

Teste para Prognósticos de Falhas em Motores de Indução: Discussão Teórica e Estudo de Caso

Luiz Henrique Arantes Barbosa* Hélder de Paula**
Isabela Oliveira Zaparoli *** André Mendonça Alzamora****

*Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia, MG (e-mail: luizharantesb@gmail.com).

**Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia, MG (e-mail: drhelderdepaula@gmail.com)

***Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia, MG (e-mail: oliveirazaroli@gmail.com)

****Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia, MG (e-mail: andre.alzamora@outlook.com)

Abstract: This paper presents a wide discussion of the most relevant tests, on-line and off-line, used in industrial environments for the development of predictive maintenance of three-phase induction motors (MITs). The definition of appropriate procedures, focused on the prognosis of failures is extremely important for the company's maintenance program, because it allows to identify, in advance, possible failures in the machines that could result in the interruption of processes and, consequently, substantial financial losses. In order to apply the concepts evaluated in a practical case, reports of the tests used in the maintenance program of a large multinational food production company were obtained, which were critically evaluated by the authors and then identified procedural failures, as well as proposals new testing routines to expand the prognostic possibilities of the problems that affect the engines of its production line.

Resumo: Este trabalho apresenta uma ampla discussão sobre os testes mais relevantes, *on-line* e *off-line*, empregados em âmbito industrial para o desenvolvimento da manutenção preditiva de motores de indução trifásicos (MITs). A definição de procedimentos apropriados, focados em prognóstico de falhas, é de vital importância para o programa de manutenção da empresa, pois possibilita identificar, antecipadamente, possíveis falhas nas máquinas que poderiam acarretar a parada dos processos e, conseqüentemente, substanciais prejuízos financeiros. Com o intuito de aplicar os conceitos avaliados em um caso prático, foram obtidos relatórios dos testes empregados no programa de manutenção de uma grande companhia multinacional do ramo de produção alimentícia, que foram avaliados criticamente pelos autores e então identificadas falhas de procedimentos, assim como propostas novas rotinas de ensaios para se ampliar as possibilidades de prognóstico dos problemas que acometem os motores de sua linha de produção.

Keywords: Reliability; Predictive Maintenance; Induction Motor; Insulation System; On-line and Off - line Tests.

Palavras-chaves: Confiabilidade; Manutenção Preditiva; Motores de Indução; Sistema de Isolação; Testes *On-line* e *Off-line*.

1. INTRODUÇÃO

Os motores de indução trifásicos representam a principal força motriz encontrada em um sistema industrial. Dessa forma, garantir a integridade e as condições necessárias para o seu bom funcionamento eleva a disponibilidade do equipamento e a continuidade do processo produtivo, elevando a receita da empresa. Falhas inesperadas resultam em perdas produtivas significativas que conduzem a sérios prejuízos à empresa até o momento do restabelecimento do processo (Kim et al., 2017).

Estudos do IEEE e do EPRI sobre os modelos de falhas que acometem máquinas elétricas rotativas apontam que de 34 a 45 % de todas as falhas dos motores estão associadas a problemas no estator ou rotor (SKF and BAKER n.d.). Nesse cenário, a confiabilidade das máquinas elétricas depende, dentre outros fatores, da confiabilidade e eficácia de seu sistema de isolação, o qual está sujeito a estresses ambientais, mecânicos, térmicos e elétricos enquanto em serviço (Martinez, 2008; Stranges, Haq and Teran, 2016; Torkaman and Karimi, 2015). À luz desse fato, determinar as condições do enrolamento, ou buscar estimar a vida útil restante do mesmo, representam uma das finalidades de se realizar ciclos

de manutenção preditiva, compreendendo inúmeras variedades de testes de diagnóstico de falhas em motores.

Existem cerca de 40 tipos de procedimentos de teste e monitoramento, os quais são divididos em duas categorias, *on-line* e *off-line*, para se verificar as condições dos enrolamentos de motores e geradores (Torkaman and Karimi, 2015). A primeira refere-se a técnicas de aquisição de dados com a máquina em funcionamento, isto é, não há uma interrupção da produção para se realizar o teste. Em contrapartida, os métodos *off-line* exigem que o equipamento seja desacoplado e retirado do processo produtivo para a execução do ensaio, o que configura a principal desvantagem desse tipo de procedimento. Apesar deste inconveniente, os procedimentos *off-line* são muitas vezes preferíveis pelo fato de um único instrumento de teste poder ser utilizado em vários motores. Tal característica não é observada nas técnicas *on-line*, uma vez que, em vários casos, os sensores empregados devem ser instalados unicamente em cada máquina, o que torna esse teste dispendioso (Stone et al., 2014). Todavia, ressalta-se o fato de que um único teste não é capaz de abranger todos os tipos de problemas aos quais o motor está susceptível, sendo, portanto, necessária a realização de mais de um procedimento para se ampliar a capacidade do diagnóstico.

Neste contexto, o presente trabalho apresenta uma ampla e criteriosa revisão teórica sobre uma grande diversidade de testes, tanto *on-line* quanto *off-line*, empregados no meio industrial. De forma a enriquecer a discussão, são apontadas as normativas existentes que regulamentam cada procedimento, assim como as vantagens, desvantagens e singularidades que cada um deles possa apresentar.

