

A ANÁLISE DE CIRCUITOS DE MOTORES: Pesquisa bibliográfica dos métodos e técnicas diagnósticas em motores industriais no Brasil.

ENGINE CIRCUITS ANALYSIS: Bibliographical research on diagnostic methods and techniques in industrial engines in Brazil.

Oliveira, Wanderson W.*
Schroder, Gustavo**

RESUMO

A competitividade do mercado industrial no Brasil, se faz presente, demonstrando a importância de investimentos na área de gestão de manutenção de máquinas. O objetivo deste estudo é compreender a contribuição do método MCA e MCSA no diagnóstico de falhas em motores industriais. Os subtópicos a serem analisados; o melhoramento da confiabilidade dos equipamentos, aumento a vida útil dos equipamentos, diminuir riscos de segurança nas instalações, avaliar o estado do equipamento mesmo enquanto está ligado, de forma não invasiva. Foi realizado um levantamento de obras que se perpassa pelo tema a fim de trazer um panorama dos dois métodos no cenário industrial brasileiro, logo a delimitação do referencial teórico embasou a amostra de vinte motores na aplicabilidade de testes MCA e MCSA, gerando números e espectros que foram comparados com as obras apresentadas neste estudo. Os resultados encontrados permitiram inferir a contribuição dos métodos na prevenção das falhas na área elétrica dos motores industriais e a relevância da junção das duas técnicas na gestão da manutenção dos maquinários industriais no Brasil.

Palavras-chave: MCA, MCSA, indústria, motores, gestão de máquinas.

ABSTRACT

The competitiveness of the industrial market in Brazil is present, demonstrating the importance of investments in the area of machine maintenance management. The objective of this study is to understand the contribution of the MCA and MCSA method in diagnosing faults in industrial engines. Subtopics will be analyzed; improving the reliability of equipment, increasing the useful life of equipment, reducing safety risks in installations, evaluating the condition of the equipment even while it is turned on, in a non-invasive way. A survey of works covering the theme was carried out in order to provide an overview of the two methods in the Brazilian industrial scenario. Therefore, the delimitation of the theoretical framework supported the sample of twenty engines in the applicability of MCA and MCSA tests, generating numbers and spectra that were compared with the works presented in this study. The results found allowed us to infer the contribution of the methods in preventing failures in the electrical area of industrial engines and the relevance of the particularity of the two techniques in managing the maintenance of industrial machinery in Brazil.

Keywords: MCA, MCSA, industry, engines, machine management.

* Rede de Ensino Doctum – Unidade Juiz de Fora –Wander-jf@hotmail.com– graduando em Engenharia Elétrica.

** Rede de Ensino Doctum – Unidade Juiz de Fora – Luiz.braga@doctum.edu.br.

1. Introdução

O advento da globalização impulsiona a competitividade comercial nos dias atuais, o número de indústrias no mercado brasileiro aumentou 3,6 % no último ano, segundo dados do IBGE (2023), produzir produtos de alta qualidade com baixo custo de produção e matéria prima em um curto prazo para atender o mercado global concorrente, está entre as principais metas das empresas brasileiras. Afim de atingi-las, se destina à investimentos voltados para uma otimização da gestão maquinária com a finalidade de processos produtivos eficazes que atendam a maior gestão industrial de forma tecnológica e funcional.

Demonstrando assim a importância do crescimento científico destinado ao melhoramento do maquinário industrial, para que a execução dos produtos na indústria brasileira seja desenvolvida e planejada com menos falhas atingindo um índice satisfatório de produção, os motores que são a força motriz das máquinas possuem um papel importantíssimo e necessitam de diagnósticos eficientes desde da retirada de fábrica até sua vida útil para melhor desempenho, evitando assim falhas e baixa produção.

Dentre as metodologias utilizadas para avaliação dos motores em máquinas, este trabalho se dedica a compreender a MCA (análise de circuito de motores) e a técnica MCSA (análise de correntes das fases do motor) como métodos avaliativos e diagnósticos na área elétrica dos motores demonstrando falhas mediante a verificação das normas vigentes brasileiras para comercialização e utilização deste maquinário.

Compreende-se como objetivo deste trabalho o estudo de artigos que dedicaram a testes comparativos de métodos e técnicas para análise de motores em maquinários industriais no período dos últimos vinte anos de pesquisas brasileiras, com intuito de trazer um compilado destes resultados para a produção acadêmica da área. Se faz relevante mediante a escassez de artigos e produções acadêmicas que envolva a manutenção e área elétrica dos motores.

A fim de investigar a compreensão do desempenho e utilização dos motores, temos como hipótese; qual a contribuição dos métodos MCA e MCSA como diagnósticos de falhas nas áreas elétricas dos motores industriais? Para além se faz necessário avaliar subtópicos que perpassam este tema; melhoramento da confiabilidade dos equipamentos, aumento a vida útil dos equipamentos, diminuir

riscos de segurança nas instalações, avaliar o estado do equipamento mesmo enquanto está ligado, de forma não invasiva.

Encoraja-se a dizer que a manutenção e gestão industrial e seus métodos avaliativos voltados a motores está em desenvolvimento no Brasil, a tecnologia viabiliza a evolução maquinária otimizando processos e demandas do melhoramento de sistemas elétricos para esta finalidade.

2. Referencial Teórico

A investigação bibliográfica viabilizou aprofundar as definições dos métodos e técnicas que são aplicados principalmente na manutenção preditiva. A análise de circuitos de motores (MCA) possibilita detectar os desequilíbrios de tensão e/ou depredação no isolamento antes de sinalizarem o dano, o que faz da metodologia uma ferramenta preditiva pois prevê a falha antes que ocorra, diminuindo custos por exemplo ao manter a produção parada por ter que corrigir uma falha no motor que poderia ter sido diagnosticada e tratada antes da parada do maquinário.

A MCSA (análise da corrente do motor) embora seja uma técnica dentro da MCA possui um papel importantíssimo para avaliar o estado do motor nas variações de cargas elétricas e também no momento que o maquinário está em uso, ou seja, o que permite avaliar o estado do motor, se saiu de fábrica com alguma avária ou fora das normas legais de venda do produto antes mesmo que ele tenha sido utilizado na produção.

Os ensaios elétricos, testes executados para categorizar o desempenho dos condutores e isolantes nos equipamentos elétricos, com a finalidade de compreender como eles podem ser otimizados e ter um funcionamento mais seguro e pleno dentro do circuito de motores industriais.

Afim de investigar o papel de cada metodologia e suas técnicas na análise dos motores. Ainda tratando-se da MCA, analisa-se em diversos aspectos e cenários de aplicação, permitindo o refinamento das informações em busca de mais eficiente detecção de falhas e prevenção de quebras ou perdas do maquinário.

Segundo Spamer (2009), a análise de circuito de motores tem seu espaço nas principais gestões de manutenção preditivas das indústrias:

Essa técnica é bastante difundida e consolidada no mercado, sendo atualmente a principal ferramenta de avaliação da parte elétrica dos motores existentes no parque industrial. Exige que se faça acompanhamento de histórico e comparação de assinaturas, não sendo possível a tomada de decisões somente baseadas em poucas leituras (SPAMER, 2009, p. 139).

