. Ele requer uma maior manutenção devido ao desgaste ocasionado pelo atrito das suas escovas e dos anéis coletores. A Fig. 2 mostra uma ilustração da estrutura interna desse tipo de motor.

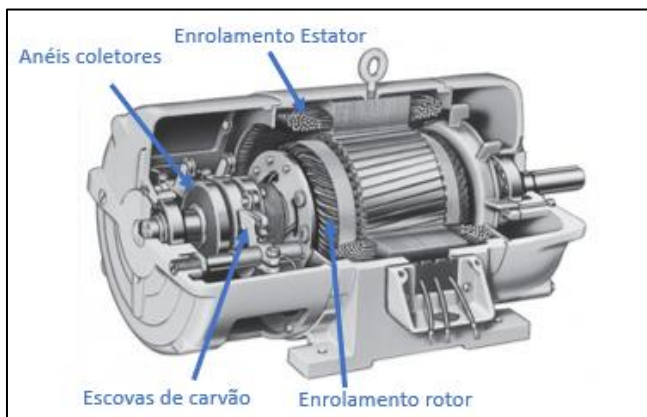


Fig. 2. Motor de rotor bobinado. Adaptado de [14].

Esse tipo de motor é utilizado em aplicações com velocidade constante, que necessitem de um torque de partida mais intenso que o obtido no rotor gaiola. Os anéis do rotor são conectados a resistências externas de partidas variáveis, para se ter acionamento da corrente e da velocidade de partidas. Suas resistências secundárias são dimensionadas para proporcionar curvas de torques adequadas, podendo ser dimensionadas para suportar cargas de energia sem falha [2].

IV. FALHAS E MÉTODOS DE MANUTENÇÃO

Nessa seção serão abordados os principais tipos de falhas e algumas das formas de se detectar, evitar ou corrigir esses tipos falhas. É de extrema importância para o desenvolvimento do trabalho, já que uma vez adquiridos os conhecimentos básicos sobre as falhas mais comuns presentes no uso dos motores de indução trifásicos e formas de solucioná-las, isso facilitará que se tenha uma comparação entre os tipos de manutenção e seu custo.

Segundo o estudo realizado pelo Institute of Electrical and Eletronic Engineers (IEEE), os componentes que mais apresentam falhas são: os rolagamentos com 41%, o estator com 37%, o rotor 10%, e os demais com 12% [15]. No decorrer da pesquisa será abordado, as principais falhas e análises.

A. Falhas no rolagamento

Considerado por muitos estudos como os maiores causadores de falhas, a maior parte das causas está ligada a problemas de contaminação interna, lubrificação, montagem inapropriada, desalinhamento e excesso de cargas. A contaminação está relacionada ao ambiente industrial em que o motor se encontra, que em determinadas situações ou setor industrial pode gerar resíduos que entrem em contato com o rolagamento através de defeitos nos retentores, contaminação de lubrificantes durante a relubrificação, defeitos na superfície do rolagamento causados por desgaste ocasionados normalmente por atrito, que possam gerar fragmentos, entre outros motivos [16].

A lubrificação possui o papel de reduzir atrito e desgaste, aumentando a durabilidade e participando da dissipação de calor. Os métodos de lubrificação do rolagamento podem ser a óleo e à graxa, mas em motores elétricos a graxa é mais utilizada dados a simplicidade e o baixo custo. Sua escolha deve levar em consideração a temperatura de funcionamento, a velocidade de rotação e a contaminação que possa surgir no meio que será utilizado [16].

B. Falhas no enrolamento

A falha no enrolamento é considerada uma das falhas mais comuns em motores elétricos e muitas das vezes pode levar a queima desse enrolamento ou seu rompimento. Ela pode ocorrer devido à perda da isolação das espiras, ocasionada por eventos de natureza térmica, elétrica, mecânica e ambiental. Elas serão mencionadas posteriormente [10]. A vida útil do motor está em sua maior parte ligada a vida útil do isolamento do enrolamento, sendo esse isolamento danificado por vários fatores como umidade, vibrações, ambientes corrosivos e outros [17].