Por fim, de forma a contribuir também com um viés prático, a discussão teórica apresentada na primeira parte do trabalho foi aplicada em uma análise crítica dos testes de manutenção preditiva utilizados por uma empresa de grande porte do setor de produção e processamento de alimentos. Em tal estudo de caso, verificou-se se os procedimentos e resultados apresentados estão em consonância com as normas e recomendações vigentes e, além disso, sugeriu-se testes adicionais para estender e incrementar as possibilidades de prognóstico sobre as condições dos motores que compõem o seu sistema fabril.

2. TESTE PARA AVALIAÇÃO DA CONDIÇÃO DOS MOTORES

Nesta seção será apresentada uma compilação dos testes mais relevantes no que tange a avaliação *on-line* e *off-line* de motores, para fins de realização de sua manutenção preditiva. Tal apresentação, fruto de uma extensa e criteriosa revisão bibliográfica, é permeada por discussões amparadas pelas normas pertinentes. O diagrama da Fig. 1 resume os testes considerados neste trabalho.

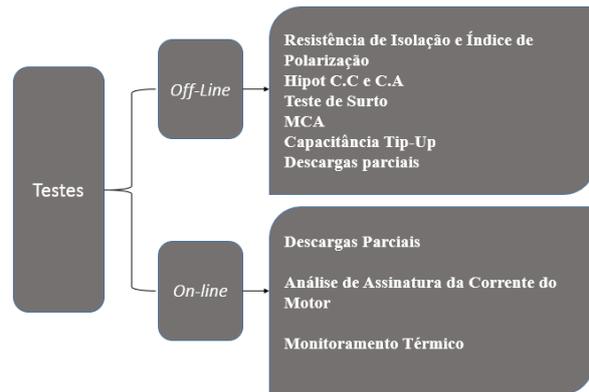


Fig. 1 Testes *on-line* e *off-line* discutidos no presente artigo.

2.1 Testes Off-line

A) Resistência de Isolação (R_I) e Índice de Polarização (IP)

A resistência de isolação (R_I) de um motor corresponde ao valor de resistência medido entre o cobre do estator e o ponto de aterramento da máquina (núcleo). Tal grandeza, no caso de um isolante ideal, seria infinita, visto que uma das funções do sistema de isolação é impedir a fuga de corrente dos condutores para a terra. Contudo, essa premissa, na prática, não ocorre em função de imperfeições e de contaminações às quais o isolante está sujeito em um ambiente industrial.

O teste de R_I é realizado a partir da aplicação de uma tensão contínua (V) entre os enrolamentos e a carcaça do motor por um período de 10 minutos (Guedes, 2018). Como resultado dessa tensão, pode-se medir uma corrente (I) que flui através do isolamento e, dessa forma, o valor de R_I pode ser encontrado seguindo a lei de Ohm ($R_I = V/I$).

O Índice Polarização (IP) consiste em uma complementação do teste anterior e é definido como a razão entre o valor da resistência de isolação medido após 10 minutos e o valor de R_I mensurado após 1 minuto. Usualmente, valores de IP abaixo do estabelecido são resultado de enrolamentos contaminados ou com fissuras no sistema de isolação (Stone et al., 2014).

Portanto, apesar de sua simplicidade, tais métodos apresentam um importante parâmetro para a detecção de faltas presentes ou que possam ocorrer devido à poluição dos enrolamentos da máquina (Torkaman and Karimi, 2015; Warren and Stone, 1998).

Os procedimentos para a realização e interpretação de ambos os testes são encontrados na norma IEEE Std-43 (2013) onde define-se que os valores de R_I sejam corrigidos para uma temperatura de 40 °C, a fim de se compará-los com testes futuros que venham a ser executados no mesmo motor. Todavia, alguns gráficos e fórmulas para a correção da resistência não resultam em valores cientificamente aceitáveis para medições realizadas em uma ampla faixa de temperatura, uma vez que, em tal condição, são obtidos valores completamente diferentes de R_I corrigidos a 40 °C (Stone et al., 2014).

Dessa forma, o teste de IP se torna mais indicado, haja vista que o mesmo independe da temperatura, fornecendo, assim, um resultado mais concreto se comparado ao valor mensurado de R_i .

B) Testes Hipot C.C e C.A

Os testes hipot são utilizados para assegurar que a parede de isolamento entre os enrolamentos e o núcleo dos motores seja capaz de suportar um nível mínimo de estresse dielétrico quando os mesmos estiverem em operação (Gupta, Stone, and Stein, 2009). Durante esses ensaios é aplicado, com um período de 1 até 10 minutos, entre o enrolamento e a carcaça da máquina, uma elevada tensão, C.A ou C.C, cujo valor é consideravelmente maior que a sua tensão nominal de pico. Dessa forma, uma falha do isolamento repercute em uma reprovação da máquina no teste e reparos, ou até mesmo um rebobinamento, devem ser realizados.

Os guias e procedimentos para a realização dos ensaios caracterizados anteriormente são encontrados nas normas padrões: IEEE Std 56 - 2016: *Guide for Insulation Maintenance of Large Alternating-Current Rotating Machinery* e IEEE Std 95 - 2002: *Recommended Practice for Insulation Testing of AC Electric Machinery (2300 V and Above) with High Direct Voltage*.

