



Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica Associação ampla UFSJ/CEFET-MG

Análise orbital do *Full Spectrum* de fluxo de dispersão para detecção de falha em motores de indução

Ana Carolina Santos Araújo

Orientador: Paulo Cezar Monteiro Lamim Filho

São João del-Rei, 25 de junho de 2021





Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica Associação ampla UFSJ/CEFET-MG

Análise orbital do *Full Spectrum* de fluxo de dispersão para detecção de falha em motores de indução

Ana Carolina Santos Araújo

Dissertação apresentada à banca examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, associação ampla entre a Universidade Federal de São João del-Rei e o Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Paulo Cezar Monteiro Lamim Filho

São João del-Rei, 25 de junho de 2021

Ficha catalográfica elaborada pela Divisão de Biblioteca (DIBIB) e Núcleo de Tecnologia da Informação (NTINF) da UFSJ, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Araújo, Ana Carolina Santos.
Análise orbital do Full Spectrum de fluxo de dispersão para detecção de falha em motores de indução / Ana Carolina Santos Araújo ; orientador Paulo Cezar Monteiro Lamim Filho. -- São João del-Rei, 2021.
72 p.
Dissertação (Mestrado - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica) -- Universidade Federal de São João del-Rei, 2021.
1. Full Spectrum. 2. Detecção de falha. 3. Análise de fluxo. 4. Motor de indução. I. Cezar Monteiro Lamim Filho, Paulo, orient. II. Título.



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO JOÃO DEL REI PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA



Ana Carolina Santos Araújo

Análise orbital do *Full Spectrum* de fluxo de dispersão para detecção de falha em motores de indução

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica -Associação Ampla entre a Universidade Federal de São João del-Rei e o Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – em 25 de junho de 2021 como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica, aprovada pela Banca Examinadora constituída pelos Professores.

> Prof. Dr. Paulo Cezar Monteiro Lamim Filho Universidade Federal de São João del-Rei

> Prof. Dr. Alexandre Luiz Amarante Mesquita Universidade Federal do Pará

Prof. Dr. Fabiano Bianchini Batista Universidade Federal de São João del-Rei

Prof.^a Dr.^a Lane Maria Rabelo Universidade Federal de São João del-Rei

Dedico esta dissertação a minha família e a todas pessoas que me apoiaram nessa etapa.

Agradecimentos

Uma importante etapa se conclui. Não foi fácil, mas teria sido impossível sem Deus. Dele vem tudo o que sei, tenho e sou. Assim, agradeço primeiramente a Ele, que me deu o dom da vida e me abençoa todos os dias com o seu amor infinito.

Aos meus pais, Marcio Hallack Araújo e Ana Maria dos Santos Araújo, o meu muito obrigada por serem meus exemplos de vida, humildade e caráter. Além da minha eterna gratidão por incentivarem desde minha infância na busca pelo conhecimento. Agradecimentos também ao meu irmão, pelo incentivo e apoio ao longo dos meus dias.

Meus sinceros agradecimentos aos meus professores pelo aprendizado e legado deixado em minha vida e especialmente ao meu orientador Prof. Dr. Paulo Cezar Monteiro Lamim Filho pela paciência, pela dedicação, pelas valiosas sugestões ao longo deste trabalho e principalmente pela confiança. Da mesma forma à Prof.^a Dr.^a Lane Rabelo e ao Prof. Dr. Fabiano Batista pelas significativas contribuições nessa minha trajetória.

Também sou imensamente grata à Universidade Federal de São João del-Rei e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica pela oportunidade concedida, e à CAPES, CNPq, FAPEMIG e INERGE pelo apoio financeiro ao longo dos anos.

Aos meus amigos eu deixo uma palavra de gratidão por todo apoio, carinho e companheirismo ao longo de todo caminho. Agradeço também aos colegas do Laboratório de Máquinas e Transformadores, por compartilhar momentos de conhecimentos e de alegrias. Por fim, mas não menos importante, a todos que colaboraram, torceram e vibram comigo essa vitória, meus sinceros agradecimentos.

"E Jesus, olhando para eles, disse-lhes: Aos homens é isso impossível, mas a Deus tudo é possível."

Mateus 19:26

Resumo

O motor de indução é um equipamento essencial no setor industrial. Visto tal importância do papel desempenhado, o setor de manutenção busca por disponibilidade e confiabilidade nestes componentes. Assim, várias configurações de sensores foram propostas, nas últimas décadas, para medir vibração, temperatura, corrente elétrica e fluxo magnético nessas máquinas elétricas. Dentre as quais têm destaque, a busca pelo mais adequado posicionamento de bobinas de fluxo somada às técnicas de processamento de sinais que se sobressai por extrair informações significativas para o diagnóstico de falhas em motores de indução. Recentemente, pesquisas abriram a possibilidade de obter simultaneamente sinais de fluxo magnético deslocados aproximadamente 90° no tempo. Isso torna possível correlacionar o fluxo magnético de dispersão de diferentes transdutores. Nesse cenário, a técnica do Full Spectrum, amplamente utilizada para sinais de vibração, pode se tornar também uma ferramenta útil para exibir a relação entre diferentes componentes de fluxo magnético no domínio da frequência. Portanto, este trabalho propõe a análise das órbitas filtradas e modificadas, obtidas através do algoritmo Full Spectrum para interpretação dos sinais de fluxo magnético com o motor de indução funcionando com falha de baixa isolação entre espira ou de desequilíbrio de tensão, em três porcentagens de cargas diferentes. Os resultados experimentais mostraram a viabilidade da aplicação da técnica e possibilitaram a identificação da severidade da baixa isolação, bem como a distinção das falhas estudadas.

Palavras-chave: Full Spectrum, detecção de falha, análise de fluxo, motor de indução.

Abstract

Induction motors are widely used in the industry sector, thereby the maintenance sector seeks availability and reliability in this equipment. So, several sensor configurations have been proposed over the past few years for measuring vibration, temperature, electric current and magnetic flux in electrical machines. Among which, the search for the best positioning of flux coils added to the signal processing techniques stands out for extracting significant information for fault diagnosis in induction motors. Recent research has opened the possibility of simultaneously obtaining magnetic flux signals displaced approximately 90° in time. This makes it possible to correlate the stray magnetic flux from different transducers. In this scenario, the Full Spectrum technique, widely used for vibration signals, can become a useful tool for displaying the relationship between different magnetic flux components in the frequency domain. Taking this into account, this work proposes the use of the filtered orbit, modified and obtained from the Full Spectrum, for interpreting the magnetic flux signals. This was done for the motor working under inter turn short circuits or unbalanced voltage fault conditions at different loads. The experimental results showed the viability of the application of the technique and made it possible to identify the severity, as well as the distinction of the faults studied.

Keywords: Full Spectrum, fault diagnosis, flux analysis, three-phase induction motor.

Lista de Figura

1.1 Tipos de falhas no Motor de Indução, segundo Batista <i>et al</i> . (2016)
2.1 Classificação das falhas em motores de indução
2.2 Tipos de curto-circuito no motor de indução
2.3 Representação da direção do fluxo de dispersão proveniente do motor, adaptado de
Santos (2020)
2.4 Algoritmo matemático do Full Spectrum. Adaptado de Goldman e Muszynska (1999)14
2.5 Órbita obtida pela técnica Full Spectrum clássica
2.6 <i>Full Spectrum</i> com suas corresponde órbitas na frequência de um harmônico $\omega_n \dots 16$
3.1 Fluxograma do <i>Full Spectrum</i> para os sinas de FEM
3.2 Representação das correntes de estator nos sistemas de eixos abc e dq 21
3.3 Fluxograma do <i>Full Spectrum</i> para os sinais de corrente
3.4 Fluxograma da Análise Espectral para os sinais de FEM
3.5 Bancada de Teste
3.6 Sensor de Fluxo
3.7 Diagrama dos enrolamentos de estator, adaptado de Santos (2020). T1-T6 são os
terminais das bobinas das três fases. A fase A está representada em azul, a fase B em cinza
e a fase C em vermelho
3.8 Parâmetros numérico extraídos das orbitas
4.1 Full Spectrum médio do sinal de fluxo com o motor operando com 50% da carga
nominal

4.2 Órbitas médias do sinal de fluxo 100% da carga nominal: (a) na frequência de 180 Hz; (b)
na frequência de 420 Hz
4.3 Representação gráfica do parâmetro a dos sinais FEM para a condição de 100% de
carga
4.4 Órbitas médias do sinal de fluxo 50% da carga nominal: (a) na frequência de 180 Hz; (b)
na frequência de 420 Hz
4.5 Representação gráfica do parâmetro a dos sinais FEM para a condição de 50% de
carga
4.6 Órbitas médias do sinal de fluxo 0% da carga nominal: (a) na frequência de 180 Hz; (b) na
frequência de 420 Hz
4.7 Representação gráfica do parâmetro a dos sinais FEM para a condição de 0% de
carga
4.8 Full Spectrum do sinal de corrente com o motor operando com 50% da carga nominal35
4.9 Órbitas médias do sinal de corrente 100% da carga nominal: (a) na frequência de 180 Hz;
(b) na frequência de 420 Hz
4.10 Representação gráfica do parâmetro <i>a</i> dos sinais de corrente para a condição de 100%
de carga
4.11 Órbitas médias do sinal de corrente 50% da carga nominal: (a) na frequência de 180 Hz
(b) na frequência de 420 Hz
4.12 Representação gráfica do parâmetro <i>a</i> dos sinais de corrente para a condição de 50%
de carga
4.13 Órbitas médias do sinal de corrente 0% da carga nominal: (a) na frequência de 180 Hz;
(b) na frequência de 420 Hz
4.14 Representação gráfica do parâmetro a dos sinais de corrente para a condição de 0% de
carga
4.15 Variação do parâmetro a das órbitas dos sinais FEM e de corrente operando a 100% de
carga, na frequência de 180 Hz

4.16 Variação do parâmetro a das órbitas dos sinais FEM e de corrente operando a 100% de
carga, na frequência de 420 Hz
4.17 Variação do parâmetro <i>a</i> das órbitas dos sinais FEM e de corrente operando a 50% de
carga, na frequência de 180 Hz
4.18 Variação do parâmetro <i>a</i> das órbitas dos sinais FEM e de corrente operando a 50% de
carga, na frequência de 420 Hz
4.19 Variação do parâmetro <i>a</i> das órbitas dos sinais FEM e de corrente operando a 0% de
carga, na frequência de 180 Hz
4.20 Variação do parâmetro <i>a</i> das órbitas dos sinais FEM e de corrente operando a 0% de
carga, na frequência de 420 Hz
4.21 Espectro médio do sinal de fluxo com o motor operando com 100% da carga nominal. 43
4.22 Espectro médio do sinal de corrente com o motor operando com 100% da carga
nominal

Lista de Tabela

4.1 Parâmetros numéricos dos sinais FEM para a operação em 100% de carga 31
4.2 Parâmetros numéricos dos sinais FEM para a operação em 50% de carga
4.3 Parâmetros numéricos dos sinais FEM para a operação em 0% de carga
4.4 Parâmetros numéricos dos sinais de corrente para a operação em 100% de carga36
4.5 Parâmetros numéricos dos sinais de corrente para a operação em 50% de carga38
4.6 Parâmetros numéricos dos sinais de corrente para a operação em 0% de carga

Lista de Abreviações

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CA	Corrente alternada
СС	Corrente contínua
CEFET-MG	Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais
CNPq	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
FAPEMIG	Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais
FEM	Força eletromotriz
FFS	Fluxo Full Spectrum
FFT	Transformada Rápida de Fourier (Fast Fourier Transform)
IEEE	Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos
INERGE	Instituto Nacional de Energia Elétrica
LAMET	Laboratório de Máquinas e Transformadores
MCSA	Análise de Assinatura da Corrente do Motor (Motor Current Signature Analysis)
MIT	Motor de indução trifásico
SDI	Método de Indicie de Forma e Diretividade (Shape and Directivity Index)
SFSA	Analise da Assinatura do Fluxo de Dispersão (Stray Flux Signature Analysis)
UFSJ	Universidade Federal de São João del-Rei

Lista de Símbolos

- α_n fase da entrada direta
- β_n fase da entrada em quadratura
- ω_n frequência de um harmônico
- ψ fluxo total concatenado
- θ ângulo entre o sistema de eixos dq e abc.
- Φ deslocamento espacial entre as bobinas do sensor de fluxo de dispersão
- 3BI baixa isolação entre três espiras
- 6BI baixa isolação entre seis espiras
- 9BI baixa isolação entre nove espiras
- AH anti-horário
- *a* parâmetro comparativo da área da orbita saudável e com defeito
- DT desequilíbrio de tensão
- *h* raio horizontal da orbita
- H horário
- i_q corrente de eixo quadratura
- id corrente de eixo direto
- i_a , i_b e i_c correntes de fase