C. Análise térmica

Dentre os fatores que influenciam na diminuição da vida útil do enrolamento está a temperatura em que ele é exposto. Alguns autores consideram que um aumento da temperatura entre 8 a 10 graus ao limite de temperatura da classe do isolamento pode diminuir a vida útil do enrolamento pela metade (processo de envelhecimento térmico). À medida que aumenta a temperatura acima do limite, diminui o tempo de vida útil do isolamento, além de ocorrer a queima do isolamento do sistema de enrolamento em temperaturas extremas [17].

Segundo [18] outro tipo de estresse térmico, é com relação à sobrecarga térmica que acontece em razão de fatores como variações de tensão aplicadas, tensão de fase desbalanceada, sobrecarga cíclica, ventilação obstruída, temperatura ambiente alta, entre outros. Uma causa oriunda de meios elétricos que pode ser exemplificada é o desbalanceamento entre tensão de 3.5% que resulta em uma elevação de 25% da temperatura de fase carregada.

Fadiga térmica também pode gerar desgastes ao isolamento. No caso de partidas e paradas de repetição excessivas, o processo de aquecimento e resfriamento cíclico faz com que o enrolamento se dilate e se contraia repetidas vezes, acelerando o processo de envelhecimento da isolação [10].

Algumas soluções encontradas foram: utilizar medidas de proteção contra sobretensão e sensores sensíveis à temperatura, como relés térmicos, termoresistores, termistores, termostatos, etc. [17].

Outro método de se ter um controle desse tipo de falha é através da Análise Termográfica, que a partir da utilização de raios infravermelhos é possível medir a temperatura do motor em funcionamento, um exemplo de equipamento de medição pode ser visto na Fig.3 que mostra um termovisor. Esse tipo de análise fornece imagens com escalas de cores que permite verificar os pontos do motor com a temperatura superior ao normal. Isso permite um maior controle de onde a falha ocorre, facilitando a análise [19].



Fig. 3. Termovisor [20].

D. Análise de esforços elétricos

As tensões elétricas prejudiciais aos enrolamentos podem ser classificadas em dielétricas, seguimento, tensões transitórias e efeito corona. As tensões dielétricas possuem uma relação entre vida útil e as tensões aplicadas no isolante, que devem ser consideradas nas escolhas dos materiais do projeto das bobinas. Podendo ocorrer sobretensões de fase para fase ou espira para espira. As tensões de seguimento ocorrem quando o sistema de isolamento opera com tensão de 600V, não possuindo proteção contra intempéries externas [18].

O efeito Corona pode ser entendido quando geralmente em alta tensão o ar ao redor do enrolamento fica ionizado, gerando brilhos e zumbido. Ele gera uma quantidade pequena de dano ao rolamento, ocorrendo ao longo dos anos. Os maiores danos são provocados pelo ozônio produzido pelo efeito Corona a partir do oxigênio que desgasta quimicamente o isolamento, causando danos especialmente nos espaços vazios das espiras [9].

As tensões transitórias são geradas geralmente por manobras da rede elétrica, como o chaveamento de disjuntores e banco de capacitores, abertura de fusíveis, descargas atmosféricas nas proximidades, entre outras. Essa tensão assume valores entre três a quatro vezes o valor de pico da tensão normal [10].

Esses esforços podem ser evitados, ou diminuídos através da aplicação de medidas de equipamentos de proteção e equipamentos de medição como o multímetro, que auxilia na medição da tensão, da corrente e da resistência do equipamento. Os danos causados pelo, produzidos pelo efeito corona, poderão ser diminuídos pela aplicação de uma camada de verniz nos espaços vazios entre as espiras.

E. Análise estresse mecânicos e vibrações

Os estresses mecânicos nas bobinas do enrolamento, podem ser originários do contato, atrito, ou colisão entre outras partes, por causas diversas, como colisões entre rotor e estator, ou colisões por partes quebradas ou soltas, como parafusos e pocalas. Essa falha ocorre geralmente quando há movimento da bobina, gerando muitas vezes vibrações, em razão de desbalanceamento mecânico, desalinhamento no eixo e falhas relacionadas ao enrolamento [10].