Ambos os testes, de acordo com as normas supracitadas, são executados de maneiras semelhantes; contudo, a principal diferença reside no fato de que, durante execução do teste hipot C.A, é utilizada uma tensão senoidal com frequência nominal, ou até, em alguns casos, com baixas frequências, como 0,1 Hz. Ademais, durante a execução desse método, a distribuição do esforço dielétrico ao qual a isolamento está submetida é similar àquela encontrada durante condições normais de operação (Guedes, 2018; Stone, 2005), o que configura uma das principais vantagens sobre a técnica C.C. Contudo, em alguns processos de manutenção preditiva, o teste hipot C.C é preferível em muitas indústrias, em razão desse procedimento solicitar uma fonte de alimentação C.C de potência reduzida e, conseqüentemente, de custo mais acessível (Gupta et al., 2009).

Apesar de ser uma importante ferramenta de manutenção preditiva, o uso do teste hipot gera alguns questionamentos por ser um teste potencialmente destrutivo, isto é, o isolante é levado à falha se houver contaminações ou imperfeições. Portanto, tal técnica é capaz de danificar uma máquina que, mesmo contendo determinado desgaste no sistema isolante, ainda poderia operar satisfatoriamente por um determinado período (Stone, 2005). Desse modo, há a possibilidade do teste hipot adiantar a falha do motor. Contudo, se a máquina não for testada há, também, a hipótese de o motor falhar durante a produção, ocasionando, interrupções indesejadas e, dependendo do nível da criticidade do equipamento para a planta, prejuízos significativos à empresa.

Para se evitar que o sistema de isolamento se deteriore durante o ensaio em virtude de enrolamentos poluídos, é usual se executar o teste de IP previamente (Gupta et al., 2009). Dessa forma, caso o resultado indique a presença de contaminações,

os mesmos devem ser limpos para que, em seguida, seja desenvolvido o teste hipot.

C) Teste de Surto

Aproximadamente 80% das falhas elétricas que ocorrem no estator são conseqüências da deterioração do isolamento entre espiras (Geiman and Baker Instrument Company, 2007). Neste cenário, a capacidade de diagnosticar tais condições configura o teste de surto ou impulso como uma importante ferramenta de diagnóstico de falhas.

Essa técnica consiste na análise e comparação das formas de ondas resultantes da aplicação de pulsos de tensão entre os enrolamentos da máquina. Falhas no sistema de isolamento irão ocasionar discrepâncias de amplitude e frequência entre os sinais coletados, uma vez que, neste cenário, os circuitos testados apresentarão resistência, capacitância e indutância distintas.

Um desafio presente na realização desse teste é a sua subjetividade, isto é, operadores encontram dificuldades para atingirem a mesma conclusão em relação aos resultados. Por conseqüente, a fim de minimizar esse fator, equipamentos modernos fazem o uso de um método analítico (Erro de Área – EAR (%)) que realiza o cálculo da diferença de área entre as duas formas de onda a serem comparadas (Howell, 2016). Com relação a este método, cabe ressaltar que existem duas variações de EAR, quais sejam: P-P (Pulse-to-Pulse) EAR e L-L (Line-to-Line) EAR. A primeira expressa o cálculo diferencial de área entre os sinais advindos dos pulsos aplicados a uma mesma fase, de forma que resultados acima de 10 % representem um indicativo de falha, enquanto que a última consiste na comparação entre formas de onda de fases distintas do motor, sendo considerados aceitáveis valores inferiores a 10% para motores com rotor desacoplado e abaixo de 50% para máquinas com seus rotores instalados (Howell, 2016; SKF Baker, 2013).

Os métodos e recomendações para a execução do teste são encontrados na norma IEEE Std 522 (2004) e, conforme é descrito nesse documento, deve ser utilizado um elevado nível de tensão, similar ao empregado no teste hipot, para a realização do ensaio. Todavia, o teste de surto não é destrutivo, visto que os pulsos aplicados apresentam um tempo de subida curto, da ordem de 0,2 μ s (Baker Instrument Company, 2007; Martinez, 2008), ou seja, são incapazes de danificar o isolamento. Por fim, vale a ressalva de que o teste de surto apresenta ineficiência em identificar defeitos em motores que possuam muitas bobinas em paralelo, dado que a deterioração do isolamento de uma única espira representaria uma variação insignificante e quase imperceptível nos parâmetros da máquina (Martinez, 2008).

D) Teste MCA

A Análise de Circuito do Motor (*Motor Circuit Analysis* – MCA), a qual tem sido utilizada desde 1985, representa uma técnica alternativa para a detecção de diversas falhas em motores. O procedimento baseia-se na aplicação de sinais de

tensão senoidais de 9 – 10 V RMS (entre fases), com uma faixa de frequência de 100-800 Hz, a fim de se obter e analisar os seguintes parâmetros (Penrose and Jette, 2000): resistência, impedância, ângulo de fase e resposta corrente/frequência. Comparando-se os dados coletados a partir de cada fase da máquina é possível determinar a presença de (Penrose, 2004): curto entre espiras, contaminação dos enrolamentos, superaquecimento dos enrolamentos e rotor com barras quebradas.

Diante do exposto, torna-se evidente que o teste MCA se sobressai em relação ao teste de surto, uma vez que é apto a diagnosticar uma maior quantidade de defeitos e aplicando um nível de tensão que é incapaz de provocar avarias ao sistema de isolamento da máquina (sendo mais seguro também para o operador, portanto). Além disso, quando se compara ambos os procedimentos, fica comprovado, por meio de experimentos realizados em Penrose (2004), que o teste MCA identifica mais rapidamente falhas em espiras localizadas em regiões mais internas do enrolamento.