L	indutância		
n	número inteiro positivo		
Ν	número de amostras		
R _{wn+}	amplitude direta		
R ωn-	amplitude reversa		
t [n]	tempo		
V	raio vertical da orbita		
\bar{V}_{abc}	média das tensões eficazes de fase,		
<i>V_a, V_b e V_c</i> tensões de fase trifásicas			
x [n]	sinal discreto direto		
Xn	amplitude FFT do sinal discreto direto		
y [n]	sinal discreto em quadratura		

Y_n amplitude FFT do sinal discreto em quadratura

Sumário

1 Introdução	1
1.1 Considerações Gerais	1
1.2 Objetivo	4
1.3 Organização do Trabalho	4
2 Fundamentos Teóricos	5
2.1 Filosofias de manutenção	5
2.1.1 Manutenção corretiva	5
2.1.2 Manutenção preventiva	6
2.1.2 Manutenção preditiva	6
2.2 Tipos de Falhas	7
2.2.2 Curto – circuito	8
2.2.1 Desequilíbrio de tensão	10
2.3 Técnicas de detecção de falhas	11
2.4 Full Spectrum	14
3 Metodologia	19
3.1 Descrição do método proposto	19
3.2 Teste Experimental	23
3.3 Falhas estudadas	24
3.3.1 Baixa isolação entre espiras	25
3.3.2 Desequilíbrio de tensão	25

Referências Bibliográficas	49
5.3 Trabalhos Futuros	47
5.2 Trabalhos Publicados	47
5.1 Considerações Finais	46
5 Conclusão	46
4.6 Análise do espectro médio	43
4.5 Órbitas médias de fluxo vs. corrente	40
4.4 Orbitas sinais de corrente	36
4.3 <i>Full Spectrum</i> médio dos sinais de corrente	35
4.2 Órbitas Médias dos sinais de Fluxo	29
4.1 <i>Full Spectrum</i> médio dos sinais de fluxo	28
4 Resultados	28
3.4 Parâmetro Numérico	26

CAPÍTULO 1

Introdução

1.1 Considerações Gerais

As máquinas elétricas estão amplamente empregadas em diversos ambientes desempenhando diferentes funções. No setor industrial, os motores de indução trifásico (MIT) são os mais utilizados dentre essas máquinas (Eftekari *et al.*, 2014). Estes são responsáveis por aproximadamente 95% dos equipamentos situados na indústria, com um consumo energético de certa de 40% a 50% do montante de máquinas instalados neste ambiente (Ibrahim *et al.*, 2018). A presença significativa do motor de indução se deve a sua característica de robustez, versatilidade e seu baixo custo de aquisição e manutenção quando comparado com outros tipos de motores (Zaparoli *et al.*, 2020).

No entanto, em razão desses equipamentos operarem frequentemente em ambientes complexos e severos (Huo *et al.*, 2020) é comum o aparecimento de falhas elétricas ou mecânicas. De acordo com Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos (IEEE), dentre as falhas que podem ocorrer no motor de indução, as no rolamento são as mais assíduas, representando cerca de 44% de todas ocorrências; na sequência, as falhas relacionadas ao estator representam 26% dos casos; em seguida, as falhas de barras quebradas com 8% e os 22% restantes estão associados a outros tipos de falhas. Como pode ser visualizado graficamente na Figura 1.1.



Figura 1.1 – Tipos de falhas no Motor de Indução, segundo IEEE (1998).

A existência de falhas nos motores de indução causa, claramente, mudanças no desempenho da máquina e sua detecção no estágio inicial pode trazer um grande benefício não apenas por diminuir os custos da manutenção, mas também por reduzir a perda da produtividade no ambiente onde a máquina está instalada (da Silva *et al.*, 2008; Xu *et al.*, 2019). Desta forma, diversas soluções têm despertado o interesse de pesquisadores e profissionais desse setor. Novas tecnologias neste campo têm sido desenvolvidas para melhorar o desempenho dessas máquinas e, além disso, recentemente, foram propostos diversos estudos sobre métodos de diagnóstico de falhas em motores de indução (Zaparoli *et al.*, 2020; Cherif *et al.* 2020; Çira *et al.*, 2016; Baccarini *et al.*, 2013; Gyftakis *et al.*, 2020).

Atualmente, a Análise de Assinatura da Corrente do Motor (MCSA - *Motor Current Signature Analysis*) e a Análise de Vibração, são duas técnicas amplamente utilizadas em plantas industriais e extensivamente exploradas em pesquisas. Estas apresentam algumas vantagens como, por exemplo, a simplicidade da medição dessas grandezas (Park *et al.*, 2017). No entanto, o bom desempenho dessas duas técnicas tem suas limitações tais como a característica construtiva e porcentagem de carga do motor (Afrizal e Ferrero, 2020; Malekpour *et al.*, 2017; Cusido *et al.*, 2005).

Um outro método que tem ganhado espaço na área de detecção de falha em motores de indução nas mais diversas condições de operação e independentemente de suas características construtivas é o da Análise da Assinatura do Fluxo de Dispersão (SFSA - *Stray Flux Signature Analysis*) (Panagiotou *et al.*, 2019). A SFSA compreende em estudar os sinais de força eletromotriz (FEM) induzidos pelo fluxo de dispersão em bobinas localizadas na proximidade do motor, que são correlacionados à variação do fluxo magnético ao longo do tempo (Santos, 2020). A eficiência dessa técnica de diagnóstico de falhas usando esses sinais foi comprovada para vários tipos de falhas (Lamim Filho *et al.*, 2020; Salah *et al.*, 2014; Frosini *et al.*, 2015; Henao *et al.*, 2003; Cuevas *et al.*, 2016; Iglesias-Martinez *et al.*, 2019), e é ainda melhor do que MCSA em alguns casos (Ramirez-Nunez *et al.*, 2018). Além disso, a SFSA é um método de monitoramento de baixo custo e de natureza não invasiva (Lamim Filho *et al.*, 2020; Cuevas *et al.*, 2016).

Assim, as variáveis corrente, vibração e fluxo de dispersão presentes nas máquinas podem ser analisadas no domínio do tempo e/ou frequência (Huang *et al.*, 2020). Grande número de métodos de monitoramento e diagnóstico da condição do comportamento do motor de indução baseia-se na análise do espectro de frequências, resultado da aplicação da Transformada Rápida de Fourier (FFT - *Fast Fourier Transform*) nos sinais no domínio do tempo de corrente, vibração e fluxo magnético (Batista *et al.*, 2016; Park *et al.*, 2019; Lamim Filho *et al.*, 2014). A análise do espectro tradicional é baseada na comparação entre o

espectro saudável e o de falha na frequência característica da falha (Geetha e Nagarajan, 2018). Uma das extensões da análise espectral é o método *Full Spectrum*, que foi desenvolvido nas últimas duas décadas. Em contraste a análise do espectro tradicional, esta ferramenta usa a correlação de dois sinais coletados simultaneamente de sensores situados perpendicularmente à máquina (Goldman e Muszynska, 1999).

O método *Full Spectrum* foi inicialmente proposto para diagnosticar falhas em máquinas usando sinais de vibração e foi validado para uma vasta gama de falhas causadas por irregularidades mecânicas, elétricas ou magnéticas (Goldman e Musynska,1999; Rao e Tiwari, 2020; Tůma e Biloš, 2007; Bachschmid *et al.* 2004; Kumar *et al.* 2015; Shravankumar e Tiwari, 2016; Darpe e Patel, 2011). No entanto, há uma certa complexidade no estudo de vibrações. O monitoramento da condição do motor de indução usando sinais de vibração ter como desvantagens a sensibilidade relacionada a fixação dos sensores e ruídos associados a qualquer excitação externa (Kumar *et al.*, 2015).

Na busca por obter a melhor relação falha / sinal, vários autores propuseram diversas configurações e posições de fixação de sensores de fluxo magnético em diferentes pontos ao redor do motor. Nesse contexto, Lamim Filho *et al.* (2020) apresentaram um novo sensor de fluxo de dispersão axial composto por duas bobinas independentes localizadas no lado interno da placa da extremidade traseira do MIT. Esta nova configuração de sensor mede, com alta confiabilidade, sensibilidade e repetibilidade, dois sinais de fluxo de dispersão, defasados em \pm 90 ° no tempo. A partir da criação desse sensor, a técnica *Full Spectrum* pode se tornar uma ferramenta útil para exibir a relação entre diferentes componentes de fluxo magnético no domínio da frequência.

O *Full Spectrum* permite que informações mais significativas sejam extraídas por meio do espectro complexo obtido pela FFT aplicada a dois sinais de fluxo de dispersão aquisitados partir de duas bobinas situadas perpendicularmente na máquina. Portanto, a análise tradicional da FFT sozinha não é capaz de fornecer os dados para construir as órbitas. Já o *Full Spectrum* possibilita obter as órbitas através de seu gráfico que contém os componentes de frequência direta e reversa ao longo do seu eixo (Goldman e Musynska,1999). Consequentemente, esta ferramenta de processamento de sinais pode ser vista como o "espectro de uma órbita", permitindo assim, identificar características das órbitas que, de outra maneira, não estariam evidentes no espectro tradicional.

A clássica técnica *Full Spectrum* necessita dos ângulos de fase e magnitudes da resposta direta e reversa para construir uma órbita. Porém, há uma possibilidade de se utilizar uma órbita filtrada e modificada o que torna a construção mais simples e os resultados mais

fáceis de interpretar. Nessa nova órbita não necessita usar os ângulos de fase dos componentes direto e reverso, como anteriormente.

O presente trabalho tem por finalidade propor uma nova técnica denominada Fluxo *Full Spectrum* (FFS) para monitoramento e diagnóstico de falhas de baixa isolação e desequilíbrio de tensão em motores de indução. Este novo método tem como base a análise da órbita, modificada e filtrada, obtida através da aplicação do algoritmo *Full Spectrum* em pares de sinais coletados por um sensor de fluxo de dispersão axial. Assim, a técnica proposta permite analisar as órbitas no domínio da frequência. Para facilitar esta análise, é adotado um parâmetro numérico comparativo criado a partir das áreas das órbitas para condições defeituosa e sem falha. Também considerando como indicador de falha, o sentido de rotação dessas órbitas

1.2 Objetivo

O objetivo desta dissertação é propor uma original aplicação do algoritmo *Full Spectrum* em sinais de fluxo de dispersão para detecção de falha em motores de indução através da análise das orbitas filtradas e modificadas, designada Fluxo *Full Spectrum* (FFS).

1.3 Organização do Trabalho

Este trabalho está organizado em cinco capítulos. No capítulo 2, realiza-se uma descrição sobre os conceitos associado à manutenção tendo como foco os motores de indução trifásicos, bem como os tipos de falhas que serão estudadas neste equipamento. Também é feita uma breve revisão literária tratando do diagnóstico de falhas por meio da Análise da Assinatura de Corrente Elétrica e da Análise da Assinatura do Fluxo de Dispersão. No capítulo 3, a metodologia, por sua vez, foi descrita detalhando as condições dos testes experimentais realizados. No capítulo 4, são analisados os resultados obtidos dos ensaios práticos realizados em laboratório. Por fim, no capítulo 5, são apresentadas as conclusões, as contribuições deste trabalho e as recomendações para estudos futuros.

CAPÍTULO 2

Fundamentos Teóricos

2.1 Filosofias de manutenção

O termo manutenção pode ser definido como a combinação de todas as ações técnicas, de gestão e administrativas, durante a vida útil de um equipamento, com objetivo de mantê-lo ou repô-lo numa condição em que este possa desempenhar a função atribuída (IPQ, 2007). As atividades e estratégias de manutenção podem ser divididas em três principais filosofias:

- manutenção corretiva;
- manutenção preventiva;
- manutenção preditiva.

Nesta seção é apresentada uma abordagem sobre cada tipo de manutenção com foco os motores de indução.

2.1.1 Manutenção corretiva

Entre as categorias de manutenção, a manutenção corretiva é mais arcaica por se tratar de uma filosofia onde as intervenções ocorrem apenas quando há uma detecção de uma avaria no desempenho do motor de indução e esta tem como finalidade a substituição de peças e/ou reparos no equipamento o mais rápido possível após este apresentar falha. (Scheffer e Girdhar, 2008).