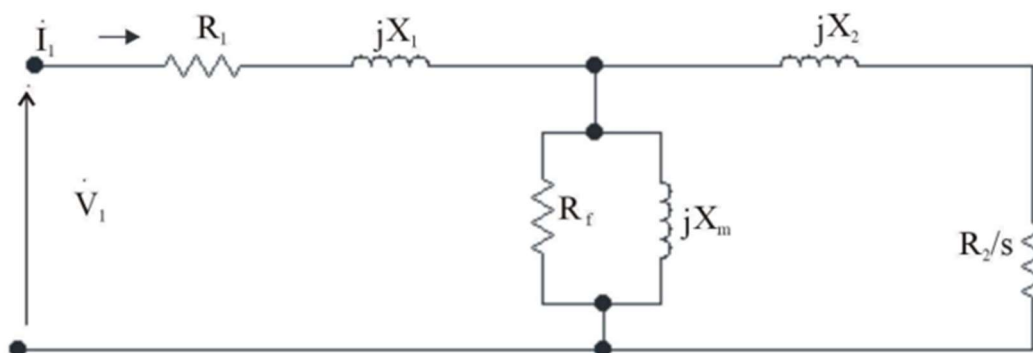
Segundo Martinez (2008), que dedicou um capítulo de sua dissertação para abordar a metodologia MCA, conceitua-se como uma técnica que vem ganhando relevância no mercado desde de 1985 possuindo uma série de teste de baixa tensão para detectar o monitoramento das falhas do motor ou estatores bobinados desenergizados. De forma comparativa ele testa uma bobina (ou fase) contra a outra.

Os testes que essa técnica aborda são: medição de resistência, medição de impedância, medição da indutância, medição do ângulo de fase, medição da resposta de corrente/frequência e medição das resistências de isolamento.

Dentre os resultados ele apresenta uma proporcionalidade da carga elétrica medida que se altera em cada fase limitada de acordo com o circuito do motor, como expõe neste fragmento;

O ensaio considera que a maioria dos motores possui uma distribuição homogênea de 120° elétricos entre as fases da fonte de tensão igualmente possuem uma defasagem de 120° elétricos. Desta forma, em cada fase quando a tensão aumenta, a corrente aumenta proporcional e igualmente em cada fase, e é limitada devido a impedância do circuito do motor, conforme a figura 3.1 (MARTINEZ , 2008 , p.18).

Figura 1 - Modelo de circuito equivalente do motor



Fonte: Adaptado de MARTINEZ (2008)

Onde V_1 representa a tensão fase-neutro do estado, I_1 representa a corrente de fase no estator, R_1 representa a resistência do enrolamento do estator, jX_1 representa a reatância de dispersão do estator, R_f representa a resistência causada pelas perdas no núcleo, jX_m representa a reatância de magnetização, jX_2 representa a reatância de dispersão do rotor e R_2 representa a resistência do rotor e s representa o escorregamento do motor (MARTINEZ , 2008 , p.19).

Em análise das vantagens do método, Martinez (2008), ressalta que os aparelhos modernos que fazem os testes MCA permitem avaliar o circuito sem a interferência externa e o tamanho da máquina testada não afeta na avaliação da carga. Além do aparelho conseguir repetir os testes várias vezes ao longo da vida útil

do maquinário sem causar nenhum efeito adverso nas condições de isolamento. Dentre as falhas apontadas; detecção de contaminação do bobinado, sobreaquecimento de bobinas, curto-circuito nas bobinas.

A falha do curto-circuito nas bobinas o autor Martinez (2008) compara dois métodos.

Um dos pontos chaves do teste MCA é que a medição da indutância não é utilizada como um único método para detecção de curtos-circuitos. Em vez disto, dois parâmetros de medição específicos são utilizados de forma combinada para determinar o tipo e a severidade do defeito. Os parâmetros a serem medidos são: o ângulo de fase do circuito e a redução de corrente como resultado direto da duplicação da frequência aplicando o método de resposta da corrente/frequência (MARTINEZ , 2008 , p.18).

Segundo Martinez (2008) a capacitância efetiva do circuito pode ser afetada quando ocorre um defeito existente nas bobinas afetando diretamente o desempenho entre as tensões e as correntes as quais são relativamente baixas, sendo assim, quando a defeito a capacitância aumenta reduzindo proporcionalmente o ângulo de fase, se a falha estiver em um estágio severo de comprometimento afetará as demais fases.

Entretanto, no segundo método de verificação os curtos circuitos apresentam uma lateralidade com as correntes elétricas

“[...] A corrente é medida em baixa tensão, então a frequência é exatamente duplicada e um percentual de redução na corrente é produzido. Quando a frequência é dobrada, pequenas alterações na capacitância entre espiras ou entre fases são amplificadas causando uma mudança no percentual de redução da corrente quando comparado com as demais fases (MARTINEZ , 2008 , p.18).

Complementando que a consolidação da avaliação das alterações do ângulo de fase e o resultado da constância da corrente possibilita a detecção dos possíveis curtos-circuitos e qual deles em qualquer escala do maquinário, mediante ao estatores e motores. Este cenário se torna propício para a aplicação da técnica MCSA avaliando o impacto da corrente elétrica no motor.

Sobre a técnica MCSA, o autor Martinez (2008), aponta os seguintes aspectos:

A aquisição de dados é feita a partir do painel de força do motor elétrico ou no próprio motor (caso esteja em um almoxarifado ou oficina, por exemplo) e utilizado um coletor para gravação de dados e análise é feita por meio de

software. Configura-se como uma técnica off-line e estática, sendo por vezes classificadas como técnica preventiva e não preditiva (MARTINEZ , 2008 , p.18).

Analisa-se como preventiva pois a técnica off-line não abrange a análise dos maquinários em atividade de uso, colaborando para gestão preventiva nas características e probabilidades de expectativa do uso do motor.

A autora Spamer (2009), conforme mencionado neste tópico, aborda a metodologia MCA e suas demais técnicas através de um histórico de teste em seu estudo, apontando períodos em determinadas áreas do maquinário.

Utiliza a avaliação da tendencia das grandezas medidas, ou seja, periodicamente são registrados os valores para, em seguida, fazer a avaliação das condições atuais e quando é necessária uma possível intervenção (SPAMER,2009,p. 139).

Primeiramente deve-se ter uma constância na observação e mediante aos resultados se parte para a leitura do enrolamento.

Faz-se a leitura do enrolamento de campo, caso seja um motor compound ou shunt, e posteriormente duas leituras da armadura, para que se elimine, ou pelo menos minimize o efeito da contaminação no motor, como por exemplo, por carbono, que pode se manifestar por capacitâncias instáveis entre as espiras, ou entre condutores e terra (SPAMER,2009,p. 140).

Nesta fase de avaliação do motor, se faz necessário normalizar a resistência para que possa testar em análise a temperatura do maquinário.

Na tendência, a resistência deve ser normalizada para valores condizentes com a temperatura ambiente e não deve mudar mais do que 3%. Mudanças na impedância e na indutância as quais não necessitam de correção na temperatura, também não devem variar mais do que 3% entre leituras (SPAMER,2009,p. 140).

Na última fase teste a autora se dedica as falhas detectadas na parte elétrica do motor, permitindo ter dados para uma possível avaliação na MCSA.