E) Capacitância Tip-Up

O acompanhamento da capacitância dos enrolamentos, ao longo da vida útil do motor, auxilia na prevenção de falhas que possam ocorrer em razão de contaminação e deterioração térmica às quais o material isolante fica submetido.

O teste de Capacitância Tip-Up (C_{TU}) é indicado para motores de alta tensão e fundamenta-se na diferença entre valores de capacitância encontrados a partir da aplicação de dois níveis de tensão distintos (IEEE Std 286 - 2000). A grandeza mensurada a partir do menor nível de tensão representa o valor da capacitância do isolamento, incluindo seus vazios internos. Entretanto, quando há o aumento da tensão, esses vazios sofrem descargas parciais, isto é, por um breve momento, os mesmos se configuram como um curto-circuito. Portanto, a capacitância encontrada durante essa condição compreende unicamente o valor da capacitância da isolação física (Farahani, Borsi and Gockenbach, 2007). Todavia, um único vazio representa uma influência irrisória sobre valor total da capacitância. Dessa forma, alterações significativas desse parâmetro são perceptíveis apenas na presença de um grande número de imperfeições no isolamento da máquina.

Isto posto, recomenda-se que o teste seja realizado diretamente nos terminais do motor, uma vez que, na hipótese de o procedimento ser desenvolvido a partir do painel elétrico, as capacitâncias dos cabos que conectam a máquina ao sistema de alimentação podem interferir nos resultados finais.

F) Descargas Parciais (DPs)

O método de detecção das descargas parciais é extremamente difundido no meio da manutenção industrial, uma vez que consiste em uma técnica que fornece informações abundantes sobre o estado do material isolante do motor.

Como pôde ser observado, o último teste (E) percorrido no presente trabalho é um indicador indireto de descargas parciais. Entretanto, por meio da técnica abordada neste tópico, além de se detectar a presença de DPs, é possível verificar suas magnitudes e seus padrões de ocorrência. A partir desses dados podem ser constatados os seguintes problemas (Stone and Warren, 2006): delaminação do isolamento em função de sobreaquecimentos, revestimentos semicondutores mal feitos, bobinas soltas, problemas relacionados ao ciclo de carga, conexões elétricas mal feitas e contaminação dos enrolamentos.

Cabe lembrar que o pulso de corrente originado a partir desse fenômeno é extremamente rápido, apresentando um espectro de frequência da ordem de MHz. Dessa forma, os equipamentos para a realização do teste, em geral, fazem o uso de capacitores de alta tensão para a detecção das DPs (Stone, Stranges and Dunn, 2016), haja vista que esses dispositivos configuram um caminho de baixa impedância para sinais de alta frequência. Ademais, instrumentos modernos de detecção operam em LF (Low Frequency), > 3 MHz, e fornecem o perfil, magnitude e comportamento das DPs em relação à tensão de entrada aplicada. Por meio dessas informações é possível se identificar a localização, no sistema de isolação, onde as descargas estão ocorrendo.

Apesar de fornecer diagnósticos importantes a respeito do sistema de isolação, a detecção das descargas parciais é altamente dependente de certos fatores, como o tamanho do defeito, a capacitância do enrolamento, a indutância entre o detector e o local da DP, dentre outros, que dificultam associar, unicamente, a magnitude elevada de uma DP a uma deterioração mais séria do enrolamento (Stone, 2005). Portanto, este teste apresenta maior confiabilidade quando realizado de forma comparativa, monitorando a tendência das DPs ao longo da vida útil do motor.

O método para o desenvolvimento e interpretação dos resultados do teste são encontrados na IEEE Std 1434 (2014). Contudo, ressalta-se o fato de que o procedimento seja realizado diretamente a partir dos terminais do motor, posto que, neste cenário, os cabos que conectam o mesmo ao sistema de alimentação não proporcionariam uma possível atenuação dos sinais ora detectados e, por conseguinte, não seriam obtidos resultados incompatíveis com a real situação da máquina.

2.2) Testes On-line

A) Descargas Parciais

A medição *on-line* das descargas parciais, diferentemente da *off-line*, fornece informações atreladas ao motor quando o mesmo se encontra em operação durante o processo industrial. Contudo, o princípio para a análise dos resultados é semelhante em ambos os procedimentos.

Os sistemas *on-line* são compostos pelos seguintes elementos (Stone, 2013; Zhu, Green and Sasic, 2001): sensores, dispositivos eletrônicos para converter o sinal analógico em digital e técnicas de processamento de sinal para gerenciar e

segregar os sinais relacionados às DPs daqueles originados a partir de ruídos.

De acordo com IEEE Std 1434 (2014) e IEC 60034-27-2 (2012), os sistemas de medição de DPs on-line podem operar em HF (High Frequency) – 3-30 MHz, VHF (Very High Frequency) – 30-300 MHz e UHF (Ultra High Frequency) – 300-3000 MHz, uma vez que essas faixas de frequência possibilitam a mitigação dos ruídos e sinais indesejados que possam interferir nos resultados do teste. Contudo, nas condições supracitadas, observa-se uma supressão no alcance da detecção das DPs quando comparado àquele que se teria na situação em que os dispositivos operam em LF (Low Frequency) < 3 MHz, como é o caso do teste *off-line*.