Por ser de simples aplicação e pela falta de uma gestão de manutenção eficaz em algumas industrias, esta metodologia ainda é bastante empregada como principal tipo de manutenção em algumas unidades. Embora tenha como principal desvantagem, devido à não necessidade de um planejamento complexo, a atuação da equipe de manutenção de forma não programada pode gerar grandes prejuízos econômicos. No entanto, esta manutenção é aplicável se as retiradas dos motores de indução não afetarem a produção e se os custos diretos não forem de grande relevância (Felício, 2015).

Mesmo assim, é a técnica que gera o maior custo associado, já que recursos financeiros extras com estoques de peças sobressalentes, altos custos com horas extras dos funcionários do setor e elevado tempo de paralisação da máquina são necessários.

2.1.2 Manutenção preventiva

A manutenção preventiva é realizada em intervalos de tempo pré-definidos, ou de acordo com critérios estabelecidos, com a finalidade de reduzir a probabilidade de avaria ou de degradação do funcionamento do motor de indução (IPQ, 2007). Assim, a intervenção da manutenção ocorre de forma planejada onde a substituição de componentes é feita antes que os problemas ocorram.

A desvantagem principal é que as tarefas programadas podem resultar em reparações ou substituições demasiadamente cedo ou tarde (Santos,2020). Logo, tendo como umas das consequências o prejuízo financeiro ocasionado pelo excesso de paradas desnecessárias e pela substituição de componentes em bom estado. Porém, esta filosofia de manutenção permite o aumento da disponibilidade e confiabilidade dos motores de indução reduzindo a frequência de interrupções inesperadas na produção como ocorre na manutenção corretiva.

2.1.2 Manutenção preditiva

A manutenção preditiva permite que o motor de indução opere o maior tempo possível e a intervenção é realizada baseada em dados e não em suposições. Assim, esta filosofia tem como foco prevenir falhas nessas máquinas atuando com base em dados estatísticos e parâmetros diversos, garantindo operacionalidade aos equipamentos por longos períodos (Kavana & Neethi, 2018).

Geralmente, os parâmetros monitorados, no contexto da manutenção preditiva, são características elétricas obtidas com a máquina em operação, tais como vibração, corrente, fluxo magnético e temperatura (Park *et al.*, 2019).

Uma das vantagens dessa filosofia de manutenção é que a falha pode ser identificada em um estágio inicial, assim, a programação para a intervenção pode ser feita adequadamente e o reparo pode ser realizado no momento de menor impacto na produção. Logo, a manutenção preditiva traz melhorias para a qualidade do produto, maximiza o lucro e a efetividade da produção da indústria, pois minimiza os custos e paradas das máquinas em virtude de falhas.

No entanto, tem como desvantagens o significativo custo de implementação e operação devido ao investimento em equipamento de medição/diagnóstico, ao necessário gasto com sistemas com Inteligência Artificial com alto nível de confiabilidade de modo a não

criar falsos alarmes e ao investimento na formação de operadores do setor da manutenção para avaliar os dados obtidos.

No âmbito das fábricas inteligentes da indústria 4.0, o termo de manutenção preditiva está empregado e relacionado aos conceitos de sistemas ciber-físicos, internet das coisas, computação em nuvem, etc. (Sanchez *et al.*, 2020). Assim, a implementação desse sistema só é viável onde se tem a integração de todos os sistemas da indústria possibilitando que a gestão de manutenção se dê de forma mais dinâmica e eficiente a partir de interversões que levam em consideração uma vastidão de informações disponíveis não dependendo apenas de recursos humanos para a tomada de decisões (Li *et al.*, 2019).

O estudo de manutenção preditiva envolve processos relacionados com o desenvolvimento de técnicas de monitoramento e diagnóstico de falha no motor, principalmente com foco nas técnicas não invasivas e de monitorização remota automatizada.

2.2 Tipos de falhas

No setor industrial, os motores de indução são frequentemente localizados em ambientes não favoráveis ao desempenho adequado que estes foram projetados, o que pode resultar em falha associadas a partes elétricas ou mecânicas deste equipamento, como ilustrado na Figura 2.1. Assim, essas máquinas são suscetíveis a apresentar diversos tipos de falhas, normalmente, podendo resultar em prejuízos materiais, econômicos e sociais.





Dentre essas falhas, serão apresentadas na sequência as causas e efeitos da falha de curto-circuito e do desequilíbrio de tensão, que são o foco deste trabalho.

2.2.1 Curto – circuito

O Curto-circuito em motor de indução pode ser causado devido a diversos tipos de estresses – térmicos, mecânicos, elétricos e ambientais – que agem sobre o sistema isolante dos motores (Qi *et al.*, 2017). Cada tipo de estresse afeta o isolamento de forma diferente, porém, todos agem entre si de forma que a degradação causada por um aumenta a degradação causada pelos outros. Os tipos de curto-circuito que podem ocorrer no motor de indução (Zaparoli, 2018; Siddiqui *et al.* 2014), Figura 2.2, são:

• curto-circuito entre espiras: determinado pelo contato entre duas ou mais espiras de uma mesma bobina. É considerado como a falha inicial, pois o motor pode operar por um tempo indeterminado com a presença do defeito. O tempo de evolução de falhas de curto-circuito entre espiras para as demais falhas não pode ser estimado, pois depende das condições de operação do motor;

• curto-circuito entre fases: definido pelo contato entre espiras de fases diferentes. Este tipo de falha pode resultar em perdas irreversíveis do núcleo do estator tendo como resultado a parada imediata do funcionamento da máquina;

 curto-circuito entre bobinas: caracterizado pela ocorrência do contato entre espiras de bobinas distintas de uma mesma fase. Assim como na falha de curto-circuito entre fases, a máquina para instantaneamente dependendo do sistema de proteção referente ao equipamento.

 curto-circuito entre fase-terra: ocorre, usualmente, em virtude do contato direto do enrolamento com a carcaça, assim, a corrente encontra uma passagem de baixa impedância à terra. O motor de indução para subitamente a atuação.

• curto-circuito aberto: caracterizada pela falta de continuidade elétrica em um enrolamento, eventualmente, pelo rompimento de uma espira. O equipamento pode funcionar dependendo da sua proteção e da carga.



Figura 2.2 – Tipos de curto-circuito no motor de indução. Adaptado de Siddiqui et al. (2014)

Curto-circuito entre espiras do estator é bastante comum nos motores de indução, representando cerca de 26% dos casos de falhas, podendo chegar à cerca de 40% do total de falhas nos motores em operação (Cherif *et al.* 2020; Dorrell e Makhoba, 2017). A partir deste tipo de falha, o problema acaba evoluindo para curto-circuito entre bobinas, entre fases ou fase-terra, resultando, por fim, na perda do motor (Martinez, 2008).

A falha de curto-circuito aumenta progressivamente evoluindo para falhas mais graves, assim, esta é considerada uma falha severa. Por esse motivo, para evitar maiores prejuízos, ter um diagnostico no estágio inicial é de suma importância onde o seu impacto no motor de indução é relativamente menor (Baccarini, 2005; Zaparoli *et al.*,2020). Porém, o diagnóstico de falhas incipientes não é uma tarefa simples. A detecção da presença falha de curto-curto circuito pode ter um diagnóstico equivocado devido à presença de outras falhas ao invés da falha de curto-circuito, como por exemplo, o desequilíbrio entre as tensões do sistema de alimentação do motor que podem produzir alterações em componentes harmônicos comuns às falhas de estator, podendo levar a conclusões erronias no diagnóstico final (Sharifi e Ebrahimi, 2011).

Portanto, a realização da manutenção preditiva é de extrema relevância na prevenção de curto-circuito entre espiras, assim, como de outras falhas. Várias pesquisas são desenvolvidas com intuito de detectar falhas de curto-circuito em motores de indução. Essa falha é assunto de estudos por diversos autores, como por exemplo, Zaparoli *et al.* (2020) abordam um novo estudo da corrente transitória para analisar o estágio inicial da falha de curto-circuito entre espiras presente no motor de indução. A metodologia proposta extrai o segundo componente do envelope transiente dos sinais de corrente do momento de partida

do motor pela análise do componente principal. Esses componentes refletem a assimetria causada pelo curto-circuito e carrega as informações de falha desejadas podendo obter o diagnóstico final da condição do motor.

Lamim Filho *et. al* (2014), por sua vez, realizam o diagnóstico de falhas elétricas no enrolamento do estator do motor de indução trifásico utilizando a análise do fluxo magnético e de vibração. Foram instaladas bobinas no interior do motor, o que implicou em uma maior influência do campo magnético. Assim, foi estabelecida uma relação entre as falhas elétricas (curto-circuito em espiras e desequilíbrio de tensão) e os sinais de fluxo magnético e vibração, a fim de identificar as frequências características dessas falhas.

Uma nova abordagem para detecção *on-line* da falha de curto-circuito em máquina elétrica por meio da sensibilidade do fluxo externo do estator é apresentada por Liu *et al.* (2019). Os resultados experimentais identificam tanto a localização quanto a gravidade do curto-circuito.

O trabalho de Cherif *et al.* (2020) teve como objetivo comparar dois métodos de processamentos de sinais para diagnosticar a falha de curto-circuito entre espiras nos enrolamentos do estator e a alimentação de tensão desequilibrada em motores de indução através de simulações numéricas. A primeira técnica clássica utilizada foi a MCSA que é baseado no processamento da corrente do estator pela aplicação da FFT. A segunda foi uma técnica avançada baseada na energia armazenada em cada decomposição da Transformada Wavelet Discreta.

Para detectar falhas de curto-circuito, Cuevas *et al.* (2016) propõem uma análise combinada dos sinais de fluxo magnético de dispersão e de vibração de uma máquina. As assinaturas dos espectros nas condições defeituosas e saudáveis são extraídas e estudas para determinar o estado do motor. De acordo com os autores, a técnica é uma alternativa promissora, de baixo custo e de fácil de implementação.

Çira *et al.*, (2016) relatam que uma falha de curto-circuito entre espiras no estator não gera nenhuma nova frequência no espectro, no entanto, produz aumento na amplitude das frequências já existentes. Assim, os autores estudam os vetores espaciais de corrente e tensão do estator em diferentes porcentagens de cargas e severidades da falha.

2.2.2 Desequilíbrio de tensão

Os motores de indução estão sujeitos a falhas internas (barras quebradas, rolamentos danificados, curto-circuito, etc.) e falhas externas (sobrecarga mecânica, desequilíbrio de fase, subtensão, sobretensão, rotor bloqueado, etc.). Dentre essas falhas, o desequilíbrio de

tensão e a perda de uma fase de alimentação do motor de indução são considerados como as faltas externas mais frequentes na planta industrial (Refaat *et al.*, 2013).

Algumas das principais causas do desequilíbrio de tensão nas maquinas se deve: tensão de alimentação instável; cargas monofásicas desigualmente distribuídas no mesmo sistema de energia; um circuito aberto no sistema primário de distribuição de energia e ocorrência de descargas atmosféricas em circuitos de distribuição.

Como consequência da ocorrência de desequilíbrio de tensão no motor, o desempenho deste é degradado levando a redução da vida útil da máquina. Isso se deve ao aumento das perdas no equipamento, da presença de correntes de linha desequilibradas, alteração no tempo de partida e do aquecimento excessivo do motor. Assim, um diagnóstico rápido e preciso é de suma relevância para se evitar danos permanentes na máquina (Lashkari e Poshtan, 2015).

2.3 Técnicas de detecção de falhas

Inúmeros trabalhos vêm sendo publicados na área de detecção de falhas em motores de indução com o intuito de garantir a disponibilidade e confiabilidade destes equipamentos. Para garantir a vida útil dos motores elétricos é indispensável o acompanhamento de grandezas que impactam diretamente no seu desempenho, tais como vibração, corrente, temperatura, sinais acústicos, fluxo magnético e torque (Gyftakis et al., 2020).

Para extração dessas variáveis, no que diz respeito a motores de indução, as principais técnica são divididas em dois tipos de monitoramento *on-line* e *off-line*. No contexto atual de manutenção, onde se quer minimizar o número de parada na produção, a detecção da falha de forma *on-line* se mostra uma ótima solução. Algumas dessas técnicas de monitoramento *on-line* mais usuais na manutenção preditiva são análise de: vibração, temperatura, corrente, fluxo magnético e ruído acústico.