As forças magnéticas nas bobinas são máximas durante a partida, por efeito da corrente no enrolamento, fazendo com

que as bobinas vibrem em uma frequência maior, podendo causar danos aos condutores de cobre, danificar o isolamento dos enrolamentos, soltar partes internas do motor, etc. [18].

A vibração excessiva pode ser entendida como uma combinação entre defeitos mecânicos e magnéticos, e podem ser geradas mudanças na abertura de ar, desequilíbrio, desalinhamento, frouxidão, falhas no enrolamento e até mesmo quebras da barra do rotor. A vibração aumenta ou diminui conforme as condições do equipamento [21].

Uma das formas de determinar a condição do MIT é através do monitoramento com o uso de sensores de medição instalados em pontos estratégicos das máquinas. Esses sensores possuem acelerômetros e medem a frequência e amplitude de vibração do equipamento, identificando se há defeitos, o estado e a gravidade do defeito [19]. A Fig. 4 mostra um tipo de medidor de vibração portátil.



Fig. 4. Medidor de vibração [22].

A análise do ruído pode ser uma importante forma de analisar o motor. O som oriundo das vibrações transmitidas através dos corpos das partes do equipamento. Ele pode acontecer através da ventilação (relacionados à turbulência do ar, ligado a partes rotativas), excitação eletromagnética, que ocorre devido a vibrações na estrutura do estator, devido a interações entre o campo magnético e a superfície do ferro, e por último, ruídos acústicos relacionados a atritos mecânicos e à aerodinâmica do motor. Uma das formas de análise é a partir do estetoscópio [19].

F. Estresses ambientais, limpeza e ventilação

Dependendo da localidade onde o equipamento funcione, ele pode estar sujeito a intempéries como temperatura elevada, umidade e a presença de certos elementos que podem ser nocivos ao motor, levando a várias falhas como já foi mencionado [18].

A limpeza do motor apesar de ser um procedimento considerado simples e de fácil execução, pode ser considerado essencial, especialmente em ambientes com excesso de poeiras e outros materiais nocivos. A periodicidade da limpeza do motor pode auxiliar no melhor aproveitamento do sistema de ventilação, muitas vezes o desobstruindo, evitando o aquecimento exagerado do equipamento [19].

V. CUSTO E VIABILIDADE

Os custos das manutenções são de extrema importância para a tomada de decisão no planejamento da manutenção, o que vai informar se o procedimento é viável ou não. Um importante índice de manutenção é o custo de manutenção por faturamento (CMF), ele utiliza custos diretos como [23] e [4]:

- Custos com pessoal próprio: são calculados desde salários, encargos tributários, benefícios cedidos pela empresa e gastos com treinamento.
- Custos com materiais: são calculados o custo de peças e equipamentos sobressalentes, e o custo de materiais de consumo, como óleo, graxa, produtos químicos, entre outros.
- Custos com serviços externos: contratação de empresas prestadoras de serviços, podendo ser permanentes, ou circunstanciais: ela pode ser interna na planta como certos serviços de manutenção ou externo à planta, como serviços de recuperação de peças, calibração de equipamentos, usinagens, análises específicas entre outros.

Segundo o estudo da Associação Brasileira de Manutenção e Gestão de Ativos (ABRAMAN) no ano de 2017, o custo de manutenção por faturamento é de 4% das médias entre os setores das empresas. Na mesma pesquisa mostra que o custo pessoal próprio equivale a 46% do custo de manutenção, seguido pelo custo de material com 35% e o de contratação com 19% [24].

É comum considerar outros gastos como parte do custo de manutenção, como contas de energia e água das oficinas, despesas com viagens, aquisição de ferramentas e de equipamentos, de custos administrativos, do almoxarifado e do setor de compras, entre outros. Também há uma associação a ativos físicos como depreciação e perdas de faturamento, apesar de eles não fazerem parte do orçamento [23].