Ressalta-se que conclusões errôneas podem ser extraídas a partir de uma análise centrada unicamente na magnitude das DPs. Por meio da Fig. 2 pode ser verificado que mesmo o motor em seus estágios iniciais apresenta uma elevada magnitude de descargas parciais (Qm), em função do processo de cura do material isolante, que sofre uma redução ao longo do tempo até se estabilizar. Quando a isolação inicia seu processo de deterioração, fica constatado que Qm sofre um contínuo aumento, podendo fixar-se novamente em outro patamar e permanecer constante a partir de então (Warren, 2013).

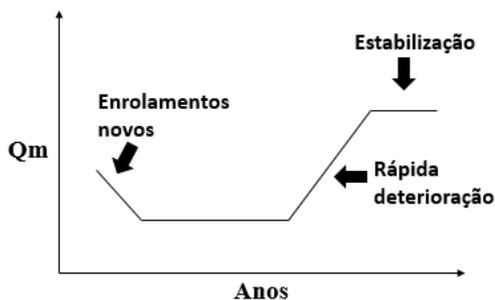


Fig. 2 Tendência das DPs ao longo da vida útil do motor (adaptada de (Warren, 2013)).

Logo, o melhor meio para se diagnosticar o estado da isolação a partir do monitoramento de DPs é analisar a tendência dos resultados ao longo da vida útil da máquina. Dessa forma, é imperativo que o acompanhamento seja realizado a começar do momento em que a motor entrar em operação.

B) Análise da Assinatura de Corrente do Motor – MCSA

A análise de assinatura de corrente do motor é um dos métodos mais promissores para o diagnóstico de falhas em máquinas rotativas, uma vez que, além de possibilitar a detecção de curto-circuito entre espiras, é capaz de identificar excentricidades do rotor.

A técnica consiste na análise do espectro de frequência da corrente da máquina, o qual pode ser determinado utilizando-

se a Transformada Rápida de Fourier (FFT). A partir de então é possível se detectar componentes de frequência que são indicadores de uma falha ou degradação do motor.

Para a situação de curto-circuito entre espiras, surgirão componentes nas bandas laterais da frequência fundamental, que podem ser determinados por (Thomson, 2001):

$$f_{cc} = f_f \cdot \left[\frac{n}{p} \cdot (1 - s) \pm k \right] \quad (2)$$

Onde:

f_{cc} = frequência relacionada ao curto-circuito (Hz);

f_f = frequência fundamental (Hz);

n = número inteiro;

p = número de par de polos;

s = escorregamento;

k = ordem do harmônico de frequência.

As frequências relacionadas à condição do rotor com excentricidades podem ser determinadas por meio de (Gazzana et al., 2008):

$$f_s = f_f \pm k \cdot f_r \quad (3)$$

Onde:

f_r = frequência de rotação (Hz).

Como pode ser observado, (2) e (3) são muito similares, sendo que em alguns casos podem resultar em componentes iguais para uma dada condição de carga (Gazzana et al. 2008). Desse modo, o procedimento deve ser executado por operadores experientes que sejam capazes de distinguir componentes relacionadas a curto-circuito de componentes relacionadas a excentricidades do rotor. Somado a esse fato, o monitoramento em questão é susceptível a falsos resultados, tendo em vista que uma possível presença de harmônicos na rede de alimentação do motor ou uma variação de velocidade da carga acionada também poderiam ocasionar o surgimento de componentes anormais no espectro de frequência analisado. Além disso, constata-se, por meio de experimentos realizados em Oviedo, Quiroga and Borrás, (2011), que o desempenho da técnica MCSA é degradado a partir do incremento de carga no eixo do motor, o que modifica diretamente a amplitude da componente de frequência característica da falha.

C) Monitoramento Térmico

O estresse térmico que ocorre durante um sobreaquecimento ao qual o motor está sujeito provoca uma rápida deterioração do sistema de isolação que, eventualmente, pode ocasionar a falha da máquina (Mohammed and Djurovic, 2018). Nesta conjuntura, o monitoramento térmico configura um mecanismo eficaz para realizar a proteção do equipamento, uma vez que permite verificar se a temperatura dos pontos mais quentes da máquina está em consonância com os

valores estabelecidos para a classe de isolamento térmica do motor em questão, conforme ilustrado pela Fig. 3.

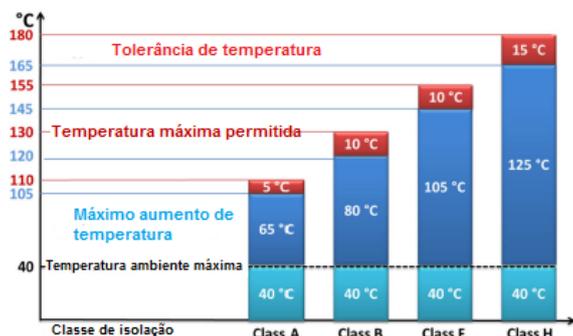


Fig. 3 Limites térmicos para motores Classes A, B, F e H (adaptado de (Mohammed and Djurovic, 2018)).

Para se realizar tal procedimento, usualmente, são instalados sensores entre os enrolamentos da máquina e no rotor. Todavia, a obtenção das informações desses dispositivos localizados na parte rotativa do motor, muitas vezes, se mostra inviável. Portanto, a fim de contornar esse problema, é apresentado em Zhang (2015) um método matemático capaz de estimar tanto a temperatura média da máquina quanto a temperatura de seus pontos mais quentes sem a utilização de sensores.