A análise de circuito de motores possibilita o diagnóstico de falhas elétricas nos cabos, nas conexões, no estator e no rotor de motores elétricos podendo diagnosticar:

Cabos: diferenças nos comprimentos e rompimentos.

Conexões: Frouxar ou com mau contato

Estator: impregnação ou sobreaquecimento do bobinado,curtos-circuitos internos (entre espiras,entre bobinas de mesma fase diferentes) e curto-circuito de fase para terra.

Rotor: Barras trincadas ou quebradas, porosidade e excentricidade estática (SPAMER,2009,p. 141).

Após períodos de coletas de dados e informações, apresenta-se em quais motores que as técnicas ampliam a avaliação, ponderando as vantagens e desvantagens das mesmas.

A análise de circuito de motores pode ser utilizada em motores de indução como rotor bobinado ou gaiola de esquilo, motores de corrente contínua, motores síncronos e geradores. É importante frisar que a análise de circuito de motores é uma técnica não- destrutiva e pode monitorar motores instalados em áreas e locais de difícil acesso, pois a coleta de dados pode ser feita a partir do painel elétrico de força do motor. (SPAMER,2009,p. 142).

Entende-se como os principais fatores das utilizações da metodologia de análise de circuito de motores o provimento de ser uma técnica não destrutiva e permitir suas aplicações em diferentes cenários de estado do maquinário.

Uma desvantagem é que não permite avaliação do motor em operação. Necessita-se programar a sua realização em manutenções com o motor desligado sendo, por isso, chamada de ensaio estático da máquina (SPAMER,2009,p. 142).

Entretanto temos como desvantagem em uma das técnicas dentro da análise de circuito de motores que se necessita desligar o motor em detrimento da temperatura e de mais fatores externos. Para além a autora frisa uma importância da técnica MCSA.

A análise apropriada dos resultados da aplicação da técnica auxiliara a equipe de manutenção preditiva na identificação de diversos problemas relacionados a componentes eletromecânicos do motor, de sua forma de transmissão e até de sua carga. (SPAMER,2009,p. 142).

Demonstra-se adversidades nos testes partindo das análises e períodos do estado do motor, a fim de manter um histórico dos dados para gestão da manutenção constante deve-se repeti-los.

O autor Barbosa *et.al* (2020), em sua pesquisa dividiu o comparativo dos testes em off-line e online. Dentre os off-line ele executou cinco teste entre eles o MCA, posteriormente três destes com o maquinário online e um deles o MCSA.

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 maquina (sendo mais seguro tambem para o operador, portanto) (BARBOSA et al,2020, p

Mediante ao exposto o autor Barbosa et al (2020) concorda com a autora anterior Spamer (2009), em mencionar a análise de circuito de motores como um método que sobressai os demais pelo comparativo de menor degradação das máquinas comparado ao teste surdo, que consiste na análise e comparação através das formas de ondas causadas pela aplicação de pulsos de tensão entre os enrolamentos da máquina.

Em contraponto, sobre a técnica de análise de corrente de motores (MCSA) temos as seguintes observações.

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 (EFT). A partir de entao é possivel se detectar componentes de frequencia que são indicadores de uma falha ou degradação do motor. Para a situação de curto circuito entre espiras, surgirão componentes nas bandas laterais da frequencia fundamental. (BARBOSA et al,2020, p.5).

Sendo assim, Barbosa et al (2020), ressalta a importância dos somatórios dos resultados coletados na técnica de MCSA de acordo com a sequência dos dados para identificação em números da possível falha na corrente do motor.

Figura 2- Formula Fourier (EFT)

2

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

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.

(2)

Fonte: Adaptado de Barbosa et al (2020)

Figura 3 - Formula Fourier (EFT)

3

$$f_e = f_f \pm k.f_r$$

Onde:

f_r = frequência de rotação (Hz). (3)

Fonte: Adaptado de Barbosa et al (2020)

Após a coleta através da técnica e aplicação da sentença, o autor ressalta a importância de ter profissionais experientes para executá-la pois necessita diferenciar os componentes relacionados ao curto-circuito de componentes relacionadas a excentricidades do rotor.

Somando 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 (BARBOSA et al,2020, p.7).

Suscetível a resultados que afeta a carga do eixo do motor, podendo alterar diretamente a amplitude dos componentes do motor característica está de falha no maquinário.

A autora Pereira (2021), dedica seu estudo a relevância de técnicas de falhas para a manutenção preditiva, direcionando que o aumento da aplicabilidade das mesmas afeta nos resultados assertivos na avaliação dos motores trifásicos da indústria.

A falha, independente da origem (elétrica ou mecânica), pode ainda ocorrer de forma isolada ou em combinação com duas ou mais tipos de falhas, ocasionando serias consequências no motor, tais como: tensões e correntes desbalanceadas: aumento de vibrações: queda do torque médio; aumento das perdas que reduzem o rendimento do equipamento; aumento de temperatura. (PEREIRA,2021,p.31).

As falhas mencionadas por Pereira (2021) também se fazem presentes na pesquisa de Spamer (2009), sendo perceptível que o prognóstico de avaliação do motor tardio destas falhas pode acentuar um possível desgaste elétrico do motor.

O autor Oliveira Filho (2017), compila essas falhas através das técnicas aplicadas em seu estudo.

Tabela 1 - Quadro com resumo de técnicas de manutenção preditiva em motores elétricos

Técnicas	Tipo Motor		Condição		Modos de Falha									
	Média Tensão	Baixa Tensão	On-line	Off-line	Descargas Parciais	Curto entre Espiras	Vibração	Barras Quebradas	Desbalanço de Tensão	Mau Contato - Conexões	Isolação	Excentricidade Entrefeerro	Envelhecimento Térmico	Sobrecarga
Análise de Vibração	X	X	X				X	X				X		
Assinatura de Corrente	X	X	X			X	X	X	X	X	X	X		X
Descargas Parciais	X		X	X	X						X			
Fluxo Magnético	X	X	X			X	X	X	X		X	X		X
FP da Isolação	X			X							X			
Impedância	X	X		X		X				X	X	X	X	
Isolamento Off-line	X	X		X							X			
MCA	X	X				X		X	X	X	X	X		
Medição Tensão e Corrente	X	X	X						X	X				X
Nº Partidas Repetidas	X	X	X										X	X
R. Isolamento	X	X		X							X			
R. Ôhmica	X	X		X		X				X				
Temperatura	X	X	X						X				X	X
Tensão Aplicada	X	X		X							X			
Termografia	X	X	X							X			X	X
Teste de Impulso	X	X		X		X					X			
Ultra-som	X	X	X		X		X	X			X	X		

Fonte: Adaptado de Oliveira Filho, Francisco das Chagas de., 2017.

Dentre as técnicas aplicadas, temos a análise de circuito de motores (MCA) avaliando dois tipos de motores e detectando seis falhas dentre as dez mensuradas, ocasionando em dados que atendam principalmente a manutenção preditiva. O autor Oliveira Filho (2017) utiliza dados da pesquisa de Penrose (2003).