Quando se trata de análise de falhas em máquinas elétricas, há métodos relevantes como os citados. Neste trabalho, é utilizado duas das categorias de métodos de detecção de falha:

• Análise da corrente: trata-se de uma técnica estabelecida no âmbito industrial e acadêmico conhecida como Análise de Assinatura da Corrente do Motor (MCSA). Está é uma técnica tradicional no qual através do sinal da corrente do estator de uma das três fases, é possível detectar falhas em diversas partes do motor (Antonino-Daviu *et al.*, 2018). Assim, essa consiste em um conjunto de métodos consolidados, que se desenvolveram principalmente entre os anos de 1975 e 1985 em pesquisas ao redor do mundo, que tinham em comum a análise da corrente no domínio do tempo e do seu espectro de frequência para

caracterizar máquinas de indução (Gu *et al.*, 2019). No entanto, algumas pesquisas relatam a dificuldade do diagnóstico da falha quando motor está operando em baixo escorregamento. Outra limitação desta técnica seria às características construtivas do motor (Antonino-Daviu *et al.*, 2017).

• Análise do fluxo eletromagnético: conhecida como Analise da Assinatura do Fluxo de Dispersão (SFSA) é uma técnica não-invasiva como a análise de corrente. Sendo desenvolvida nas últimas décadas, no entanto, a confiabilidade dos sinais de fluxo de dispersão para o diagnóstico de falha em máquinas foi comprovada para vários tipos de falhas. Pesquisas relatam algumas vantagens em relação às técnicas convencionais, como por exemplo, a não necessidade de saber a porcentagem de carga em que o motor opera. Além de ter bons resultados independentemente de suas características construtivas (Surya *et al.*, 2017). Este método tem como base a análise dos sinais de força eletromotriz (FEM) induzidos pelo fluxo de dispersão em bobinas localizadas na proximidade do motor, que são correlacionados à variação do fluxo magnético ao longo do tempo (Henao *et al.*, 2003).

De acordo com Lamim Filho *et al.* (2007), o EMF gerado em cada sensor interno de fluxo de dispersão pode ser escrito como uma função do fluxo total concatenado (ψ), Equação 2.2

$$[U] = \frac{d[\psi]}{dt}$$
2.1

Considerando que a corrente no sensor de fluxo parasita é zero, o fluxo total concatenado pode ser escrito da seguinte forma:

$$\psi = L_{sfas}i_{as} + L_{sfbs}i_{bs} + L_{sfcs}i_{cs} + L_{sfar}i_{ar} + L_{sfbr}i_{br} + L_{sfcr}i_{cr}$$
 2.2

Sendo *L* é uma indutância, *i* é a corrente elétrica, sendo o sub escrito *a*, *b*, *c* representam as fases trifásicas *s*, *r*, e *sf* relacionadas ao estator, rotor e o sensor de fluxo de dispersão, respectivamente.

Os sinais obtidos para construir as órbitas dependem do fluxo total concatenado através das bobinas do sensor. Esses sinais são gerados essencialmente por fluxo de dispersão axial. O caminho magnético do fluxo de dispersão axial é não linear e notoriamente complexo. A assinatura desses fluxos difere dependendo das condições da corrente de carga, bem como da presença de uma falha nos circuitos do rotor e / ou estator. Quanto mais próximo o sensor estiver dos enrolamentos principais do motor, melhor será a visualização das falhas

iniciais, uma vez que o caminho magnético do fluxo de vazamento axial é não linear também apresenta alta relutância.

A possível presença de distorções durante a aquisição do sinal pode surgir na presença de algum obstáculo entre o sensor e o fluxo.

Os sinais obtidos dos sensores podem ser processados a partir das configurações tradicionais usando um filtro *anti-aliasing* correto e frequência de amostragem adequada que são requisitos necessários para uma excelente visualização das frequências características das falhas

Vale ressaltar que o bom desempenho da técnica de SFSA depende da posição onde o sensor de fluxo é localizado, em razão do fluxo de dispersão reagir de diversas maneiras conforme a região adjacente ao motor. Logo, para obter a melhor relação falha / sinal, vários autores propuseram diversas configurações e posições de fixação de sensores de fluxo magnético em diferentes pontos ao redor do motor.

O correto posicionamento do sensor somado às técnicas de processamento de sinais a serem utilizadas para o diagnóstico de falhas foram considerados de acordo com o tipo de falha ou falhas a serem investigada(s) (Frosini *et al.*, 2015; Meshgin-Kelk *et al.*, 2004; Cuevas *et al.*, 2016; Henao *et al.*, 2003; Iglesias-Martinez *et al.*, 2019). Ou seja, os sensores propostos são móveis, as análises são feitas a partir de um único sinal obtido por um único sensor posicionado na direção radial ou axial do motor de indução, como visto na Figura 2.3. Os resultados apresentados nestes trabalhos indicam que a fixação do transdutor no sentido axial permite uma melhor visualização de informações mais significativas para o diagnóstico.



Fluxo radial

Fluxo axial

Figura 2.3 - Representação da direção do fluxo de dispersão proveniente do motor, adaptado de Santos (2020).

De acordo com a literatura, pode-se afirmar que para garantir a repetibilidade, sensibilidade e confiabilidade dos dados, é necessário que todas as coletas sejam realizadas exatamente nas mesmas posições. Caso contrário, corre-se o risco de perder a referência, comprometendo o diagnóstico e o monitoramento da máquina (Lamim *et al.*, 2020).

2.4 Full Spectrum

Assim como a análise clássica do espectro via FFT aplicada no sinal no domínio tempo, o *Full Spectrum* ou "espectro da órbita", fundamentado no espectro complexo, também é calculado através da FFT (Rao e Tiwari, 2020; da Silva et al.,2017). Este utiliza, porém, os sinais de dois sensores montados perpendicularmente entre si no plano radial do eixo do motor, como ilustrado na Figura 2.4.

O algoritmo *Full Spectrum,* que é comumente aplicado para diagnóstico de falhas em máquinas rotativas, é mostrado na Figura 2.4.



Figura 2.4 - Algoritmo matemático do *Full Spectrum.* Adaptado de Goldman e Muszynska (1999).

Sendo: *x* [*n*] e *y* [*n*] são sinais discretos no tempo *t* [*n*]; *n* = 1, 2, ..., *N*; *N* é o número de amostras; *X_n* e *Y_n* são as amplitudes da FFT nos sinais de entrada; R $_{\omega n+}$ e R $_{\omega n-}$ são as amplitudes direta e reversa do *Full Spectrum*; ω_n é a frequência de um harmônico; α_n e β_n são as fases da entrada direta e em quadratura.

O gráfico resultante do *Full Spectrum* indica os componentes das frequências direta no lado positivo do eixo horizontal e os componentes das frequências reversa no lado negativo desse mesmo eixo, Figura 2.6 (Goldman e Muszynska ,1999).

Tendo em vista que a órbita pode ser construída utilizando dois fasores originados do *Full Spectrum*, com amplitudes e fases distintas, girando à mesma velocidade, porém em

sentidos contrários, as órbitas na técnica clássica do *Full Spectrum* são extremamente dependentes dos ângulos de fase e magnitudes da resposta direta e reversa, como visto na Figura 2.6. Na técnica clássica, para cada frequência do *Full Spectrum* existirá uma órbita gerada pelos fasores: direto e reverso. A amplitude do componente da frequência positiva representa a magnitude do vetor direto girando no sentido de rotação da máquina, sendo a fase do componente igual ao ângulo de partida do fasor. A amplitude do componente da frequência negativa representa a magnitude do vetor reverso que gira no sentido contrário, com um ângulo de partida igual à fase do componente de frequência.



Figura 2.5 - Órbita obtida pela técnica Full Spectrum clássica.

Visto que uma órbita é influenciada por diversas frequências, esta pode ser descrita através do conjunto dos componentes do *Full Spectrum*. Assim, é possível realizar a análise orbital no domínio da frequência. Portanto, para cada par de componentes de frequência (direta e reversa) descreve uma sub-órbita (circular, elíptica ou reta) com sentido e frequência específicos, conforme a Figura 2.5. A órbita total é formada a partir da soma de todas sub-órbitas geradas pelos componentes de frequência existentes no gráfico do *Full Spectrum*.

A Figura 2.5 exibe a trajetória de várias órbitas filtradas na frequência ω_n . O comprimento dos componentes direto e reverso correlaciona-se com o formato geométrico e sentido de rotação da órbita (Goldman e Muszynska, 1999):

- A existência de um único componente, seja direto (R₊) ou reverso (R₋), resulta numa órbita circular.
- ii. O maior componente determina o sentido da rotação da órbita. A rotação da órbita no sentido da rotação da órbita horário significa que R₊ < R₋ e no sentido

da rotação da órbita anti-horário expressa que $R_+ > R_-$. Como pode ser visto na Figura 2.5, onde o ponto indica o fim da órbita.

- iii. Quanto menor for a diferença entre as amplitudes dos componentes, mais elíptica será a órbita.
- iv. Componentes iguais ($R_{+} = R_{-}$) resultam numa simples reta.



Figura 2.6 – *Full Spectrum* com suas corresponde órbitas na frequência de um harmônico ω_n .

Porém, as orbitadas filtradas e modificadas, adotada neste trabalho, dependem apenas das amplitudes dos componentes direto e reverso na frequência específica do *Full Spectrum*, obtidas pela Equação 2.3.

Dado dois sinais ortogonais, x [n] e y [n], o *Full Spectrum* é obtido através da Transformada Rápida de Fourier do sinal s [n] = x [n] + jy [n]. A magnitude do *Full Spectrum* pode ser calculada a partir dos espectros de magnitude X_n e Y_n e de fase α_n e β_n , de x [n] e y [n], respectivamente, conforme a Equação 2.3.

$$S(\omega) = \sqrt{X_n^2 + Y_n^2 \pm 2X_n Y_n \sin(\alpha_n - \beta_n)}$$
 2.3

O algoritmo *Full Spectrum* possibilita separar as órbitas de frequências específicas, permitindo obter órbitas com exclusivamente os componentes de frequência desejados. Normalmente, compreende formas geométricas simples, cada uma associada a uma única frequência.

As informações extraídas das órbitas, nas últimas décadas, tornaram bastante aplicadas para o diagnóstico de falhas em máquinas. Através do *Full Spectrum*, Tůma e Biloš (2007) realizaram o estudo da estabilidade da vibração do rotor em um mancal. Segundo esses autores, esta ferramenta permite conhecer a avaliação da envoltória orbital e possibilita a análise dos componentes da frequência especifica de giro. Shravankumar e Tiwari (2016)

detectaram uma trinca por fadiga em um sistema de rotor usando Full Spectrum em dois sinais coletados por sensores de proximidade. Os componentes reverso e direto foram utilizados no algoritmo para obter coeficientes de força e deslocamento que caracterizam a presença da falha. Para a detecção de atrito em rotores trincados, Darpe e Patel (2011) usaram o Full Spectrum para investigar a natureza direcional dos harmônicos superiores. Bachschmid et al. (2004) usaram o Método de Índice de Forma e Diretividade (SDI - Shape and Directivity Index) para analisar a forma geométrica da órbita obtida através do algoritmo Full Spectrum e também a inclinação do eixo principal da órbita no estudo de uma grande unidade turbogeradora submetida a atritos no rotor e no estator. Goldman e Muszynska (1999) usaram o Full Spectrum para examinar a correlação da fase e magnitude dos componentes reverso e direto. O algoritmo foi usado para determinar a presença de falha no rotor analisando a direção de rotação da órbita e a diferença entre a resposta direta e reversa do gráfico resultante do Full Spectrum. Em da Silva et al. (2017) é apresentado uma nova proposta de diagnóstico da falha no motor de indução baseado na análise do padrão de distribuição dos pares de componentes (direto e reverso) para cada falha para definir as regras necessárias para o desenvolvimento do sistema fuzzy de diagnóstico de falhas. Estes utilizaram sinais de vibração nas direções radiais e três tipos diferentes de defeitos foram analisados: o desbalanceamento, o desalinhamento angular e o paralelo. Kumar et al. (2015) aplicaram o Full Spectrum no sinal de corrente e vibração para detectar no motor de indução trifásico o defeito de desalinhamento do rotor comparando, assim, o resultado do algoritmo em dois sinais de naturezas diferentes.