Ademais, é função do sistema supervisorio da planta industrial, a partir da aquisição desses dados, alarmar ou, até mesmo, retirar o motor de operação durante a ocorrência de uma elevação de temperatura acima daquela definida de acordo com a classe de isolamento da máquina.

3. ANÁLISE DOS TESTES REALIZADOS EM UM SISTEMA INDUSTRIAL

Nesta sessão é apresentada uma discussão sobre os testes realizados no âmbito do programa de manutenção preditiva de motores de uma indústria multinacional no setor de produção de alimentos.

A partir da avaliação dos relatórios disponibilizados pela empresa, observou-se que, durante a campanha de testes do seu programa de manutenção, os seguintes procedimentos/medições são realizados com a finalidade de garantir a confiabilidade do motor em meio ao próximo processo produtivo: (i) resistência de isolamento, (ii) índice de polarização, (iii) hipot C.C e (iv) teste de surto. De acordo com a política adotada pela empresa, na condição de falha em algum dos testes, a máquina é automaticamente reprovada e enviada para que sejam realizados os devidos reparos.

A título de ilustração, adotou-se como objeto de análise os ensaios executados em um motor de 4 polos, 480 V e 60 cv de potência, da indústria em questão.

3.1) Resistência de Isolação e Índice de Polarização

De acordo com a norma IEEE Std 43 (2013), para a classe de tensão do motor em questão, recomenda-se a aplicação de uma tensão de 500 V, de forma que o resultado obtido satisfaça os seguintes critérios:

- I. $RI > 100 \text{ M}\Omega$
- II. $IP > 1,5$

Pode ser observado, por meio da Tabela 1, que o motor ostenta excelentes condições de resistência de isolamento entre o enrolamento e a carcaça, uma vez que apresenta um valor de 1718 MΩ. Todavia, no que se refere ao teste IP (Tabela 2), embora o mesmo tenha sido considerado aceitável, apresentando como resultado o valor de 1,2, tem-se que tal resultado não condiz com o estabelecido por norma (>1,5). Ou seja, segundo tal diretriz, a máquina seria diagnosticada como contendo enrolamentos sujos e contaminados e, portanto, deveria ser reprovada no teste.

Tabela 1. Dados do teste de resistência de isolamento

Resultado do teste	Aprovado
Tensão (V)	500
Corrente (μA)	0,29
Resistência (MΩ)	1718

Tabela 2. Dados do teste de índice de polarização

Resultado do teste	Aprovado
Tensão (V)	500
IP	1,2

3.2) Hipot C.C

De acordo com a norma IEEE Std 95 (2002), o nível máximo de tensão a ser aplicado para a manutenção preditiva corresponde a 0,75% de $1,7 \cdot (2U_{n-FF} + 1000)$ da tensão da máquina, ou seja, para o motor analisado, esse valor seria de 2500 V. Para a realização do teste hipot C.C, foi adotado pela equipe de manutenção da empresa a forma de degrau (*step voltage*), onde o ensaio é executado aplicando-se um aumento progressivo dos níveis de tensão, com duração de 1 minuto cada um deles, até que o valor máximo de tensão estabelecido seja alcançado. Pode ser concluído, observando-se a Fig. 4 e a Tabela 3, que o motor foi aprovado no teste, uma vez que, durante a realização do ensaio, não houve ruptura da parede de isolamento, ou seja, a corrente, ao fim de cada degrau de tensão, registrou um aumento linear e gradual.

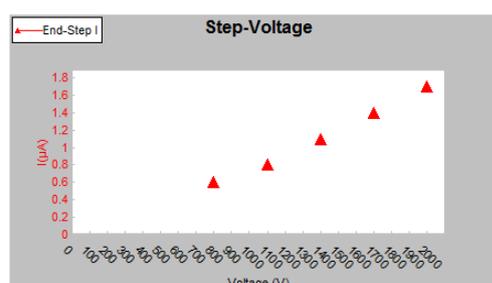


Fig. 4 Corrente em função do degrau de tensão aplicado.

Tabela 3. Resultados do teste Hipot

Resultado do teste	Aprovado
Tensão (V)	2000
Corrente (μ A)	1,7

3.3) Teste de Surto

O teste de surto ou pulso é padronizado no IEEE Std 522 (2004), o qual estabelece que o máximo nível de tensão a ser utilizado durante o procedimento corresponde a $2,6 U_{n-FT}$ (pico), o que corresponde, no motor em estudo, ao valor de 1020 V, relativamente inferior ao adotado (2000 V) durante a execução do procedimento pela equipe responsável. Antes da exibição dos resultados presentes no relatório da empresa, vale ressaltar que a sua análise foi baseada na taxa de erro de área (EAR%), já explicada anteriormente.

A Fig. 5 apresenta as formas de onda das tensões das fases medidas nos terminais dos enrolamentos do motor devido à aplicação dos pulsos.