Esta metodologia se aplica aos motores de baixa e média tensão na manutenção de rotina, após rebobinamento ou na colocação em serviço de novas máquinas. Segundo Penrose (2003), 81% dos motores separados em oficinas tem seus bobinados aletrados e a técnica descrita é útil como ferramenta de controle de qualidade. Por outro lado, as bases de dados formadas com os valores dos testes, auxiliam na análise e solução de problemas com motores (Oliveira Filho, 2017, p. 39 apud Penrose, 2003, p. 7).

Ressalta a importância da metodologia MCA (análise de circuito de motor) para prever possíveis paradas do maquinário, e construir uma gestão de qualidade mais efetiva através das técnicas que a metodologia aborda.

Os autores apresentados neste capítulo abordam a análise de circuito de motores como uma metodologia ou técnica em diferentes cenários de aplicações. Na obra de Spamer (2009) é ressaltado a importância da aplicabilidade dos testes em constância e observação mantendo um histórico de avaliações independente do estado em que o motor se encontrava em uso ou não, deve-se comparar as análises em todas as fases para embasar nas decisões da gestão do maquinário.

Em contraponto temos nos estudos de Martinez (2008) o foco e a preocupação na parte elétrica do motor frisando sempre os testes e as avaliações voltados para maquinários de baixa tensão e na proporcionalidade da carga imposta ao motor.

O autor Barbosa et al (2020) se dedica a comparar os testes no estado off-line e on-line, viabilizando a análise dos resultados voltados para o eixo do motor em uso e fora da utilização, para além, ele detalha os testes aplicados em comparativo com a MCA.

Em análise das falhas apresentadas nos testes feitos em motores, o quadro comparativo do autor Oliveira Filho (2021) é um demonstrativo das principais técnicas utilizadas no mercado para gestão de qualidade dos maquinários industriais. É perceptível que os motores de média tensão podem ser testados dentre as dezessete técnicas apresentadas demonstrando um histórico mais amplo de análise, a técnica MCA se destaca avaliando os dois tipos de motores e apresentando seis falhas no total.

A pesquisa de Pereira (2021), colabora com a análise das falhas voltada para manutenção preditiva, viabilizando uma análise de testes com o motor em uso e aplicabilidade da metodologia MCA diferente dos demais autores que ao mencionar a

gestão preventiva do maquinário apresentou uma amplitude maior de resultados na técnica de análise da corrente do motor quando se tratava da parte elétrica do mesmo.

Na técnica de MCSA, é perceptível que os autores abordam a mesma dentro da amplitude do método de análise de correntes de motores (MCA) e mediante da necessidade de compreensão específica de uma falha apresentada no motor. Martinez (2008) reforça a MCSA como uma técnica da manutenção preventiva pela percepção das cargas elétricas como um fator degradante ao motor que necessita ser diagnosticado anterior ao uso do maquinário.

Entretanto, Spamer (2009) ao se tratar da técnica MCSA amplia a análise as partes dos motores abrangendo na perspectiva da falha elétrica, cabo e conexões, estator e rotor. Demonstrando que a técnica é um complemento na amplitude do método MCA, o autor Barbosa et al (2020) colabora com esta análise apresentando a falha de corrente de motores em sequência frequência.

Analisa-se que a metodologia de análise de circuitos de motores (MCA) pode-se ser intitulada como método por abranger várias técnicas de avaliação em motores industriais, para além, a MCSA se faz uma técnica na área elétrica de motores por cumprir testes de avaliativos dos motores em todas as fases. A contribuição de ambas dentro do referencial teórico selecionado neste trabalho se dá na amplitude de etapas em que as mesmas estão inseridas na gestão de qualidade dos maquinários industrial, apontando falhas que não são perceptíveis sem aplicação desses testes de forma continua.

Afim de se aprofundar sobre a temática caberia mais estudos voltados na área tecnológica elétrica dos motores para um aperfeiçoamento maior acerca dos dados coletados, aumentando o dinamismo de detecção das falhas.

3. Metodologia Científica

A metodologia de pesquisa qualitativa com técnica em revisão bibliográfica se demonstra valorativa nos últimos anos, por analisar trabalhos que contribuíram para temática delimitada pelo pesquisador, direcionando os resultados a um levantamento do que foi produzido sobre a temática em um período de tempo.

Como fio condutor na elaboração de um projeto de pesquisa, de teses, dissertações ou mesmo da escrita de um artigo, a revisão de literatura estabelece uma linha de raciocínio que pode guiar a leitura dos pesquisadores, levando-os das premissas às conclusões. É importante enfatizar que a grande pergunta com relação à revisão de literatura é a busca de responder ao seguinte questionamento: o que foi desenvolvido por outros pesquisadores sobre este tema? (DORSA, 2020, p. 682).

Segundo Dorsa (2020), compreende-se a importância de estudar o que foi desenvolvido por outros pesquisadores sobre a temática para ampliar o conhecimento acadêmico acerca da pesquisa delimitada.

Sendo assim, este trabalho se dedicou a seleção de quatorze artigos que tivessem como palavra-chave: motor, MCA, MCSA, corrente elétrica, ensaios elétricos, metodologia, técnicas, maquinário industrial. Dentre elas, os resultados de cinco artigos estão analisados e apresentados no capítulo de referencial teórico como embasamento da hipótese deste estudo.

Na segunda fase do estudo, foi testado uma média de vinte motores de maquinários utilizados na siderurgia no período de três meses. Logo, os dados encontrados na aplicabilidade das ferramentas de análise MCA e MCSA estão confrontados mediante aos artigos delimitados na primeira fase do estudo. Para além, se fez necessário um recorte das obras para atender as características dos motores e identificar os desempenhos das análises mediante as falhas apresentadas em campo.

Com o objetivo de refinamento dos resultados, a técnica de análise de assinatura de corrente elétrica utiliza o Sistema Preditor 4.0 e fornece os dados em espectro, gerando gráficos que ampliaram a possibilidade de inferir os resultados diante aos números apresentados na ferramenta AT34 dentro do método MCA em análise teórica dos trabalhos produzidos nos últimos dez anos na indústria brasileira provenientes do levantamento de produção teórica levantada na primeira fase do estudo.

4. Resultados Obtidos

Os dados que serão apresentados neste capítulo são provenientes de teste feitos nos motores dos maquinários da siderurgia através dos métodos MCA e MCSA. Em média vinte motores foram testados no período de três meses, a frequência é trimestral, todos dentro do cronograma da manutenção preditiva com foco na identificação das falhas dos motores enquanto o maquinário está sendo executado.

A análise de assinatura de corrente elétrica é um método de ensaio energizado, pertencente ao MCSA para inferir resultados. As formas de onda de tensão e corrente de motores de indução trifásicos são capturadas enquanto o motor estiver funcionando, após, um espectro é formado em um software específico (Sistema Preditor 4.0). Com esses dados, é possível detectar falhas relacionadas à energia de entrada, ao circuito de controle, ao motor e as tendências de carga acionada.

A ferramenta AT34 possibilitou a aplicabilidade do método MCA, apresentado números que contribuíram na aplicabilidade do plano de ação para recuperar o equipamento, para além, foram quatro variáveis mediante as três áreas de importância para funcionamento do equipamento.

Metricamente os níveis de severidade foram condicionados a diferença de dB (decibéis). Conforme demonstrativo na tabela 2, de acordo com o nível de decibéis que o equipamento demonstrasse nos testes teria uma ação destinada ao motor com intuito preventivo para que o maquinário não pare a produção.