Na maioria dos trabalhos, observa-se claramente que o algoritmo *Full Spectrum* tem sido aplicado, geralmente, em sinais de vibração. Ainda assim, o monitoramento de condições por meio de sinais de vibração apresenta alguns problemas, como por exemplo, sensibilidade relacionada ao local onde o sensor está situado, a instalação de sensores de vibração que requer acesso direto ao motor e ruído associado a qualquer excitação externa (Kumar *et al.*, 2015)

No entanto, neste trabalho a proposta é aplicar o algoritmo *Full Spectrum* em dois sinais gerados por um simples sensor de fluxo axial de dispersão. As bobinas foram fixadas no lado interno da tampa traseira do motor de indução trifásico, totalmente isoladas do circuito principal da máquina.

Lamim Filho *et. al.* (2020) introduziram esta configuração de sensor e propuseram uma metodologia de processamento dos sinais para detecção de desequilíbrio de tensão, desalinhamento e baixa isolação entre espiras no motor de indução. Todas as análises apresentadas foram apenas no domínio do tempo e os autores necessitaram de vários

estágios de processamento do sinal para realizar o diagnóstico da falha. Eles adotaram dois parâmetros como indicador de falha: a razão entre a altura e a largura da órbita média, além de seu ângulo de inclinação.

No entanto, neste trabalho utiliza-se o mesmo sensor, porém, empregando a técnica *Fluxo Full Spectrum*, visto realizar a análise da órbita no domínio da frequência. Esta nova técnica tem o propósito, neste trabalho, de identificar a presença de desequilíbrio de tensão e baixa isolação entre espiras no motor de indução, bem como distinguir as falhas elétricas em estudo em diferentes condições de carga. Este método usa uma órbita modificada e filtrada obtida das amplitudes dos componentes direto e reverso das frequências específicas do *Full Spectrum* do sinal de força eletromotriz que é proporcional a variação do fluxo de dispersão no motor de indução.
CAPÍTULO 3

Metodologia

Este capítulo tem por finalidade descrever as etapas da metodologia proposta da nova técnica Fluxo *Full Spectrum*, assim como, apresentar o cenário dos testes experimentais e os procedimentos utilizados para processamento dos sinais coletados de corrente e FEM. Os testes experimentais realizados no Laboratório de Máquinas e Transformadores da Universidade Federal de São João del- Rei foram efetuados com o propósito de comparar os resultados obtidos utilizando dois métodos aplicados para detecção de falhas em máquinas elétricas: *Full Spectrum* e a Transformada Rápida de Fourier.

3.1 Descrição do método proposto

Para o estudo dos sinais de fluxos a proposta da metodologia, representada pela Figura 3.1, compreende os seguintes passos:

- i) medir os sinais de fluxos de dispersão do motor através da FEM;
- ii) obter o *Full Spectrum* para os pares de sinais FEM;
- iii) selecionar na frequência característica da detecção da falha o componente reverso e direto;
- iv) obter os raios da orbita resultante do algoritmo Full Spectrum;
- v) construir a órbita filtrada e modificada;
- vi) analisar os indicadores de falha associados a órbita;
- vii) fornecer o diagnóstico final da condição do motor.



Figura 3.1 – Fluxograma do *Full Spectrum* para os sinas de FEM.

No entanto, para os sinais de corrente coletados, diferentemente dos sinais de força eletromotriz, é necessário a aplicação da Transformada dq (Park *et al.* 1929) a fim de se obter $i_q e i_d$, em função de i_a , $i_b e i_c$. Assim, as correntes coletadas trifásicas se tornam a partir da Transformada dq dois sinais defasados no tempo de 90°. O cálculo do sistema de coordenadas bidimensional e ortogonal, composto do eixo direto (d) e do eixo de quadratura (q), conforme exigido pelo algoritmo *Full Spectrum*, se dá conforme mostrado nas Equações 3.1. e 3.2, respectivamente.

$$i_d = \frac{2}{3} \left[i_a \cos(\theta) + i_b \cos\left(\theta - \frac{\pi}{2}\right) + i_c \cos\left(\theta + \frac{\pi}{2}\right) \right]$$
 3.1

$$i_q = -\frac{2}{3} \left[i_a \sin(\theta) + i_b \sin\left(\theta - \frac{\pi}{2}\right) + i_c \sin\left(\theta + \frac{\pi}{2}\right) \right]$$
 3.2

Em que, θ é o ângulo entre o sistema de eixos dq e abc.

A Transformada dq é um artifício matemático amplamente utilizado na análise de circuitos, cuja finalidade é representar as grandezas trifásicas por meio de duas variáveis ortogonais, mais uma componente de sequência zero, como pode ser visualizado na Figura 3.2. O componente de sequência zero aparece perpendicularmente ao plano dq.



Figura 3.2 - Representação das correntes de estator nos sistemas de eixos abc e dq.

Um fluxograma sintetizado da metodologia adotada para os sinais de corrente é compreendido na Figura 3.3.



Figura 3.3 – Fluxograma do *Full Spectrum* para os sinais de corrente.

Assim, há um acréscimo de uma etapa na metodologia anterior no fluxograma do procedimento adotado para o estudo dos sinais de corrente, Figura 3.3, o qual tem os seguintes passos:

- i) medir os sinais de correntes trifásicas do motor;
- ii) aplicar a Transformada dq;
- iii) obter o *Full Spectrum* para os pares de sinais de corrente;
- selecionar na frequência característica da detecção da falha o componente reverso e direto;
- v) obter o raio da orbita resultante do algoritmo *Full Spectrum*;
- vi) construir a órbita filtrada e modificada;
- vii) analisar os indicadores de falha associados a órbita;
- viii) fornecer o diagnóstico final da condição do motor;

A fim de comparar, o trabalho proposto com a tradicional técnica da análise do espectro através da aplicação da Transformada Rápida de Fourier no sinal de FEM no domínio do tempo, Figura 3.4, tem as seguintes etapas:

- i) medir os sinais de FEM do motor funcionando com falha e sem falha;
- ii) aplicar a Transformada Rápida Fourier nos sinais;
- iii) selecionar o componente na frequência característica da detecção da falha;
- iv) comparar o valor da amplitude com falha com valor sem falha nessa mesma frequência;
- v) fornecer o diagnóstico final da condição do motor;





O mesmo procedimento realizado para analise clássica do espectro de frequência derivado da aplicação da FFT nos sinais no dominio do tempo de fluxo de dispersão é adotado para os sinas de corrente.

3.2 Teste Experimental

Experimentalmente, a metodologia proposta foi testada na bancada situada no Laboratório de Máquinas e Transformadores (LAMET) da Universidade Federal de São João del-Rei (UFSJ), Figura 3.5. A robustez desse sistema garantiu a repetibilidade dos testes cinco vezes sob as mesmas condições de carga (0%, 50%, 100%), para o estado do motor sem defeito, para o motor com falha de baixa isolação entre 3, 6 e 9 espiras e com defeito de desequilíbrio de tensão em uma das fases de alimentação do motor de indução. Assim, foram coletados simultaneamente nas duas bobinas um total de 150 sinais numa série de 75 testes. A fim de comparar com os sinais de força eletromotriz, foram coletados também cinco sinais de corrente dos enrolamentos de estator com o motor operando a plena carga, 50% e 0% para cada condição de falha estudada.

As falhas foram introduzidas em um motor de indução trifásico (a): 3CV, 220 V, 60 Hz, quatro polos, 1735 rpm, alimentado por um transformador de tensão variável trifásico (e). Como sistema de carga para esta máquina é utilizado um gerador CC (c) no qual alimenta um banco de resistências variável (j). Um transformador de tensão variável monofásico (f) conectado a um retificador (g) fornece a energia do campo. Para garantir a mesma condição de operação em todos os testes, um transdutor (b) situado entre o gerador e o motor de indução é conectado a um torquímetro digital (d).



Figura 3.5– Bancada de Teste.

Lamim Filho *et. al.* (2020) propôs um novo sensor de fluxo dispersão axial localizado no interior da placa da extremidade traseira de um motor de indução trifásico, Figura 3.6. Este foi projetado para garantir que o sinal de força eletromotriz induzida esteja na faixa de \pm 100 mV, possuindo assim, quarenta voltas de fio de cobre com diâmetro de 0,40 mm. Uma característica importante neste sensor é que os sinais originados pela força eletromotriz estão defasados em \pm 90° no tempo, devido ao fato do deslocamento espacial (Φ) das bobinas ser de aproximadamente 90°. Esta nova proposta de sensor pode ser aplicada na análise do *Full Spectrum*, pois este usa a correlação entre sinais de duas bobinas fixadas perpendicularmente no MIT. Assim, para aquisição dos sinais de força eletromotriz foi utilizado o sensor da Figura 3.6. Já para coletar os sinais de corrente em cada fase do motor de indução, usou-se um alicate amperímetro (A622 CA/CC -100 Hz Tectronix).



Figura 3.6 - Sensor de Fluxo.

Ainda para à etapa de aquisição dos sinais de FEM e de corrente, os respectivos sensores utilizados foram conectados à uma placa de aquisição (NI PCI4461 da National Instruments). Essa possui dois canais analógicos de entrada simultâneas de 24-bits (taxa de amostragem máxima de 80 kHz) e dois canais analógicos de saídas analógicas simultâneas de 24 *bits* (taxa de amostragem de 204,8 kS/s) com faixa de entrada de ±316 mV até 42,4 V. A placa também possui um filtro anti-aliasing até 92 kHz. A ferramenta para o processamento de sinais utilizada foi o software VibSoft-80, configurado para uma frequência de amostragem de 5,12 kHz, durante 1,6 s, gerando um total de 8192 amostras por sinal. O filtro anti-aliasing foi configurado para o tipo passa-baixa com frequência de corte de 2,5kHz.

3.3 Falhas estudadas

O motor de indução trifásico da bancada de teste foi modificado a fim de possibilitar testes de falhas elétricas: baixa isolação entre espiras e desequilíbrio de tensão em uma das fases de alimentação da máquina.

3.3.1 Baixa isolação entre espiras

Os enrolamentos de fase do estator do motor são compostos por dois grupos de bobinas com três passos cada um, distribuídas em 36 ranhuras, Figura 3.7. Cada passo, por sua vez, contém 32 espiras de fio de cobre 1,45 mm de diâmetro. Consequentemente, este arranjo possibilita analisar o curto-circuito entre, no mínimo, 3 espiras e no máximo 33 espiras por fase.

Quatro enrolamentos de derivação foram retirados da fase C para realizar os testes de baixa isolação entre 3, 6 e 9 espiras, que corresponde a aproximadamente 1,5%, 3% e 4,5% de espiras do estator em baixa isolação. Os enrolamentos de derivação (h) foram conectados externamente em série com um banco de resistência (k) para controlar a corrente de curtocircuito em aproximadamente 9A, a corrente nominal de plena carga do motor.



Figura 3.7 - Diagrama dos enrolamentos do estator, adaptado de (Santos, 2020). T1-T6 são os terminais das bobinas das três fases. A fase A está representada em azul, a fase B em cinza e a fase C em vermelho.

3.3.2 Desequilíbrio de tensão

A presença da falha de desiquilíbrio de tensão foi criada a partir da adição de um resistor variável (i) associado em série com a fase C de alimentação do motor elétrico. Para que houvesse 4,6% de desequilíbrio, foi necessário modificar a resistência para resultar em 10 V de diferença entre as demais tensões de fase. De acordo com Resolução Normativa da ANEEL n. 482, de 17 de abril de 2012, este percentual de desequilíbrio ($V_{\%}$) foi calculado tomando como base a Equação 3.3.

$$V_{\%} = \frac{max(|\overline{V}_{abc} - [V_a V_b V_c]|)}{\overline{V}_{abc}}$$

$$3.3$$

Em que \overline{V}_{abc} é a média das tensões eficazes de fase, V_a , $V_b e V_c$.

3.4 Parâmetro Numérico

Uma órbita é influenciada por diversas frequências, esta pode ser descrita através de um conjunto de vetores associados ao gráfico resultante do *Full Spectrum*. Assim, cada par de componente, direto e reverso, em uma frequência especifica descreve uma sub-órbita com sentido de rotação particular.

A órbita derivada do algoritmo clássico do *Full Spectrum* é dependente do ângulo de fase e magnitude dos componentes reverso e direto. No entanto, a nova metodologia proposta FFS adota uma órbita filtrada e modificada que não necessita dos ângulos de fase dos vetores diretos e reverso para sua construção.

Logo, é possível construir a órbita através do lócus do vetor girando no sentido de rotação (direto), e o outro é o lócus do vetor girando no sentido oposto (reverso), como visto na Figura 3.8.