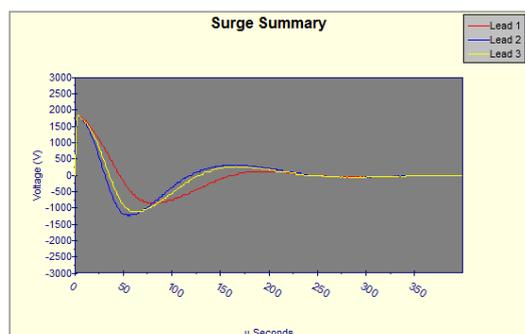


Fig. 5 Curvas de resposta aos pulsos aplicados nas fases 1, 2 e 3

Pode ser verificado, por meio da Tabela 4, que os valores de P-P EAR% estão abaixo do limite estabelecido de 10 %, o que define a aprovação do motor nesse quesito. Contudo, o motor foi reprovado na avaliação do L-L EAR, tal como mostrado na Tabela 5, uma vez que entre as fases 1 e 2 foi registrado um valor de 60 % para esse índice, superior, portanto, ao limite estabelecido de 50% para máquinas com rotor instalado.

Tabela 4. Dados do teste de surto: P-P EAR%

Fases	Tensão de pico (V)	Máximo P-P EAR%	Resultado
1	2000	1,6	Aprovado
2	2000	1,8	Aprovado
3	2000	1,4	Aprovado

Tabela 5. Dados do teste de surto: L-L EAR %

Fases comparadas	Tensão de pico (V)	Máximo L-L EAR%	Resultado
1-2	2000	60	Reprovado
2-3	2000	19	Aprovado
3-1	2000	41	Aprovado

Diante da reprovação no teste de surto, é imprescindível que sejam realizados os reparos necessários para que o motor apresente condições de operar novamente sem estar sujeito a uma falha eminente, o que poderia comprometer o processo produtivo da indústria.

Em suma, os testes empregados por parte da empresa para a realização da manutenção preditiva em motores, abrangem, no geral, a grande maioria das falhas que acometem as máquinas rotativas, embora na maioria dos procedimentos realizados houvessem situações em desacordo com as recomendações estabelecidas em norma.

Recomenda-se, a fim de se melhorar e ampliar a capacidade de diagnóstico de problemas, que a empresa avalie a possibilidade de se adotar o teste MCA em substituição ao teste de surto. Isso porque, como explicado neste trabalho, o teste MCA, além de englobar prognósticos de falhas relacionadas a excentricidades do rotor, à contaminação dos enrolamentos e avarias associadas à degradação térmica da isolamento, é capaz também de detectar curtos entre espiras em pontos mais internos do enrolamento, condição não muito bem contemplada pelo teste de surto. Ademais, o método MCA representa uma opção mais completa e segura, haja vista que trabalha com baixas tensões.

Por fim, como comentário final dessa avaliação crítica da metodologia de manutenção preditiva adotada pela empresa, vale acrescentar que, no caso dos motores de alta tensão dessa indústria, sugere-se a realização do teste de descargas parciais, pois, ainda que mais dispendioso, agregaria valor aos procedimentos atualmente empregados. Isso porque os ensaios atuais, ao contrário do método de acompanhamento das DPs, são testes de aprovação/reprovação, isto é, não são capazes de fornecer informações relativas à evolução dos problemas relacionados ao sistema de isolamento. Ademais, a análise dos padrões e das magnitudes das DPs permite identificar a provável localização do problema e, com isso, avaliar os fatores adversos que, de forma gradativa, estejam ocasionando as falhas. A título de exemplificação, enquanto que padrões que indicam DPs externas podem ser característica de enrolamentos contaminados, as descargas parciais localizadas no interior da parede de isolamento para a carcaça, são um indicativo de delaminação do isolante devido a sobreaquecimentos.

4. CONCLUSÃO

O trabalho em questão, a princípio, apresentou uma revisão acerca de diversos procedimentos e testes, *on-line* e *off-line*, empregados em cenário industrial no programa de manutenção preditiva de motores de indução. Ao longo dessa seção teórica, além de serem pontuadas as vantagens e as desvantagens verificadas em cada técnica, especificou-se as normas vigentes que detalham e regulamentam os respectivos testes. Posteriormente, foi desenvolvida uma análise sobre os ensaios realizados em motores de indução durante o período de manutenção preditiva de uma companhia multinacional do setor alimentício. O estudo dos relatórios, aos quais obteve-se

acesso, permitiu apontar algumas irregularidades presentes nos procedimentos desenvolvidos.

Por fim, foram sugeridos à empresa, novos testes (MCA e Descargas Parciais) com a propriedade de complementar as técnicas ora já desenvolvidas, uma vez que aperfeiçoariam o programa de manutenção preditiva por meio da ampliação da capacidade de diagnóstico de falhas que acometem as máquinas rotativas em um processo produtivo.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de financiamento 001.