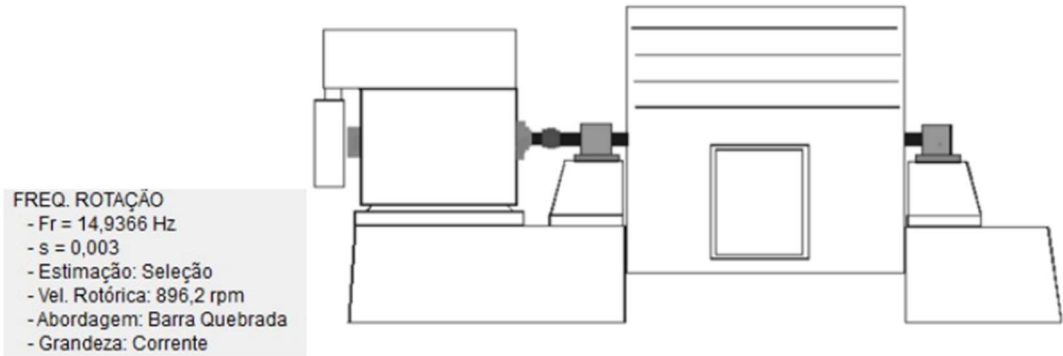
Tabela 2- Níveis de severidade

NÍVEL DE SEVERIDADE		DIFERENÇA DE dB	CONDIÇÃO DO MOTOR	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;	Mudar estado para Atenção
	5	36 – 42	Possibilidade de 1 ou 2 barras trincadas ou quebradas;	Mudar estado para Emergência
	6	30 – 36	Múltiplas barras trincadas ou quebradas;	Reparo
	7	<30	Múltiplas barras trincadas ou quebradas e anel de curto.	Reparo

Fonte: Adaptado Oliveira, Relatório de Assinatura de Corrente Elétrica, 2024.

A estrutura dos equipamentos que foram testados está representado na figura 4, dispondo do eixo central de rolamento.

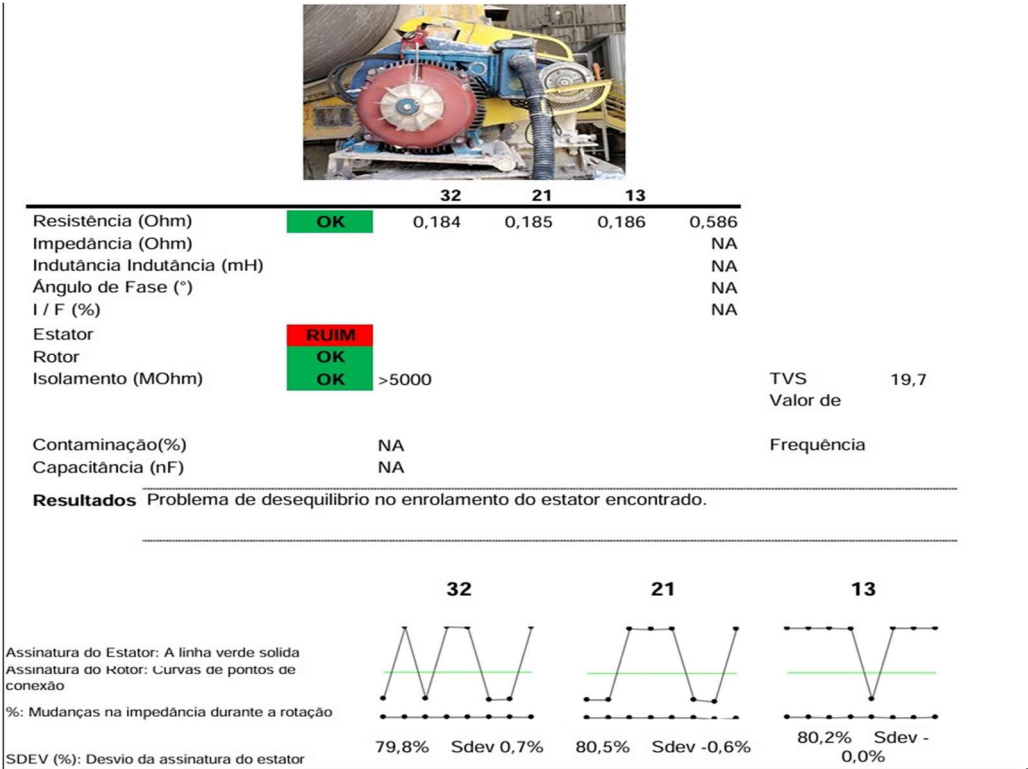
Figura 4-Equipamento



Fonte: Adaptado Oliveira, Relatório de Assinatura de Corrente Elétrica,2024..

O método MCA, abrangeu as peças de rotação e estatores testando principalmente a resistência e impedância. Conforme a figura 5, a ferramenta AT34 demonstra um desempenho ruim do estator no desequilíbrio do seu enrolamento.

Figura 5- Dados coletados na MCA



Fonte: Adaptado Oliveira, Relatório de Assinatura de Corrente Elétrica,2024..

Em contraponto, temos na figura 6, uma coleta sem falhas utilizando as mesmas variáveis e ferramentas de teste.

Figura 6 – Dados coletados na MCA

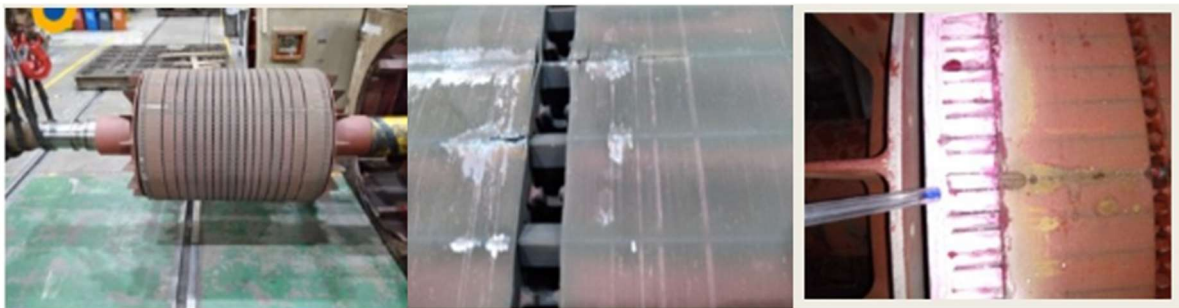
		32	21	13		
Resistência (Ohm)	OK	0,131	0,130	0,130	0,215	
Impedância (Ohm)					NA	
Indutância Indutância (mH)					NA	
Ângulo de Fase (°)					NA	
I / F (%)					NA	
Estator	OK					
Rotor	OK					
Isolamento (MOhm)	OK	>5000			TVS	19,8
					Valor de	
Contaminação(%)	OK	1,01%			Frequência	
Capacitância (nF)		29,8				
Resultados	Enrolamento do Estator Bom					
	Rotor Bom					
Observação	Motor armazenado na tenda da elétrica					

	32	21	13
Assinatura do Estator: A linha verde solida			
Assinatura do Rotor: Curvas de pontos de conexão			
%: Mudanças na impedância durante a rotação	81,3% Sdev - 0,3%	81,1% Sdev -0,0%	80,7% Sdev 0,3%
SDEV (%): Desvio da assinatura do estator			

Fonte: Adaptado Oliveira, Relatório de Assinatura de Corrente Elétrica,2024.