Normalmente, as órbitas filtradas e modificadas são compostas por formas geométricas simples (elipses), cada uma associada a uma única frequência. Assim, o centro da elipse tem como posição (0,0), cada coordenada o qual constrói a elipse é calculada por:

 $\begin{cases} Vetor \ reverso = R_{-}e^{-j\omega_{n}t} \\ Vetor \ direto = R_{+}e^{-j\omega_{n}t} \end{cases}$

3.4



Figura 3.8 - Parâmetros numérico extraídos das órbitas.

Para cada órbita associada à uma frequência do *Full Spectrum*, o raio horizontal (h) é derivado da adição das amplitudes direta e reversa e o raio vertical (v) é o resultado da subtração desses componentes, conforme demonstrado na Figura 3.7.

A fim de se obter um indicador de falha numérico de comparação e interpretação das órbitas resultantes do *Full Spectrum* dos sinais da FEM e das correntes, analisou-se o seguinte parâmetro: a relação entre área definida a partir do raio horizontal (h) e o raio vertical (v) da órbita de cada frequência de estudo do *Full Spectrum* médio. A fim de identificar a presença ou ausência da falha utilização de um critério numérico (a) obtido pela Equação 3.5, no qual constata a porcentagem de aumento ou diminuição da área da órbita. A intenção do parâmetro numérico é detectar a evolução da gravidade da falha através da comparação das condições defeituosas com a referência (órbita saudável) para cada percentual de carga e diferenciar as falhas de estudos.

$$a = \left(\frac{a_{falha}}{a_{integra}} - 1\right) \ge 100\%$$
 3.5

CAPÍTULO 4

Resultados

Neste capítulo são apresentados os resultados dos testes experimentais obtidos com intuito de exibir as discussões e análises destes. Primeiramente, estudam-se os sinais de FEM dos testes realizados no motor de indução sem falha, com falha de baixa isolação entre espiras e de desequilíbrio de tensão. Ressalta-se novamente que os testes experimentais realizados para aquisição dos sinais de FEM se deram em três percentuais de carga distintos: 0%, 50% e 100% da carga nominal do motor de indução. Depois, apresentam-se os resultados para os sinais de correntes sob as mesmas condições de teste. Os resultados obtidos para detecção de falhas em máquinas elétricas neste trabalho são obtidos através do algoritmo *Full Spectrum*. A fim de comparar a proposta do FFS, utiliza-se a tradicional técnica de análise espectral empregando a ferramenta matemática FFT. No final do capítulo, têm-se as considerações finais de todos os testes realizados.

4.1 Full Spectrum médio dos sinais de fluxo

Posteriormente a aplicação do procedimento metodológico descrito no capítulo anterior, o *Full Spectrum* médio dos sinais de FEM foi obtido para a condição sem falha (*SF*), com falha de baixa isolação entre três espiras (*3BI*), seis espiras (*6BI*), nove espiras (*9BI*) e desequilíbrio de tensão (*DT*) com o motor de indução operando na condição de 0%, 50% e 100%. A frequência fundamental (60 Hz) e os seus componentes harmônicos (ex.: 180, 300, 420 e 540 Hz) podem ser claramente observados no gráfico resultante da sequência de processamento de dados do algoritmo do *Full Spectrum*, como ilustrado na Figura 4.1, onde o motor de indução opera à 50% da carga nominal.



Figura 4.1 – *Full Spectrum* médio do sinal de fluxo com o motor operando com 50% da carga nominal.

De acordo com Henao *et. al.* (2003), é comum observar esses componentes de frequência no fluxo de dispersão e alguns deles podem ser excitados com diferentes sensibilidades para cada condição de carga. Em seus estudos, os autores notaram que os harmônicos 3º, 5º, 7º e 9º podem ser usados para detecção da falha de curto-circuito.

Em geral, cada frequência no *Full Spectrum*, pode ser associada uma órbita. Nesse sentido, um estudo minucioso foi realizado a fim de identificar as principais frequências excitadas pela baixa isolação e pelo desequilíbrio de tensão. Assim, foi possível verificar que os harmônicos 3º (180 Hz) e 7º (420 Hz) foram os componentes mais significativos em fazer mudanças sensíveis na forma e tamanho das órbitas, bem como distinguir uma falha da outra. Portanto, esses harmônicos serão considerados como frequências características de falhas. Vale ressaltar que independentemente da porcentagem de carga em que o motor de indução opera, estes harmônicos possibilitam uma análise dos defeitos em estudo.

4.2 Órbitas Médias dos sinais de Fluxo

Na Figura 4.2, o comportamento das órbitas da força eletromotriz com o motor de indução operando sem falha é demonstrado juntamente com as órbitas com as falhas de baixa isolação entre 3, 6 e 9 espiras e desequilíbrio de tensão, sendo estes resultados relativos ao motor operando com carga nominal. A Figura 4.2 (a) corresponde a órbita construída a partir



das respostas reversa e direta do 3º harmônico do *Full Spectrum* médio, já na Figura 4.4 (b) a órbita originada dos componentes do 7º harmônico do mesmo espectro complexo.

Figura 4.2 - Órbitas médias do sinal de fluxo 100% da carga nominal: (a) na frequência de 180 Hz; (b) na frequência de 420 Hz.

Nota-se que as órbitas médias relacionadas ao fluxo de dispersão em cada condição de falha avaliada são bastante distintas entre si possibilitando assim, um diagnóstico da presença ou não das falhas em estudo no motor de indução. Existem mudanças significativas nos tamanhos das órbitas quando são comparados com os padrões saudáveis. Desde a condição mais severa que corresponde neste trabalho a uma baixa isolação entre 9 espiras (cerca de 4,5% de espiras do estator em baixa isolação). Mesmo para baixa isolação entre 3 espiras, que representa um percentual pequeno do enrolamento do estator (cerca de 1,5% do total de espiras).

Pode-se observar, claramente, que conforme a severidade da falha de baixa isolação aumenta, a órbita se torna mais distinguível em comparação com a condição sem falha. A análise das duas frequências, 180 Hz e 420 Hz, permite distinguir uma falha da outra. Uma característica que possibilita diferenciar a falha de baixa isolação da falha de desequilíbrio de *tensão* na máquina é o sentindo de rotação da orbita, na frequência de 420 Hz. O sentido de rotação das órbitas é indicado por um ponto no fim da órbita. A rotação da órbita no sentido horário (*H*) significa que a amplitude do componente direto é menor do que a amplitude do componente reverso, enquanto, no sentido anti-horário (*AH*) o oposto ocorre.

A síntese dos resultados para 100% de carga é demonstrada na Tabela 4.1, onde são exibidos os parâmetros numéricos extraídos das órbitas médias: área e o sentido de rotação.

O parâmetro de comparação *a* também é apresentado, no qual relaciona as áreas da orbita com falha com a de referência (sem falha).

Condição	Área da órbita		a (%)		Rotação da órbita	
	180 Hz	420 Hz	180 Hz	420 Hz	180 Hz	420 Hz
SF	4,96E-5	7,52E-5	-	-	AH	AH
3BI	1,81E-4	8,81E-5	264,108	17,209	AH	AH
6BI	3,58E-4	1,45E-4	620,681	93,651	AH	AH
9BI	9,26E-4	1,79E-4	1766,071	138,262	AH	AH
DT	1,18E-4	9,84E-5	2271,390	30,325	AH	Н

Tabela 4.1: Parâmetros numéricos dos sinais FEM para a operação em 100% de carga.

Um resumo do comportamento do parâmetro *a* em relação ao sinal de referência é ressaltado na Figura 4.3. Nota-se uma tendência de crescimento do parâmetro *a* com a severidade da falha de baixa isolação, como citado anteriormente.



Figura 4.3 – Representação gráfica do parâmetro *a* dos sinais FEM para a condição de 100% de carga.

Para condição de 50% de carga, os comportamentos das órbitas mantem iguais ao do motor operando a plena carga. Na Figura 4.4 são ilustradas as órbitas na condição saudável, para baixa isolação entre 3, 6 e 9 espiras e desequilíbrio de tensão na frequência de 180 Hz

e 420 Hz. Nota-se as mesmas características das órbitas anteriores que possibilitam fazer um diagnóstico da falha tomando como base as áreas das órbitas correspondentes quando são comparados com os padrões saudáveis. A tendência de evolução da falha de baixa isolação entre espiras também pode ser vista claramente por meio do parâmetro *a*, Figura 4.5.



Figura 4.4 - Órbitas médias do sinal de fluxo 50% da carga nominal: (a) na frequência de 180 Hz; (b) na frequência de 420 Hz.

Nota-se, na frequência de 180 Hz, as órbitas continuam girando no sentido antihorário. Isso indica que o componente direto permanece maior do que o reverso. Por outro lado, na frequência de 420 Hz, observa-se que no desequilibro de tensão tem um sentido de rotação contrário as outras órbitas de estudo devido a resposta direta sem menor do que a resposta reversa no *Full Spectrum* nessa frequência. Assim, o sentido de rotação da órbita em 420 Hz possibilita diferenciar a falha de desequilíbrio de tensão com a baixa isolação.

Os parâmetros numéricos extraídos das órbitas são apresentados na Tabela 4.2.

Condição	Área da órbita		a (%)		Rotação da órbita	
	180 Hz	420 Hz	180 Hz	420 Hz	180 Hz	420 Hz
SF	9,91E-5	8,20E-5	-	-	AH	AH
3BI	2,13E-4	1,18E-4	114,517	44,176	AH	AH
6BI	3,94E-4	1,63E-4	297,641	99,540	AH	AH
9BI	8,89E-4	1,88E-4	797,197	130,115	AH	AH
DT	1,08E-3	7,51E-5	987,646	-8,352	AH	Н

Tabela 4.2: Parâmetros numéricos dos sinais FEM para a operação em 50% de carga.



Figura 4.5 - Representação gráfica do parâmetro *a* dos sinais FEM para a condição de 50% de carga.

Os cenários das órbitas de baixa isolação e de desequilíbrio de tensão para 0% de carga são demonstrados na Figura 4.6. Os padrões das órbitas se mantiveram bastante similares aos padrões observados nas condições das cargas anteriores estudadas. No entanto, na frequência 420 Hz nota-se que a baixa isolação entre 3 espiras, que representa um percentual pequeno do enrolamento do estator (cerca de 1,5% do total de espiras) e o desequilíbrio de tensão, apresentam órbitas menores que a de referência (na condição saudável), o que pode gerar um diagnóstico difícil, nesta frequência, do estado inicial da falha de baixa isolação quando o motor de indução opera a vazio.



Figura 4.6 - Órbitas médias do sinal de fluxo 0% da carga nominal: (a) na frequência de 180 Hz; (b) na frequência de 420 Hz.

A síntese dos resultados para a operação a 0% de carga é apresentada na Tabela 4.3 e graficamente na Figura 4.7. Diferentemente das demais porcentagens de carga em que o motor opera neste trabalho, na situação sem carga, as órbitas referentes a baixa isolação entre 3 espiras e ao desequilíbrio de tensão apresentam áreas menores que a condição sem falha. O que pode ser notado através do parâmetro *a* ser negativo para essas circunstâncias.

Condição	Área da órbita		a (%)		Rotação da órbita	
	180 Hz	420 Hz	180 Hz	420 Hz	180 Hz	420 Hz
SF	1,01E-4	5,70E-5	-	-	AH	AH
3BI	1,94E-4	4,22E-5	92,243	-26,315	AH	AH
6BI	3,24E-4	9,98E-5	221,027	21,875	AH	AH
9BI	7,03E-4	1,07E-5	595,995	88,103	AH	AH
DT	9,96E-4	2,24E-5	885,821	-60,800	AH	Н

Tabela 4.3: Parâmetros numéricos dos sinais FEM para a operação em 0% de carga.



Figura 4.7 - Representação gráfica do parâmetro *a* dos sinais FEM para a condição de 0% de carga.

Comparando os resultados mostrados nas Figura 4.3, Figura 4.5 e Figura 4.7, para o motor trabalhando com 100%, 50% e 0% da carga, respectivamente, pode-se observar que o terceiro harmônico (180 Hz) é mais sensível à falha de baixa isolação entre espiras conforme sua gravidade aumenta. É possível notar que o parâmetro *a* aumenta no mínimo em 92% já no primeiro nível de falha (*3BI*) e mantém o crescimento conforme o nível da falha aumenta.