REFERÊNCIAS

- Farahani, M., Borsi, H. and Gockenbach, E.. (2007). Study of Capacitance and Dissipation Factor Tip-Up to Evaluate the Condition of Insulating Systems for High Voltage Rotating Machines. *Electr. Eng.*, v. 89, no.4, pp.263–70.
- Gazzana, D. S. et al (2008). Método Da Análise Da Assinatura de Corrente Do Motor (MCSA) Aplicado à Detecção de Falhas de Curto-Circuito Do Enrolamento Do Estator de Motores de Indução. in *Induscon*. 6 p.
- Geiman, J., Baker Instrument Company. (2007). DC Step-Voltage And Surge Testing Of Motors . 9 p.
- Guedes, A. S. (2018). Estudo e Proposição de Técnicas Para Avaliação Do Isolamento Em Motores de Indução Trifásicos de Baixa e Média Tensão. *UFMG*.
- Gupta, B. K., Stone, G. C., and Stein, J. (2009). Stator Winding Hipot (High Potential) Testing. *Electrical Insulation Conference, EIC 2009* (June). pp. 409–13.
- Howell, M. (2016). Surge Testing and Error Area Ratio (EAR) Basics. *Electrical Apparatus Service Association*. 2 p.
- IEEE. (2000). *IEEE Standard 286: Recommended Practice for Measurement of Power Factor Tip-Up of Electric Machinery Stator Coil Insulation*. 2°. edited by IEEE.
- IEEE. (2004). *IEEE Standard 522: Guide for Testing Turn Insulation of Form-Wound Stator Coils for Alternating-Current Electric Machines*. 2°. edited by IEEE.
- IEEE. (2013). *IEEE Standard 43: Recommended Practice for Testing Insulation Resistance of Electric Machinery*. 2°. edited by IEEE.
- IEEE. (2014). *IEEE Standar 1434: Guide for the Measurement of Partial Discharges in AC Electric Machinery*. 2°. edited by IEEE.
- Kim, H. et al. (2017). Experience with Stator Insulation Testing and Turn/Phase Insulation Failures in the Power Generation Industry. *Proceedings of the 2017 IEEE 11th, SDEMPED 2017* 2017-January, no.3, pp. 21–30.
- Martinez, A. M. P. (2008). Estudo de Métodos de Detecção de Curto-Circuito Entre Espiras Em Estatores de Motores de Indução Trifásicos de Baixa Tensão. *UFSC*.
- Mohammed, A., and Djurovic, S. (2018). Stator Winding Internal Thermal Monitoring and Analysis Using In Situ FBG Sensing Technology. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, v. 33, no.3, pp. 1508–18.
- Oviedo, S., Quiroga, J., and Borrás, C. (2011). Motor Current Signature Analysis and Negative Sequence Current Based Stator Winding Short Fault Detection in an Induction Motor. *DYNA (Colombia)*, v. 78, no.170, pp.214–20.
- Penrose, H. W. (2004). Motor Circuit Analysis Concept and Principle. *SUCCESS by DESIGN*, pp. 1–13.
- Penrose, H., W., and James Jette. 2000. Static Motor Circuit Analysis: An Introduction to Theory and Application.” *IEEE Electrical Insulation Magazine*, v.16, no.4, pp.6–10.
- SKF and Baker. n.d. Finding Electrical Failure Modes of Rotating Machinery With Electrical Testing Mechanisms. 11 p., Disponível em: https://www.plantservices.com/assets/wp_downloads/pdf/101026_Baker.pdf
- SKF Baker. (2013). *SKF Static Motor Analyzer. 240 (Manual Técnico)*. Disponível em: <https://www.skf.com/binary/30-144871/PUB-CM-I4-71-025-EN-V11-Baker-AWA-IV-User-manual.pdf>
- Stone, G. C. (2013). Condition Monitoring and Diagnostics of Motor and Stator Windings – A Review. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electr. Insulation*, v.20, no.6, pp.2073–80.
- Stone, G. C. et al (2014). *Electrical Insulation for Rotating Machines*. 2°. 678 p. IEEE Press.
- Stone, G. C., Stranges, M. K. W. and Dunn, D. G. (2016). Common Questions on Partial Discharge Testing: A Review of Recent Developments in IEEE and IEC Standards for Offline and Online Testing of Motor and Generator Stator Windings. *IEEE Indust. Appl. Magazine* v. 22, no.1, pp.14–19.
- Stone, G. C. and Warren, V. (2006). Objective Methods to Interpret Partial-Discharge Data on Rotating-Machine Stator Windings. *IEEE Transactions on Industry Applications*, v.42, no.1, pp. 195–200.
- Stone, G. C. (2005). Recent Important Changes in IEEE Motor and Generator Winding Insulation Diagnostic Testing Standards. *IEEE Transaction on Ind. Appl.* v. 41, no.1, pp. 91–100.
- Stranges, M. K. W., Haq, S. U., and Teran, L. H. A., (2016). Large-Motor High-Voltage Insulation Systems Testing: Qualification and Acceptance for the Petrochemical Industry. *IEEE Ind. Appl. Mag.*, v. 22, no. 6, pp.33–38.
- Thomson, W. T. 2001. On-Line MCSA to Diagnose Shorted Turns in Low Voltage Stator Windings of 3-Phase. Induction Motors Prior to Failure. in *IEMDC 2001. IEEE International Electric Machines and Drives Conference (Cat. No.01EX485)*. pp. 891–98.
- Torkaman, H. and Karimi, F. (2015). Measurement Variations of Insulation Resistance/Polarization Index during Utilizing Time in HV Electrical Machines - A Survey. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, v. 59, pp. 21–29.
- Warren, V. 2013. Partial Discharge Testing : A Progress Report - Rapid Deterioration - PD Trends. *IRMC*. pp. 1-11.
- Warren, V., and Stone, G. C. (1998). Recent Developments in Diagnostic Testing of Stator Windings. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, v. 14, no.5, pp.16–21.
- Zhang, H. (2015). Online Thermal Monitoring Models for Induction Machines. *IEEE Transactions on Energy Conversion* v. 30, no. 4, pp.1279–87.
- Zhu, H., Green, V. and Sasic, M. (2001). Identification of Stator Insulation Deterioration Using On-Line Partial Discharge Testing. *IEEE Electr. Insul. Mag.*, v. 17, no. 6, pp. 21–26.