A figura 7 ilustra o estado do rotor do maquinário, demonstrando a degradação das peças por conta do uso que precisam ser reparadas.

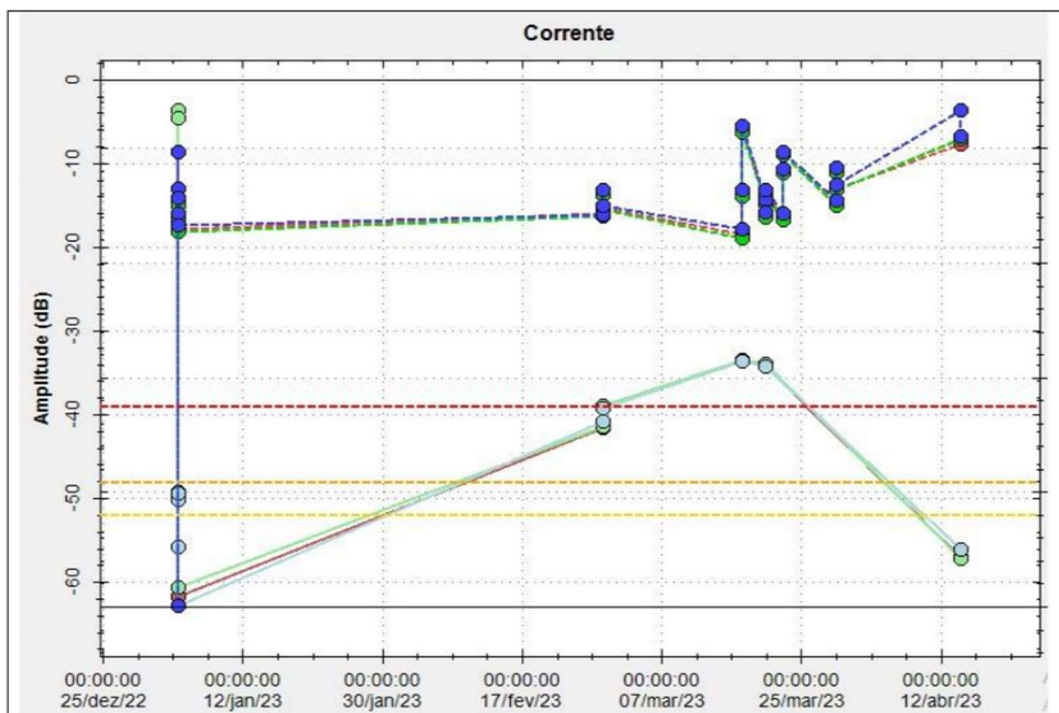
Figura 7 – Partes do maquinário degradadas



Fonte: Adaptado Oliveira, Relatório de Assinatura de Corrente Elétrica,2024.

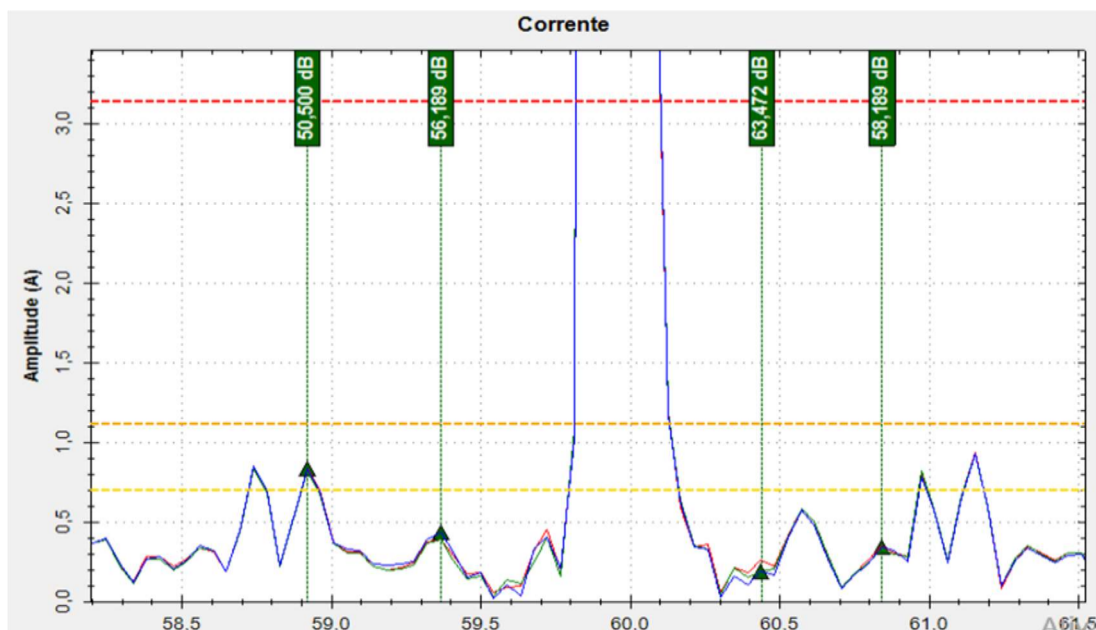
Os gráficos gerados no método MCSA com dados em espectro, compara a frequência da corrente mediante a amplitude em decibéis. No gráfico 1 é demonstrativo da tendência de falhas, no gráfico 2, temos a falha demonstrativa em decibéis e no gráfico 3 demonstra a reparação da falha após a troca e reparação das peças.

Gráfico 1 – Tendência de falhas



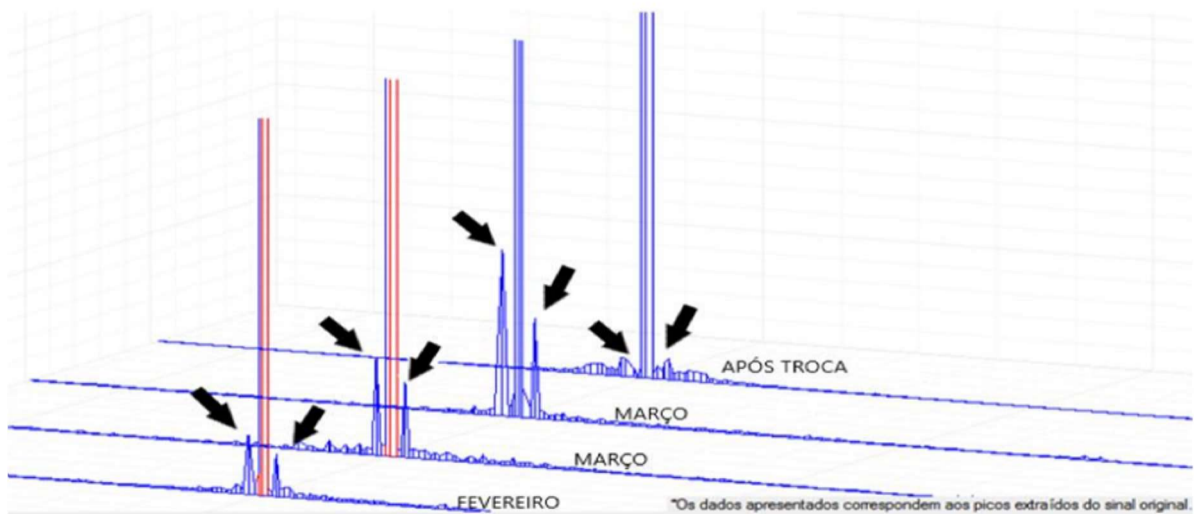
Fonte: Adaptado Oliveira, Relatório de Assinatura de Corrente Elétrica, 2024.