Para desenvolver um trabalho viável e eficiente é indispensável que se realize um controle dos custos das categorias de manutenção que serão utilizadas. Nem sempre uma maior manutenção é a mais adequada, como se pode analisar no gráfico presente na Fig. 5. Nela se pode notar que o custo da manutenção (no caso a manutenção preventiva) cresce de maneira inversa aos custos decorrentes de falhas, mas que ambas devem estar em equilíbrio para que se tenha um custo ótimo [4].

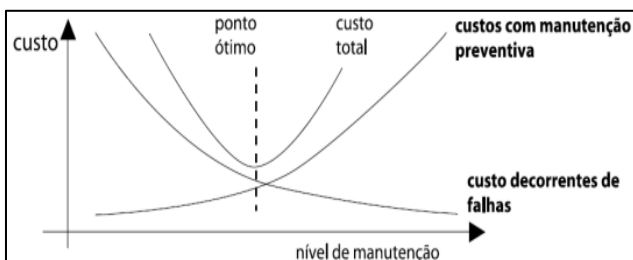


Fig. 5. Custo x nível de manutenção [19].

Para [25] A função da disponibilidade e o custo de manutenção possui uma relação não linear, podendo ser representado de forma semelhante à curva na Fig. 6, que mostra a relação entre lucro, disponibilidade e custo de manutenção. Ao analisar o gráfico nota-se que é preciso de

certa disponibilidade da máquina para que se possa ter lucro. A manutenção auxilia para que se possa aumentar ou manter o nível de disponibilidade. À medida que a disponibilidade aumenta, o lucro cresce até o ponto de lucro máximo, que seria o ponto de ótima disponibilidade. Após esse ponto, o lucro diminui em parte devido ao fato de que o investimento em manutenção é muito elevado, tornando-o inviável. Por isso, é necessário obter o nível de disponibilidade que gere maiores lucros.

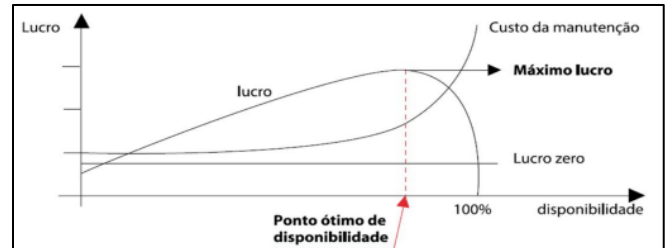


Fig. 6. Lucro x disponibilidade [26].

Com base em [27] podemos determinar o custo de vida de um motor de indução trifásico utilizando a equação em (3), esse método utiliza fatores presentes no processo de seu funcionamento e tem como foco especial indústrias com grandes números de motores.

$$C_{CV} = C_I + C_E + C_{O\&M} + C_{rep} + C_{res} \quad (3)$$

Onde, CCV é o custo de vida. CI é dado como o investimento inicial, que engloba valores de compra e instalação dos motores. CE é o custo de energia que esse motor consumiu durante seu ciclo de vida útil. CO&M são os custos relacionados aos processos de manutenção e operação do motor. Crep são os gastos com reposição de peças e equipamentos durante seu ciclo de vida útil. Por último, os Cres que são os custos residuais relacionados ao descarte após a inutilização do motor.

Em [26] ainda é determinada a forma de cálculo do custo da energia elétrica consumida no ciclo de vida do MIT (CE), presente na função em (4). Pn representa a carga nominal do motor em kW, L representa o carregamento do motor dado em p.u., T é o valor da tarifa anual em R\$/kWh, H é o valor de horas anuais de operação e $\eta(L)$ que é o rendimento do motor (ele varia de acordo com o carregamento).

$$C_E = \frac{P_n \cdot L \cdot T \cdot H}{\eta(L)} \quad (4)$$

Segundo a ABRAMAN a disponibilidade média dos setores da indústria é em torno de 87%. Os valores médios dos tipos de manutenções de modo geral nas empresas são: 38% Corretivas, 41% Preventivas (baseado no tempo), 14% Preditivas e 8% outras formas de manutenção [24].

Em [8] é possível obter um exemplo de uma análise entre os custos tipos de manutenção: corretiva não planejada, preventiva e preditiva/corretiva planejada. Essa análise está presente na Tabela I, onde faz uma relação entre o custo, expresso em US\$ por HP/ano, e os métodos de manutenção.

