

DIAGNÓSTICO DE FALHAS EM MOTORES DE INDUÇÃO ATRAVÉS DA ANÁLISE DA ASSINATURA DE CORRENTE

¹ Henrique Lima Carvalho (SENAI CIMATEC) – henrique.limacarvalho@gmail.com; ² Gleice Maria de Araújo Ribeiro (SENAI CIMATEC) – gmariar@fieb.org.br;

Resumo: A alta competitividade e o foco em produtividade, fazem com que a manutenção seja uma ferramenta de vital importância para atingir os objetivos organizacionais. Como objetivo, este artigo descreve a técnica preditiva de Análise de Assinatura Elétrica (ESA) abordando sobre suas principais informações e sua viabilidade em relação a manutenção de motores de indução trifásicos (MIT). A pesquisa foi desenvolvida através do levantamento bibliográfico em principais publicações a cerca deste tema. A partir disso, foram reunidos os principais padrões de falhas e cartas de severidade que auxiliam no diagnóstico de falhas em MITs através da ESA. Como principais resultados pode-se destacar a importância do conhecimento da técnica e do processo para se obter um diagnóstico confiável.

Palavras-Chave: Manutenção Preditiva; Motores de Indução; Análise de Assinatura Elétrica; Diagnóstico de Falha.

FAULT DIAGNOSIS IN INDUCTION MOTORS BY ELECTRICAL SIGNATURE ANALYSIS

Abstract: The high competitiveness and the focus on productivity becomes maintenance as an important tool to reach the organizational goals. This article describes the predictive technique of Electrical Signature Analysis (ESA) addressing its main topics and showing its viability related to the maintenance of three-phase induction motors. The research has been developed through the bibliographic survey in publications about this subject. From this point, were reunited the main fault patterns and severity charts that helps the fault diagnosis in induction motors through ESA. As the principal results, it can be pointed the importance of the knowledge about the technique and the process to obtain a reliable diagnosis.

Keywords: Predictive Maintenance; Induction Motors; Electrical Signature Analysis; Fault Diagnosis.



1. INTRODUÇÃO

A evolução do capitalismo traz como consequência, o aumento da competitividade entre as empresas e maior exigência da qualidade dos produtos, incentivando uma maior busca de novas estratégias para diferenciar-se no mercado.

Paralelo a este cenário, a manutenção ganhou uma atenção especial, onde as organizações vêm buscando um aumento da confiabilidade e disponibilidade de seus ativos, aplicando novas técnicas de gerenciamento e controle dos mesmos.

Vale ressaltar que neste contexto, as empresas então, passam a direcionar esforços para reduzir a quantidade de manutenção corretiva não planejada e aumentar a manutenção preditiva, possibilitando assim, a detecção de uma falha de forma prematura, antes de sua ocorrência.

Tratando-se de processos produtivos industriais, os motores de indução trifásicos (MITs) são os principais elementos da cadeia produtiva, e entre as máquinas rotativas empregadas, destacam-se pela sua versatilidade, robustez, menor custo e manutenção reduzida. De acordo com FILHO [1], MITs representam mais de 90% das máquinas elétricas utilizadas além de serem responsáveis pelo consumo de 40% de toda energia elétrica consumida no Brasil e 50% da energia consumida no setor industrial. Diante deste cenário, justifica-se a aplicação da manutenção preditiva para este tipo de equipamento, pois a mesma trará diversos benefícios com o monitoramento da condição de operação do equipamento, proporcionando uma redução drástica no número de paradas para manutenção, e assim, o aumento da sua vida útil, confiabilidade e redução de perdas de produção e lucro cessante.

Assim, a técnica de Análise de Assinatura Elétrica (ESA – *Electric Signature Analysis*) vem se enquadrando cada vez mais como opção de técnicas de manutenção preditiva. A ESA é um conjunto de técnicas capaz de detectar falhas em todo conjunto eletromecânico através da leitura de sinais de elétricos coletados remotamente. Segundo BONALDI *et al.* [2], dentre as técnicas que compõem a ESA, a MCSA (*Motor Current Signature Analysis*) ou Análise da Assinatura de Corrente, é a técnica mais utilizada no setor industrial e destaca-se pela sua abrangência e simplicidade, pois só se faz necessário analisar o sinal de espectro de corrente da máquina para detecção de condições anormais.