Gráfico 2 – As falhas



Fonte: Adaptado Oliveira, Relatório de Assinatura de Corrente Elétrica, 2024.

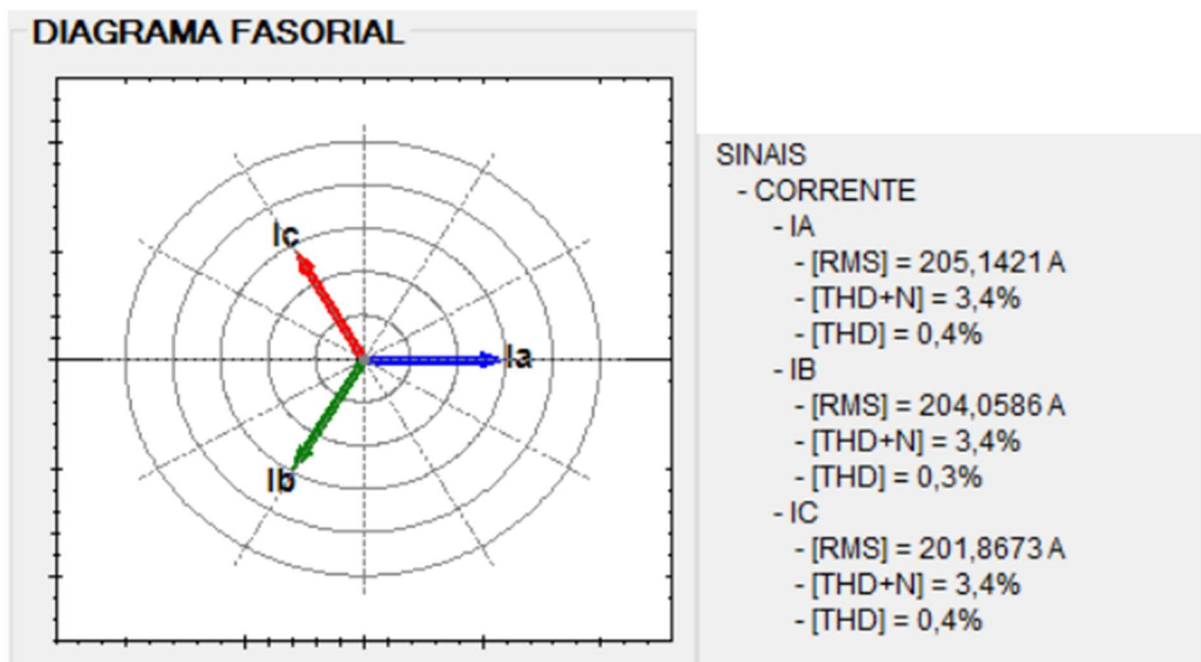
Gráfico 3- Cascata



Fonte: Adaptado Oliveira, Relatório de Assinatura de Corrente Elétrica, 2024.

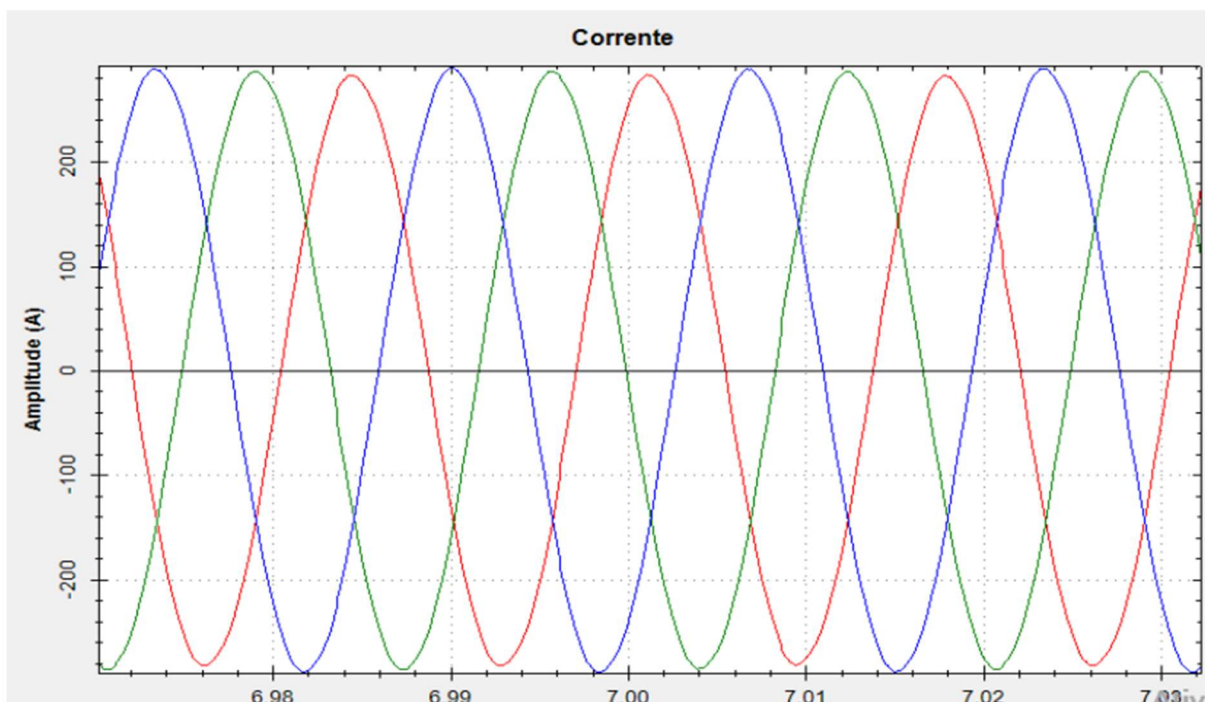
O diagrama fasorial (Figura 7) permite o detalhamento dos vetores radiais, sendo cada um caracterizado como um fasor. O mesmo, possui um numero representativo para analise da magnitude e a fase da onda em que a corrente do motor se encontra no momento do teste. Para além temos o gráfico 4, que demonstra a corrente em ondas.

Figura 8- Diagrama Fasorial



Fonte: Adaptado Oliveira, Relatório de Assinatura de Corrente Elétrica, 2024.

Gráfico 4- Forma de onda



Fonte: Adaptado Oliveira, Relatório de Assinatura de Corrente Elétrica, 2024.

Dentre os vinte equipamentos testados no método MCA e MCSA no período trimestral, dois motores apresentaram falhas, o primeiro foi identificado nos números apresentados na figura 5 (MCA) demonstrando um desequilíbrio no enrolamento do estator, coletas feitas pela ferramenta AT34. Logo, com o reparo realizado e o teste refeito conforme a figura 6 tivemos a estabilidade do enrolamento retomada e não agravamento do maquinário proveniente desta falha. Sendo assim, a produção se manteve sem necessidade da troca completa do maquinário.