TABELA I. RELAÇÃO DOS CUSTOS DE MANUTENÇÃO, ADAPTADA DE [8].

Tipo de manutenção	US\$/HP instalado/ano	Relação
Corretiva não planejada	17 a 18	2
Preventiva	11 a 13	1,5
Preditiva + corretivas planejadas (quando preciso)	7 a 9	1

Apesar dos gastos com manutenção serem maiores, a composição do custo total não depende somente dos custos de manutenção e sim de um conjunto de fatores, como disponibilidade, perdas de produção, custos indiretos entre outros. Cada modelo de manutenção tem sua especificação que caberá ao gestor planejar e analisar os fatores de implantação.

VI. CONCLUSÃO

Neste artigo, foram apresentados os principais conceitos relacionados à análise de custo de manutenção e diagnóstico de falhas em motores elétricos, com ênfase em motores de indução. Sua importância se dá devido à forte presença desse tipo de motor no meio industrial, sendo que a maior parte dos gastos com energia elétrica nesse setor se dá por uso de forças motrizes.

O dado trabalho analisou inicialmente os índices ligados à manutenção, como confiabilidade e disponibilidade e fez uma comparação entre os tipos de manutenção, mostrando suas principais características, vantagens e desvantagens e quais situações o seu uso é empregado. Com esse conhecimento foi realizado um estudo sobre o funcionamento de motores e os principais tipos de falhas presentes. E por fim, um estudo sobre algumas das formas de calcular o custo de uma manutenção e sua viabilidade.

Foi cumprido o objetivo inicial de estudar e analisar os custos e a viabilidade dos tipos de controle de falhas em motores de indução trifásicos, sendo entendido que nem sempre um método de manutenção com custo mais elevado é mais vantajoso para o empreendimento, tendo que planejar e avaliar cada caso separadamente. Esse tipo de estudo mostra grande importância para gerar conhecimentos necessários para a produção de planos de manutenção, por engenheiros, ou gestores futuros, já que a manutenção garante a disponibilidade do equipamento.

REFERÊNCIAS.