Diante destas considerações, o objetivo principal deste estudo é avaliar as vantagens e desvantagens da técnica preditiva de análise de assinatura elétrica em relação a manutenção de motores de indução trifásicos, apresentando seus principais padrões de falha e cartas de severidade existentes.

2. METODOLOGIA

Para o desenvolvimento dessa pesquisa foi realizado um levantamento bibliográfico acerca do tema escolhido, analisando estudos de casos, artigos publicados em congressos, manuais, monografias, encontrados em base de dados como *SciELO* e *Google Scholar*, com intuito de consolidar os conceitos que envolvem a temática. Este estudo foi realizado no período de janeiro a abril de 2018.

Após esta etapa, será apresentado um estudo mais aprofundado sobre a ESA, abordando suas principais técnicas e por fim, demonstrando os padrões de falhas existentes na literatura relacionados aos principais modos de falha em MITs, bem como, explorar suas vantagens, desvantagens.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Análise de Assinatura Elétrica

A ESA é uma técnica relativamente nova e não tão difundida se comparada a outras técnicas mais consolidadas, entretanto, vêm evoluindo consideravelmente nos últimos 20 anos. O avanço tecnológico é um fator que propiciou sua evolução devido ao desenvolvimento de sensores e microprocessadores específicos para aquisição e processamento dos sinais. Esta técnica tem como objetivo monitorar a condição do equipamento gerando informações de todo conjunto eletromecânico: alimentação, motor, transmissão e carga.

A alteração no espectro da frequência da corrente proveniente de uma falha em desenvolvimento, baseia-se na característica do motor atuar como transdutor. De acordo com OBAID [3], estas falhas modulam o campo magnético no entreferro produzindo frequências harmônicas. Como o fluxo oscila na frequência fundamental f_1 , estas frequências harmônicas resultam em bandas laterais da f_1 .

Tais frequências são bem conhecidas e existem diversos estudos que as comprovam matematicamente e experimentalmente, estabelecendo assim, padrões validados para cada tipo de falha. Portanto, quando há uma característica no espectro de frequência diferente do espectro de um motor saudável, percebe-se que possivelmente ocorreu uma falha, onde através da sua comparação com os padrões existentes, é possível identifica-la.

A coleta dos sinais é feita através de transdutores de corrente ou tensão e pode ser feita no painel do motor não havendo a necessidade de acessar a máquina, configurando uma grande vantagem em termos de segurança, praticidade e a possibilidade de monitorar máquinas instaladas em locais de difícil acesso. Sendo assim, pode-se dizer que a ESA é a única técnica que além de *online*, pode ser feita remotamente. Os sinais coletados, então são processados através de um algoritmo de FFT (*Fast Fourier Transform*) ou Transformada Rápida de Fourier, onde converte-se o sinal no domínio do tempo para o domínio da frequência, obtendo sua assinatura elétrica, que enfim, é apresentada em ambiente computacional de forma a facilitar sua análise, inserção de dados, além de poder armazenar estas informações criando um banco de dados que será importante para análises futuras.

3.3.1 Técnicas de ESA

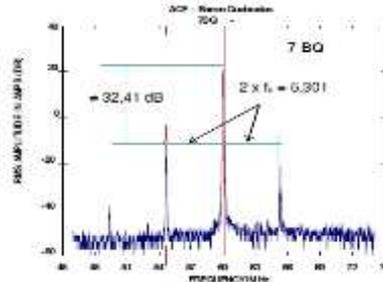
As técnicas mais relevantes de ESA, que possuem trabalhos científicos e experimentos validados em campo são:

- MCSA - *Motor Current Signature Analysis* ou Análise da Assinatura de Corrente

Através do sinal da corrente do estator de uma das três fases, é possível detectar falhas em diversas partes do motor. A figura 1 apresenta uma aplicação da

MCSA em um MIT, onde através da observação do seu espectro, indica-se a existência de sete barras quebradas.

Figura 1: Espectro de assinatura de corrente de um MIT com 7 barras quebradas.



Fonte: BRITO (2015).