A segunda falha foi detectada no método MCSA, coletada pela ferramenta Sistema Preditor 4.0, focado na corrente elétrica do motor, conforme o gráfico 2, após a substituição do motor EX-004 que apresentava falha de barra quebrada, realizamos nova medição no motor em operação, foi constatado um nível de severidade “bom” conforme a tabela 2.

Segundo Spamer (2009), a frequência de monitoramento trimestral do motor conforme foi aplicado na prática com a amostra de vinte maquinários, dando em média quatro teste anualmente, mesmo trazendo uma porcentagem de falhas inferior a um terço da amostragem. Se faz necessário para construção do histórico de funcionamento do motor para embasar a análise de gestão do maquinário na indústria conforme é demonstrativo em sua obra.

Para além, Spamer (2009), enfatiza a prioridade da MCSA está presente no plano de gestão do maquinário em conjunto da MCA para o melhor panorama elétrico do motor e conforme seus estudos as maiores das perspectivas de falha se encontram nos cabos de conexões, estator e rotor. Que se fez presente na segunda etapa deste estudo.

A frequência apresentada em decibéis, muitas vezes imperceptível sem a utilização dos equipamentos de detecção. Se apresenta na obra de Martinez (2008), mediante a baixa tensão e na proporcionalidade da carga imposta ao motor, norteador a segunda fase deste estudo na aplicabilidade dos testes MCSA com o maquinário em produção efetiva para dados mais reais sobre a atual situação do motor na produção. Existindo a possibilidade de não detecção das falhas nos dois motores se os mesmos estivessem off-line.

5. Conclusão

Este trabalho se dedicou ao levantamento de referenciais teóricos que perpassasse os temas; confiabilidade dos equipamentos, avaliação da vida útil, avaliar o estado do equipamento mesmo enquanto está ligado de forma não invasiva. Com intuito de compreender a contribuição da MCA e MCS nos diagnósticos de falhas elétricas em motores industriais.

A priori, é importante ressaltar a deficiência de estudos dedicados a esta área no Brasil, a escassez de referencial teórico se fez necessário abranger o recorte inicial delimitado. Após este levantamento tivemos quatorze artigos selecionados, dentre eles; dez mencionava as duas metodologias (MCA e MCSA), cinco comparava os mesmos dentro da gestão preditiva. Sendo estes, aprofundados no capítulo de referências teóricas por abrangerem as duas análises através de testes atendendo o objetivo de aprofundar sobre a contribuição dessas metodologias na gestão do maquinário industrial no Brasil.

Na segunda etapa deste estudo, se fez importante o refinamento dos dados mediante aos estudos analisados para que a comparativa dos mesmos fosse representativa na relevância dos métodos MCA e MCSA. Direcionando o foco nas obras de Spamer (2009) e Martinez (2008) por terem dados fornecidos por mais de uma técnica dentro dos dois métodos além da aplicabilidade dos testes no maquinário em plena produção. Trazendo um panorama representativo e relevante da utilização dos métodos na área elétrica dos motores industriais.

Conclui-se que mediante ao mercado competitivo industrial e a alta demanda de crescimento da siderurgia no Brasil, os métodos MCA e MCSA, contribuem na gestão da manutenção do maquinário em dois principais aspectos: primeiramente na identificação das falhas antes da parada do motor o que otimiza a continuidade da produção evitando perdas de custos em diversos aspectos de investimento industrial; como a diminuição da troca de equipamentos quebrados aumentando a vida útil dos mesmo pelo fato da manutenção ser efetiva. Em segundo plano a eficácia comparativa dos dados quando a MCSA esta alinhada com a MCA, os estudos que utilizaram os métodos de forma isolada tiveram seus resultados de forma delimitada comparada a parcela de artigos que apresentaram os dois métodos de análise. Assim sendo, a gestão de manutenção de motores que estiver alinhada com a MCA e MCSA possui a probabilidade de se evidenciar na indústria brasileira.

6. Referências Bibliográficas

BARBOSA, Luiz Henrique Arantes *et al.* **Teste para Prognósticos de Falhas em Motores de Indução: Discussão Teórica e Estudo de Caso.** 2020. Artigo (Pós graduação) - Universidade Federal de Uberlândia, [S. l.], 2020.

BONALDI, E.L. **Manutenção Preditiva em Motores de Indução Trifásicos através do Espectro de Corrente do Estator.** Dissertação de Mestrado, Escola Federal de Engenharia Itajubá, 2002.

CARVALHO, Geraldo. Máquinas Elétricas Teoria e Ensaio. 3. ed. Érica, 2007.
CREDER, Hélio. Instalações Elétricas. 16. ed. LTC, 2016. FILHO, João Mamede. Instalações Elétricas Industriais. 9. ed. LTC, 2017

DORSA, Arlinda Cantero. **O papel da revisão da literatura na escrita de artigos científicos.** INTERAÇÕES, Campo Grande, MS, v. 21, n. 4, out./dez. 2020.

IBGE, Instituto Brasileiro De Geografia E Estatística. **Índice das indústrias no Brasil.** Brasília, DF: IBGE, 2023.

FARACO, R.A.L. **Deteção de Falhas Elétricas em Motores de Indução Utilizando Redes Neurais.** Belo Horizonte, 2000. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica)- Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais.

MAMEDE FILHO, João. **Instalações elétricas industriais.** 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2015.

MARTINEZ, André Marcel Pereira. **Estudo de métodos de detecção De Curto-Circuito Entre Espiras Em Estatores De Motores De Indução Trifásicos De Baixa Tensão.** 2008. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica., [S. l.], 2008.

MATHIAS, Mauro Hugo. **Ferramentas de diagnóstico de máquinas.** Programa de pós graduação. Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Guaratinguetá, São Paulo, 2012.

MIRSHAWKA, Victor. **Manutenção Preditiva-Caminho para zero defeitos,** Ed. McGrawHill. São Paulo, 1991.

OLIVEIRA FILHO, Francisco das Chagas de. **Sistema de aquisição de dados para monitoramento e predição de falhas em motores elétricos**.2017. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal da Bahia.

OLIVEIRA, Wanderson. **Relatório de Assinatura de Corrente Elétrica**. Gerência de Engenharia, Manutenção e Utilidades,2024.

PEREIRA, Klariman Yasmin da Silva. **Diagnóstico de falhas elétricas em motores de indução trifásico utilizando método de análise de vibração e análise do espectro de corrente**. 2021. Conclusão de curso (Graduação) - FACULDADE DE ENGENHARIAS, ARQUITETURA E URBANISMO E GEOGRAFIA, [S. /], 2021.

PINHEIRO, Hélio Henrique Cunha. **Sistema para detecção e diagnóstico de falhas em motores elétricos de indução utilizando lógica fuzzy**. 2011. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

SIQUEIRA, IP. **Manutenção Centrada na Confiabilidade: manual de implementação**, Ed. Qualitymark.Rio de Janeiro,2005.

SPAMER, Fernanda Rosa. **Técnicas preditivas de manutenção de máquinas rotativas**. 2009. Trabalho de conclusão de graduação (Graduação) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, [S. /], 2009