Para o sétimo harmônico (420 Hz) a sensibilidade não é a mesma do terceiro harmônico, pode-se observar que a baixa isolação mais severa (*9BI*) tem um aumento máximo de aproximadamente 138% no parâmetro *a*. A inspeção do formato da órbita que é influenciado pelas amplitudes do componente direto e reverso que mudam de acordo com a severidade da falha, pode ser complementada com a análise do parâmetro *a*, podendo, assim, chegar à conclusão no que diz a respeito da evolução da falha de baixa isolação.

Percebe-se também que a distinção entre as duas falhas analisadas (baixa isolação entre espiras e tensão desequilibrada) pode ser feita na frequência de 420 Hz analisando o sentido de rotação da órbita que muda na presença de tensões desequilibradas no MIT.

4.3 Full Spectrum médio dos sinais de corrente

A seguir, são apresentados os resultados obtidos para os sinais de corrente após aquisição das correntes trifásicas no motor de indução e aplicação da Transformada dq, afim de ter dois sinais defasados no tempo de 90°. Pode-se aplicar o algoritmo do *Full Spectrum* e obter as órbitas médias para 0%, 50% e 100% de carga dos sinais de corrente.

No *Full Spectrum* de corrente com o motor operando com 50% de carga, Figura 4.8, a frequência fundamental (60 Hz) e os seus componentes harmônicos (ex.: 180, 300, 420 e 540 Hz) podem ser facilmente notados. Assim, as mesmas frequências da análise dos sinais de fluxo de dispersão foram adotadas como as frequências características de falha, os componentes harmônicos 3° (180 Hz) e 7° (420 Hz).



Figura 4.8 – *Full Spectrum* do sinal de corrente com o motor operando com 50% da carga nominal.

4.4 Orbitas sinais de corrente

A partir do algoritmo do *Full Spectrum*, na Figura 4.9 são exibidas as órbitas médias dos sinais de correntes para a falha de baixa isolação entre 3, 6 e 9 espiras e de desequilíbrio de tensão, bem como a órbita de referência (sem falha) para o motor de indução operando a plena carga. Não houve mudanças significativas na área das órbitas, o que dificulta a distinção entre as condições com e sem falha, principalmente na frequência 420Hz.



Figura 4.9 - Órbitas médias do sinal de corrente 100% da carga nominal: (a) na frequência de 180 Hz; (b) na frequência de 420 Hz.

Semelhante aos resultados das orbitas, é possível verificar na Tabela 4.4 que não há um crescimento do parâmetro *a* na proporção que a falha aumenta, diferentemente do que ocorre nas órbitas dos sinais de FEM. Nota-se, assim, na Figura 4.10 que não há uma tendência do parâmetro *a* com a severidade da falha de baixa isolação. Também não é possível fazer a distinção entre as falhas de estudo por meio do sentido de rotação das órbitas.

Condição	Área da órbita		a (%)		Rotação da órbita	
	180 Hz	420 Hz	180 Hz	420 Hz	180 Hz	420 Hz
SF	3,69E-5	7,10E-4	-	-	AH	AH
3BI	1,36E-4	7,59E-4	267,564	6,900	AH	AH
6BI	7,33E-5	6,78E-4	98,279	-4,489	Н	AH
9BI	2,87E-4	3,53E-4	677,471	-50,230	Н	AH
DT	2,18E-3	6,82E-4	5811,302	-3,963	AH	AH

Tabela 4.4: Parâmetros numéricos dos sinais de corrente para a operação em 100% de carga.



Figura 4.10 - Representação gráfica do parâmetro *a* dos sinais de corrente para a condição de 100% de carga.

Do mesmo modo, a comparação foi feita para as demais cargas. Para 50% de carga um comportamento similar à de 100% de carga, as órbitas dos sinais de corrente se apresentaram muito próximas da referência, exceto para o desequilíbrio de tensão na frequência de 180 Hz, onde a mudança no formato da órbita é considerável, como pode ser notado na Figura 4.11.





Os parâmetros das orbitas de sinais de corrente em cada uma das condições de teste para o motor de indução operando a 50% de carga são apresentados na Tabela 4.5. Os mesmos valores são exibidos graficamente na Figura 4.12.

Condição	Área da órbita		a (%)		Rotação da órbita	
	180 Hz	420 Hz	180 Hz	420 Hz	180 Hz	420 Hz
SF	5,72E-4	3,96E-2	-	-	AH	AH
3BI	8,87E-4	4,41E-2	55,004	11,336	AH	AH
6BI	7,66E-4	4,49E-2	-86,621	13,183	AH	AH
9BI	9,51E-4	4,74E-2	66,184	19,660	AH	AH
DT	6,69E-4	4,33E-2	1068,763	9,172	AH	AH

Tabela 4.5: Parâmetros numéricos dos sinais de corrente para a operação em 50% de carga.



Figura 4.12 - Representação gráfica do parâmetro *a* dos sinais de corrente para a condição de 50% de carga.

Na Figura 4.13 são exibidas as órbitas médias de corrente para o desequilíbrio de tensão, baixa isolação entre 3, 6 e 9 espiras, bem como a referência para o motor na condição a vazio. Semelhante comportamento ao caso anterior de 50% de carga, o motor operando 0% de carga as órbitas com falha de baixa isolação se apresentaram muito próximas da referência. Tendo em vista que o desequilíbrio de tensão provoca efeitos mais significativos nas correntes de estator, sua respectiva órbita em 180 Hz resulta, assim, em uma maior visível deformação. O mesmo efeito não pode ser notado na frequência de 420 Hz todas as orbitas manifestaram um formato semelhante independentemente do tipo de falha presente no motor de indução. A síntese dos resultados para 0% de carga é demonstrada na Tabela 4.7. Os mesmos valores dos parâmetros a são exibidos graficamente na Figura 4.14.



Figura 4.13 - Órbitas médias do sinal de corrente 0% da carga nominal: (a) na frequência de 180 Hz; (b) na frequência de 420 Hz.

Tabela 4.6: Parâmetros numéricos dos sinais de corrente para a operação em 0% de carga.

Condição	Área da órbita		a (%)		Rotação da órbita	
	180 Hz	420 Hz	180 Hz	420 Hz	180 Hz	420 Hz
SF	7,33E-3	8,56E-3	-	-	AH	AH
3BI	7,03E-4	4,32E-3	-90,411	-49,539	Н	AH
6BI	1,57E-3	1,23E-2	-78,578	43,830	AH	AH
9BI	1,88E-2	6,02E-3	157,732	-29,668	AH	AH
DT	1,15E-1	1,39E-2	1473,279	62,970	AH	AH



Figura 4.14 - Representação gráfica do parâmetro *a* dos sinais de corrente para a condição de 0% de carga

4.5 Órbitas médias de fluxo vs. corrente

Nesta seção é realizado um paralelo do parâmetro numérico *a* obtido das órbitas médias dos sinais de FEM e de corrente, com percentual de carga de 0%, 50% e 100%.

Nas Figuras 4.15 e 4.16 tem-se a variação do parâmetro de comparação *a* promovida por cada tipo de falha estudada nesse trabalho, para ambos os tipos de natureza dos sinais das órbitas na frequência 180 Hz e 420 Hz, respectivamente, na condição de 100%. Esta mesma análise foi realizada para condição de 50% (Figuras 4.17 e 4.18) e 0% de carga (Figuras 4.19 e 4.20).

É visível o fato da sensibilidade dos sinais de FEM ser maior que a dos sinais de corrente, além de apresentarem na frequência de 180 Hz uma tendência entre o indicador de falha *a* e a severidade da falha de baixa isolação independente da porcentagem de carga em que o motor de indução trabalha. Assim, é possível ter um diagnóstico por meio da análise dos sinais de FEM desde a baixa isolação entre poucas espiras (3BI) a um número maior de espiras em baixa isolação (9BI). A detecção da falha no estágio inicial é de suma importância devido a evolução rápida da baixa isolação evitando o agravamento dessa e surgimento de outras falhas no motor de indução.

Vale ressaltar que o sentido de rotação nas órbitas de corrente não se apresenta como um fator capaz de distinguir as duas falhas de estudos, diferentemente do que ocorre nos sinais de fluxo, no qual na frequência de 420 Hz, em todas porcentagens de carga, o motor de indução com a falha de desequilíbrio de tensão apresenta o sentido de rotação da órbita contrário dos demais.



Figura 4.15 - Variação do parâmetro *a* das órbitas dos sinais FEM e de corrente operando a 100% de carga, na frequência de 180 Hz.



Figura 4.16 - Variação do parâmetro *a* das órbitas dos sinais FEM e de corrente operando a 100% de carga, na frequência de 420 Hz.

A síntese dos resultados do parâmetro *a* para motor de indução operando a 50% é apresentado nas Figuras 4.17 e 4.18 para as frequências de 180 Hz e 420 Hz, respectivamente.



Figura 4.17 - Variação do parâmetro *a* das órbitas dos sinais FEM e de corrente operando a 50% de carga, na frequência de 180 Hz.



Figura 4.18 - Variação do parâmetro *a* das órbitas dos sinais FEM e de corrente operando a 50% de carga, na frequência de 420 Hz.

Nas Figuras 4.19 e 4.20, por sua vez, é demonstrado o comportamento do indicador de falha *a* para os sinais de FEM e de corrente com o motor operando a vazio nas frequências de 180 Hz e 420 Hz.



Figura 4.19 - Variação do parâmetro *a* das órbitas dos sinais FEM e de corrente operando a 0% de carga, na frequência de 180 Hz.



Figura 4.20 - Variação do parâmetro *a* das órbitas dos sinais FEM e de corrente operando a 0% de carga, na frequência de 420 Hz.

4.6 Análise do espectro médio

Para efeito de comparação com a proposta desse trabalho, a análise tradicional do espectro através da aplicação da ferramenta matemática FFT foi empregada nos sinais de FEM e de corrente nos cinco testes sem falha, com falha de desequilíbrio de tensão e para a falha mais severa de baixa isolação, obtendo assim, o espectro médio com o motor operando com 100% de carga.



Figura 4.21 – Espectro médio do sinal de fluxo com o motor operando com 100% da carga nominal.



Figura 4.22 – Espectro médio do sinal de corrente com o motor operando com 100% da carga nominal.

O gráfico de tendência das amplitudes nas frequências características dos espectros de corrente e FEM do motor de indução sem falha, baixa isolação entre espiras e desequilíbrio de tensão para o motor trabalhando com 100% da carga é mostrado na Figura 4.23.



Figura 4.23 – Tendência dos sinais de corrente e fluxo para a condição de 100% de carga.

Ao realizar um paralelo entre os resultados obtidos com a técnica do *Full Spectrum* e a análise de amplitude FFT, observa-se a melhor sensibilidade da técnica proposta no diagnóstico das falhas estudadas.

Observa-se que com ao analisar apenas um sinal de um dos sensores não é possível diagnosticar as condições de baixa isolação no estágio incipiente da falha. Assim, a condição de operação sem defeito pode ser confundida com a condição de baixa isolação entre 3 espiras. No entanto, a técnica FFS se mostrou capaz de fazer o diagnóstico da falha de baixa isolação na fase incipiente bem como distingui-la da falha de desequilíbrio de tensão por meio da análise do sentido de rotação das órbitas.

CAPÍTULO 5

Conclusão

5.1 Considerações Finais

Neste trabalho, uma nova aplicação do algoritmo *Full Spectrum* foi proposta: Fluxo *Full Spectrum* (FFS). O método analisa as órbitas modificadas e filtradas obtidas a partir de frequências específicas do *Full Spectrum* dos sinais de fluxo de dispersão do motor de indução. As informações dos sinais de fluxo magnético apresentaram uma excelente repetibilidade dos dados e a configuração do sensor possibilitou que todas as coletas fossem realizadas exatamente na mesma posição.

Para as falhas avaliadas, observa-se que ao analisar apenas um sinal de um dos sensores de fluxo de dispersão axial através da tradicional técnica de análise do espectro não é possível diagnosticar as condições de baixa isolação no estágio incipiente da falha. No entanto, ao utilizar a correlação de dois sensores de fluxo de dispersão situados perpendicularmente no motor de indução, através da aplicação do algoritmo *Full Spectrum* percebe-se uma melhor sensibilidade no diagnóstico das falhas estudadas desde a condição no estágio inicial à um nível mais grave de baixa isolação entre espiras.