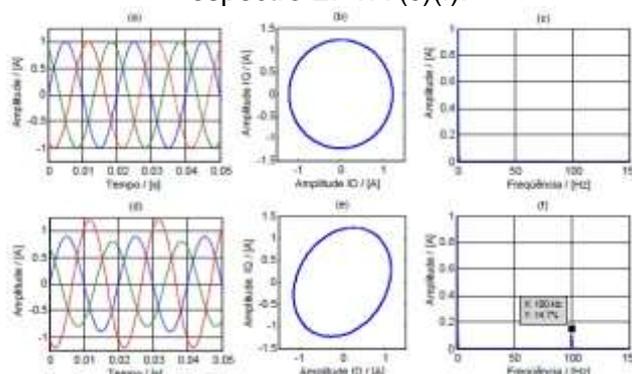
• Demodulação

Existe a opção de se apresentar o sinal de forma demodulada, ou seja, através da filtragem do sinal da frequência fundamental. Sendo assim, as frequências características provenientes de falhas que apareciam como bandas laterais da frequência fundamental, agora aparecem independente dela, o que torna o processo de análise mais fácil.

• EPVA - *Extended Park's Vector Approach* ou Abordagem do Vetor Estendido de Park

Inicialmente, baseava-se na modificação no círculo de Park após uma condição de falha, porém, era de difícil mensuração. Então foi proposta a EPVA, onde obtém-se o espectro de frequências do módulo do Vetor de Park, e segundo BONALDI [5], esta técnica possui duas grandes vantagens: o espectro já aparece demodulado através da transformação de Park; e por utilizar o sinal de corrente das três fases, possui um espectro muito mais significativo. Esta característica é muito importante para análise de problemas de desequilíbrio elétrico no estator, como pode-se observar na figura 2.

Figura 2: Sistema trifásico equilibrado (a) e desequilibrado (b), círculo de Park (b)(e), espectro EPVA (c)(f).



Fonte: SILVA (2008) – adaptado.

3.3.2 Padrões de Falhas para MITs

Os padrões de falhas existentes na literatura são de grande importância no diagnóstico, pois eles permitem o conhecimento do comportamento característico do motor em falha. Esta etapa se baseia no trabalho de BONALDI [5], destacando

padrões de falhas no rotor e estator como barras quebradas, excentricidade estática e dinâmica e problemas nos enrolamentos do estator.

• Barras Quebradas

A detecção de barras quebradas se dá pela observação de duas componentes localizadas em torno da frequência fundamental, como é possível observar na figura 3. A ocorrência deste tipo de falha resulta no aparecimento de duas componentes espaçadas em $2.f.s$ (onde f é a frequência fundamental e s é o escorregamento) da frequência fundamental no espectro de corrente.

Figura 3: Padrão de barras quebradas.



Fonte: BONALDI (2005).

Após detectar tal comportamento, deve-se observar quando a sua severidade analisando a maior amplitude entre as duas componentes. As cartas de severidade podem auxiliar nesta etapa, sugerindo também, ações recomendadas como observado na figura 4.

Figura 4: Carta de severidade para barras quebradas.

Nível de Severidade	Diferença em dB	Condição do rotor	Ação recomendada
1	>60	Excelente	Nenhuma
2	54-60	Bom	Nenhuma
3	48-54	Moderado	Verificar tendência
4	42-48	Possibilidade de barra trincada com pontos de alta resistência	Atenção (MCSA)
5	36-42	1 ou 2 barras provavelmente trincadas ou quebradas	Atenção (MCSA)
6	30-36	Múltiplas barras trincadas ou quebradas	Reparo
7	<30	Múltiplas barras trincadas ou quebradas e anel de curto	Reparo

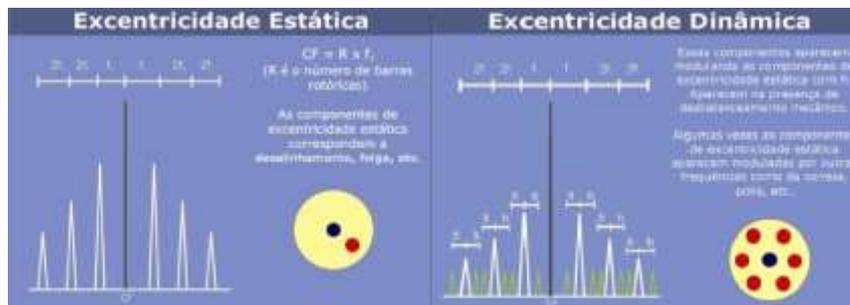
Fonte: BONALDI (2005).