- [1] PROCEL. Troca de motores como indutora de competitividade na indústria brasileira. 2017. Disponível em: <http://www.procelinfo.com.br/main.asp?View=%7BF5EAADD6-CCB0-4E29-A0C4-482D3D66BB65%7D&Team=¶ms=itemID=%7B3BABCE8B-A76C-4042-B985-2526F1F6FEC4%7D;&UIPartUID=%7BD90F22DB-05D4-4644-A8F2-FAD4803C8898%7D#>. Acesso em: 25 abr. 2017.
- [2] PETRUZELLA, Frank D. Motores elétricos e acionamentos. Porto Alegre: AMGH, 2013
- [3] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5462: Confiabilidade e manutenibilidade, Rio de Janeiro: ABNT, 1994.
- [4] PINTO, Alan Kardec. Manutenção: função estratégica. 3. ed. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2009.
- [5] ALMEIDA, Paulo Samuel D. Manutenção Mecânica Industrial - Princípios Técnicos e Operações. São Paulo: Editora Saraiva, 2016.
- [6] GREGÓRIO, Gabriela Fonseca P.; SILVEIRA, Aline Moraes. Manutenção industrial. Porto Alegre: SAGAH, 2018.
- [7] NETTO, Alfredo Pieritz. Manutenção Industrial. Indaial: Uniasselvi, 2018.
- [8] GREGÓRIO, Gabriela Fonseca P.; SANTOS, Danielle F.; PRATA, Auricélio B. Engenharia de manutenção. Porto Alegre: Sagah, 2018
- [9] HAND, Augie. Motores elétricos: manutenção e solução de problemas. (Tekne). Porto Alegre: Bookman, 2015.
- [10] FILHO, Guilherme F. Motor de Indução. São Paulo: Editora Saraiva, 2013.
- [11] FILHO, João M. Instalações Elétricas Industriais, 9ª edição. Rio de Janeiro: Grupo LTC, 2018.
- [12] UMANS, Stephen D. Máquinas Elétricas de Fitzgerald e Kingsley. Porto Alegre AMGH, 2014.
- [13] ANASTACIO, Breno P.; PIRES, Douglas M. G.; MAGALHÃES, Jéssica de L. A.; DIAS, Marcelo P. EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM MOTORES ELÉTRICOS DE INDUÇÃO. Disponível em: <https://seer.uniacademia.edu.br/article>. Acesso em: 28 maio 2022.
- [14] CHAPMAN, Stephen J. Fundamentos de Máquinas Elétricas. Porto Alegre: AMGH, 2013.
- [15] Yanfeng Li and Haibin Yu, "Three-phase Induction Motor Operation Trend Prediction Using Support Vector Regression for Condition-based Maintenance," 2006 6th World Congress on Intelligent Control and Automation, 2006, pp. 7878-7881, doi: 10.1109/WCICA.2006.1713504.
- [16] AGOSTINHO, João António Carvalho. "Diagnóstico de Avarias nos Rolamentos de um Motor de Indução Trifásico". 2013. 68 f. Dissertação (mestrado) - Curso de Mestrado Integrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores, Universidade de Coimbra, Coimbra, 2013.
- [17] WEG. GUIA DE ESPECIFICAÇÃO: motores elétricos. 2021. Disponível em: <https://www.weg.net>. Acesso em: 29 maio 2022.
- [18] A. Siddique, G. S. Yadava and B. Singh, "A review of stator fault monitoring techniques of induction motors," in IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 20, no. 1, pp. 106-114, March 2005, doi: 10.1109/TEC.2004.837304.
- [19] VAZ, João Miguel Pinto Ribeiro. "Otimização dos Planos de Manutenção Preventiva de Motores Assíncronos Trifásicos". 2017. 137 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Eletrotécnica, Instituto Superior de Engenharia de Coimbra, Coimbra, 2017.
- [20] MINIPA. Catálogo Industrial 2022. 2022. Disponível em: <https://www.minipa.com.br/catalogo-minipa>. Acesso em: 31 maio 2022.
- [21] LEME, Murilo Oliveira. "Metodologia de manutenção preditiva para motores elétricos baseada em monitoramento de variáveis físicas e análise multicritério". 2017. 187 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia de Produção, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2017.
- [22] INSTRUTHERM. Catálogo Geral. Disponível em: https://www.instrutherm.com.br/media/catalog/product/c/a/cat_logo_geral_digital-compactado.pdf. Acesso em: 31 maio 2022.
- [23] VIANA, Herbert Ricardo Garcia. Manual de Gestão da Manutenção. Brasília: Engeteles, 2021. 2 v.
- [24] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE MANUTENÇÃO E GESTÃO DE ATIVOS (ABRAMAN). Resultado do Documento Nacional. CONGRESSO BRASILEIRO DE MANUTENÇÃO E GESTÃO DE ADITIVOS, 32. Curitiba, 2022.
- [25] Murty, A.S.R., and V.N.A. Naikan. "Availability and maintenance cost optimization of a production plant." International Journal of Quality & Reliability Management, vol. 12, no. 2, Feb. 1995, pp. 28+. Gale Academic OneFile, link.gale.com/apps/doc/A16876517/AONE?u=capes&sid=bookmark-AONE&xid=5d306a53. Accessed 31 May 2022.
- [26] GONÇALVES JUNIOR, Jairo José Modesto; RIBEIRO, Marcos Valério; FRANCO, Bruno Chaves. Custo de manutenção de ativos numa óptica operacional e estratégica no ambiente industrial. Disponível em: <https://www.aedb.br/seget/arquivos/artigos15/23022234.pdf>. Acesso em: 01 jun. 2022.
- [27] A. A. G. Júnior, V. d. P. B. Aguiar, A. A. F. de Moura, R. S. T. Pontes and W. B. Correia, "Influência da Taxa de Escalada da Energia Elétrica na Viabilidade dos Motores Industriais IR3 no Brasil," 2021 14th IEEE International Conference on Industry Applications (INDUSCON), 2021, pp. 1538-1545, doi: 10.1109/INDUSCON51756.2021.9529874.