• Excentricidade

A detecção de excentricidade é feita através da observação do espectro de corrente em altas frequências onde encontra-se uma frequência de centro (CF), dada pela equação na figura 5 (a), onde R é o número de barras do rotor, e f_r a frequência de rotação. As frequências características da excentricidade estática são bandas laterais da CF moduladas pela frequência fundamental (f_1). Já as componentes da

excentricidade dinâmica estão moduladas das componentes de excentricidade estática por f_r , como indicado na figura 5 (b).

Figura 5: Padrão de excentricidade estática (a) e dinâmica (b).



Fonte: BONALDI (2005).

A dependência de informações construtivas como o número de barras do rotor dificulta este método, já que esta informação não consta nos dados de placa do motor, necessitando a busca em bancos de dados, catálogos do fabricante ou desmontando o MIT. Por outro lado, este método possibilita separar os efeitos de excentricidade estática e dinâmica. A análise de severidade é feita comparando a diferença de amplitude em dB entre a componente de excentricidade estática e dinâmica. A carta de severidade é mostrada na figura 6.

Figura 6: Carta de severidade para excentricidade.

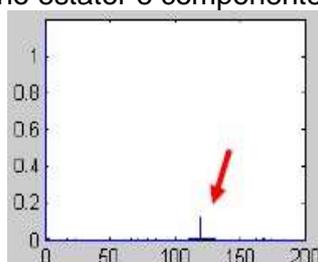
Nível de Severidade	Diferença em dB	Ação recomendada
1	>40	Nenhuma
3	40-20	Verificar tendência
5	<20	Alarme (MCSA)

Fonte: BONALDI (2005).

• Enrolamentos do estator

Segundo ASSUNÇÃO [7], as falhas no estator são principalmente relacionadas com sobretensões que causam degradação do isolamento elétrico dos enrolamentos, resultando em curto-circuito e conseqüentemente, desequilíbrio das correntes estatóricas. De acordo com BONALDI [5], o método mais eficaz para detecção deste tipo de problema é através da EPVA, onde observa-se uma componente localizada em duas vezes a frequência de alimentação para indicar o surgimento e severidade deste tipo de falha, conforme figura 7.

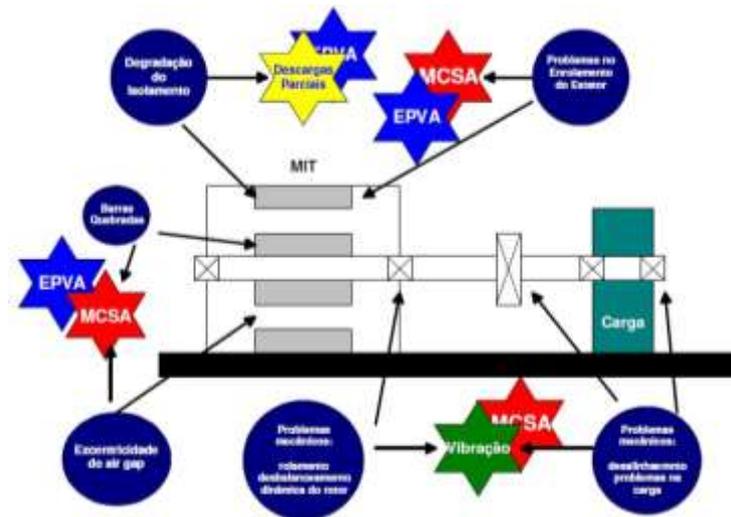
Figura 7: Padrão de falha no estator e componente em $2.f_1$ no espectro EPVA.



Fonte: BONALDI (2005) - adaptado.

Em síntese do que foi apresentado neste artigo, a figura 15 demonstra as técnicas mais recomendadas para detecção de falhas em cada parte do conjunto eletromecânico, detalhando as principais técnicas de ESA aqui abordadas, bem como algumas das principais técnicas também recomendadas.

Figura 15: Técnicas preditivas para cada tipo de falha.



Fonte: BONALDI (2005).

4. CONCLUSÃO

Este artigo reuniu as principais informações acerca da ESA, e de suas principais técnicas, MCSA e EPVA, abordando sua abrangência e relevância em relação com os principais modos de falhas em MIT. Foram agrupados também, os principais padrões de falha e cartas de severidade de falhas no motor, que servem como guia auxiliando a análise espectral da condição do motor.

Ao longo do artigo, foram apresentadas algumas vantagens e desvantagens da utilização da técnica de ESA. Em suma, as principais vantagens são: por ser uma técnica remota e online, possibilita monitorar máquinas em difícil acesso, praticidade e segurança na coleta de dados, possui grande abrangência de detecção e permite também, o acompanhamento de outras grandezas relacionadas a qualidade de energia e eficiência da máquina. Como principais desvantagens: grande sensibilidade a variações de carga (velocidade e torque) inerentes ao processo, para alguns componentes só é possível diagnosticar falhas em estado avançado, para alguns métodos é necessário o conhecimento de dados construtivos que não constam na placa do motor.

Vale destacar a importância de novos estudos para tornar a ESA ainda mais confiável e eficiente quanto ao diagnóstico em MITs. Além disso, tais características mencionadas como desvantagens refletem oportunidades de melhoria e inovação na possibilidade de mitigá-las. Neste quadro, é possível citar o desenvolvimento de métodos não tão explorados, como por exemplo, a Análise Espectral de Potência Instantânea (IPSA), que por analisar o sinal do produto da corrente estatórica e tensão

de alimentação, obtém-se um espectro muito mais significativa, a transformada de *Wavelet* associada a ESA para diagnosticar falhas em rolamentos, sistemas de diagnóstico baseado em inteligência artificial, dentre outras possibilidades.

Neste contexto, cabe ressaltar que a tomada de decisão após análise, não é uma tarefa fácil e exige experiência e conhecimento do processo e da técnica utilizada. O responsável deve levar em consideração diversos fatores como aspectos construtivos do conjunto, comportamento da carga e o histórico do equipamento pois podem dificultar a análise ou induzir o analista ao erro, e entre outras características que podem influenciar no diagnóstico.

5. REFERÊNCIAS

- ¹ FILHO, G. F. **Motor de indução**. 1 ed. São Paulo. Editora Érica, 2000.
- ² BONALDI, E.; OLIVEIRA, L.; SILVA, J. B.; **Predictive maintenance by electrical signature analysis to induction motors**. Ed. InTech, 2012, pp. 487–520.
- ³ OBAID, Ramzy R.; HABETLER, Thomas G.; GRITTER, David J. **A Simplified Technique for Detecting Mechanical Faults Using Stator Current in Small Induction Motors**. In: INDUSTRIAL APPLICATION OF ELECTRICAL ENERGY WORLD CONFERENCE, 35, Roma, 2000. **Proceedings**. Roma: IEEE p. 479-483.
- ⁴ BRITO, Jorge; BACCARINI, Lane; LAMIM, Paulo; PEDERIVA, Robson. **Deteção de barras quebradas em motores elétricos utilizando análise de corrente e fluxo magnético**. In: CONGRESSO DE GESTÃO E TÉCNICAS NA MANUTENÇÃO, 5, Belo Horizonte, 2001.
- ⁵ BONALDI, Erik. **Diagnóstico Preditivo de Avarias em Motores de Indução Trifásicos com MCSA e Teoria de Conjuntos Aproximados**. 2005. 185 f. Tese de Doutorado - Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2005.
- ⁶ SILVA, Jonas G. B. **Aplicação de análise de componentes principais (PCA) no diagnóstico de defeitos em rolamentos através da assinatura elétrica de motores de indução**. 2008. 109 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2008.
- ⁷ ASSUNÇÃO, Frederico O. **Técnicas de Análise Preditiva para Falhas Elétricas em Motores de Indução Trifásicos**. 2006. 94 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2006.