Os resultados experimentais indicam a eficácia do FFS para monitorar e diagnosticar diferentes falhas que acontecem em motores de indução, como as estudadas neste trabalho: baixa isolação entre espiras e desequilíbrio de tensão. Uma importante contribuição da técnica proposta é a possibilidade de caracterizar a tendência da evolução da falha de baixa isolação entre espiras, ainda em seus estágios iniciais, e distingui-las da ocorrência de uma condição de alimentação do motor de indução com tensões desequilibradas em 420 Hz. Vale ressaltar que a sensibilidade do parâmetro *a* para o sétimo harmônico (420 Hz) não é a mesma do terceiro harmônico (180 Hz) no qual é possível analisar com maior precisão a severidade da falha de baixa isolação.

Diferentemente dos sinais de fluxo de dispersão, o sentido de rotação nas órbitas de corrente não se apresenta como um fator capaz de distinguir as duas falhas de estudos. Assim, como o parâmetro *a* não apresenta um padrão estabelecido com a evolução da falha de baixa isolação entre espiras.

A técnica do *Full Spectrum* aplicada aos sinais de FEM é uma boa alternativa para detecção de falhas elétricas em motores de indução e pode ser aplicada com uma placa de aquisição de dados de baixa resolução e baixo custo. Assim, o pequeno esforço computacional e a simplicidade de implementação permitem que a técnica FFS seja aplicada em sistemas de monitoramento e diagnóstico online de falhas. Deste modo, torna viável a sua implementação no ambiente industrial facilitando, assim, a atividade de planejamento das intervenções de manutenção evitando a ocorrência de paradas não programadas e prejuízos materiais, econômicos e sociais.

5.2 Trabalhos Publicados

Ao longo da pesquisa deste trabalho foram publicados os artigos:

[1] Araújo, A. C. S; Lamim, P. C. M., Baccarini L. M. R., Batista F. B. (2020). Detecção de desequilíbrio de tensão e de desalinhamento no motor de indução através da análise do fluxo de dispersão. 23° Congresso Brasileiro de Automática.

[2] Lamim, P. C. M.; Baccarini L. M. R.; Batista F. B.; Araújo, A. C. S (2021). Orbit analysis from a stray flux full spectrum for induction Machine fault detection. *IEEE Sensor Journal*, doi: 10.1109/JSEN.2021.3074815.

5.3 Trabalhos Futuros

A presença simultânea de diferentes falhas pode influenciar a eficiência da detecção de falhas nos motores de indução. No futuro, o efeito combinado de falhas pode ser estudado na metodologia que foi proposta neste trabalho, Fluxo *Full Spectrum*, para avaliar o grau de interferência destes no método de diagnóstico de falhas.

Uma outra sugestão para trabalhos futuros é empregar o algoritmo do FFS em outros tipos de falhas que ocorrem no motor de indução e de outras naturezas, como de origem mecânica.

Outra possibilidade de indicador de falha das órbitas é utilizar o atributo SDI, que juntamente com o parâmetro *a* e sentido da precessão, dariam bons atributos para um classificador de aprendizado de máquina.

Por fim, mas não menos importante, técnicas de aprendizado de máquina para reconhecimento de padrões podem ser exploradas posteriormente para automatizar o

48

diagnóstico e o prognóstico das falhas no motor de indução. Assim, a aplicação de técnicas de aprendizado não-supervisionado e de sistemas evolutivos pode reproduzir ganhos consideráveis para a metodologia.

Referências Bibliográficas

- Afrizal, N., e Ferrero, R. (2020). Leakage Error Compensation in Motor Current Signature Analysis for Shaft Misalignment Detection in Submersible Pumps. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 69(11):8821-8830
- Antonino-Daviu, J. A., Quijano-Lopez, A., Rubbiolo, M., e Climente-Alarcon, V. (2018). Advanced Analysis of Motor Currents for the Diagnosis of the Rotor Condition in Electric Motors Operating in Mining Facilities. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 54(4):3934-3942.
- Antonino-Daviu, J., Quijano-Lopez, A., Climente-Alarcon, V., e Garin-Abellan, C. (2017).
 Reliable Detection of Rotor Winding Asymmetries in Wound Rotor Induction Motors via Integral Current Analysis. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 53(3):2040–2048.
- Baccarini, L. M. R. (2005). Detecção e diagnóstico de falhas em motores de indução. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Minas Gerais:Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.
- Baccarini, L. M. R., Avelar, V. S., Silva V. V. R. E., e Amaral, G. F. V. (2013). Intelligent System Design for Stator Windings Faults Diagnosis: Suitable for Maintenance Work. Journal of Software Engineering and Applications, 06:526-532.
- Bachschmid, N., Pennacchi, P., e Vania, A. (2004). Diagnostic significance of orbit shape analysis and its application to improve machine fault detection. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 26(2):200–208.
- Batista, F. B., Lamim Filho, P. C. M., Pederiva, R., e Silva, V. A. D. (2016). An Empirical Demodulation for Electrical Fault Detection in Induction Motors. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 65(3):559–569.
- Cherif, H., Benakcha, A., Khechekhouche, A., Menacer, A., Chehaidia. S. E., e Panchal H. (2020). Experimental diagnosis of inter-turns stator fault and unbalanced voltage supply in induction motor using MCSA and DWER. *Periodicals of Engineering and Natural*

Sciences. 8(3):1202-1216.

- Çira, F., Arkan, M., Gümüş, B., e Goktas, T. (2016). Analysis of stator inter-turn short-circuit fault signatures for inverter-fed permanent magnet synchronous motors. *IECON Proceedings (Industrial Electronics Conference)*, pp. 1453–1457.
- Cuevas, M., Romary, R., Lecointe, J. P., e Jacq, T. (2016). Non-Invasive Detection of Rotor Short-Circuit Fault in Synchronous Machines by Analysis of Stray Magnetic Field and Frame Vibrations. *IEEE Transactions on Magnetics*, 52(7):3–6.
- Cusido, J., Rosero, J., Aldabas, E., Ortega, J. A., e Romeral, L. (2005). Fault detection techniques for induction motors. *IEEE Compatibility in Power Electronics* 2005, 2005, pp. 85–90.
- da Silva, A. M., Povinelli, R. J., e Demerdash, N. A. O. (2008). Induction machine broken bar and stator short-circuit fault diagnostics based on three-phase stator current envelopes. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 55(3):1310–1318.
- da Silva, R. R., Costa, E. S., de Oliveira, R. C. L., Mesquita, A. L. A. (2017). Fault diagnosis in rotating machine using full spectrum of vibration and logic fuzzy. *Journal of Engineering Science and Technology*. 12(11): 2952 2964
- Darpe, T. H. P. e Patel, A. K. (2011). Application of full spectrum analysis for rotor fault diagnosis, IUTAM Symposium on Emerging Trends in Rotor Dynamics. IUTAM Bookseries, 1011, pp. 185–199.
- Dorrell D. G. e Makhoba K. (2017). Detection of Inter-Turn Stator Faults in Induction Motors Using Short-Term Averaging of Forward and Backward Rotating Stator Current Phasors for Fast Prognostics. *IEEE Transactions on Magnetics*, 53(11):1-7.
- Eftekhari, M., Moallem, M., Sadri, S., e Hsieh, M. F. (2014). Online detection of induction motor's stator winding short-circuit faults. *IEEE Systems Journal*, 8(4):1272–1282.
- Felicio, G. M. G. (2015). Diagnóstico de Avarias em Máquinas Rotativas utilizando a Análise de Órbitas. Dissertação de Mestrado, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa: Área Departamental de Engenharia Mecânica.
- Frosini, L., Harlisca, C., e Szabo, L. (2015). Induction machine bearing fault detection by means of statistical processing of the stray flux measurement. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 62(3):1846–1854.
- Geetha, E., e Nagarajan, C. (2018). Induction Motor Fault Detection and Classification Using Current Signature Analysis Technique. *Proc. IEEE Conference on Emerging Devices and Smart Systems, ICEDSS 2018*, pp. 48–52.
- Goldman, P.,e Muszynska, A. (1999). Application of full spectrum to rotating machinery diagnostics. *Orbit, First Quarter*, 20:17–21.

- Gu, F. C., Bian, J. Y., Hsu, C. L., Chen, H. C., e Lu, S. Der. (2019). Rotor fault identification of induction motor based on discrete fractional fourier transform. *Proceedings 2018 International Symposium on Computer, Consumer and Control, IS3C 2018*, pp. 205–208.
- Gyftakis, K. N., Panagiotou, P. A., e Lee, S. Bin. (2020). Generation of Mechanical Frequency Related Harmonics in the Stray Flux Spectra of Induction Motors Suffering from Rotor Electrical Faults. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 56(5):4796–4803.
- Henao, H., Demian, C., & Capolino, G. A. (2003). A frequency-domain detection of stator winding faults in induction machines using an external flux sensor. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 39(5):1272–1279.
- Huang, X., Zhao, F., Sun, Z., Zhu, Z., e Mei, X. (2020). A Novel Condition Monitoring Signal Analysis Method of Numerical Control Machine Tools in Varying Duty Operation. *IEEE Access*, 8:72577–72584.
- Huo, Z., Martinez-Garcia, M., Zhang, Y., Yan, R., e Shu, L. (2020). Entropy Measures in Machine Fault Diagnosis: Insights and Applications. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 69(6):2607–2620.
- Ibrahim, R., Irfan, M., e Saad, N. (2018). Condition Monitoring and Faults Diagnosis of Induction Motors: Electrical Signature Analysis. Chapman and Hall/CRC.
- IEEE (1998). leee Standards Practice for the Design of Reliable Industrial and Commercial Power Systems. The IEEE color book series: Gold book. Institute of Electrical & Electronics Enginee.
- Iglesias-Martinez, M. E., De Cordoba, P. F., Antonino-Daviu, J. A., e Alberto Conejero, J. (2019). Detection of Nonadjacent Rotor Faults in Induction Motors via Spectral Subtraction and Autocorrelation of Stray Flux Signals. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 55(5):4585–4594.
- IPQ, I. P. (2007). NP EN 13306. Terminologia da manutenção.
- Kavana, V., e Neethi, M. (2018). Fault Analysis and Predictive Maintenance of Induction Motor
 Using Machine Learning. *3rd International Conference on Electrical, Electronics, Communication, Computer Technologies and Optimization Techniques, ICEECCOT* 2018, pp. 963–966.
- Kumar, C., Krishnan, G., e Sarangi, S. (2015). Experimental investigation on misalignment fault detection in induction motors using current and vibration signature analysis. 2015
 1st International Conference on Futuristic Trends in Computational Analysis and Knowledge Management, ABLAZE 2015, pp. 61–66.
- Lamim Filho, P. C. M., Pederiva, R., e Brito, J. N. (2007). Detection of Stator Winding Faults in Induction Machines Using an Internal Flux Sensor," 2007 IEEE International

Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives, Cracow, pp. 432-437.

- Lamim Filho, P. C. M., Pederiva, R., e Brito, J. N. (2014). Detection of stator winding faults in induction machines using flux and vibration analysis. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 42(1–2):377–387.
- Lamim Filho, P. C.M., Santos, D. C., Batista, F. B., e Baccarini, L. M. R. (2020). Axial Stray Flux Sensor Proposal for Three-Phase Induction Motor Fault Monitoring by Means of Orbital Analysis. *IEEE Sensors Journal*, 20(20):12317–12325.
- Lamim Filho, P. Cezar Monteiro, Brito, J. N., Silva, V. A. D., e Pederiva, R. (2013). Detection of electrical faults in induction motors using vibration analysis. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 19(4):364–380.
- Lashkari, N., e Poshtan, J. (2015). Detection and discrimination of stator interturn fault and unbalanced supply voltage fault in induction motor using neural network. *6th Annual International Power Electronics, Drive Systems, and Technologies Conference, PEDSTC* 2015, pp. 275–280.
- Li, Y., Wang, X., Si, S., e Du, X. (2019). A New Intelligent Fault Diagnosis Method of Rotating Machinery under Varying-Speed Conditions Using Infrared Thermography. *Complexity*,5:1-12.
- Malekpour, M., Phung, B. T., e Ambikairajah, E. (2017). An envelope-based method with second order generalized integrator adaptive notch filter for diagnosis of rotor bar breakage at very low slips. 7 IEEE 11th International Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED), pp.1–7.
- Martinez, A. M. P. (2008). Estudo de métodos de detecção de curto-circuito entre espiras em estatores de motores de indução trifásico de baixa tensão. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina.
- Meshgin-Kelk H., Milimonfared J. e Toliyat H. A. (2004). Interbar currents and axial fluxes in healthy and faulty induction motors. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 40(1):128-134.
- Panagiotou, P. A., Arvanitakis, I., Lophitis, N., Antonino-Daviu, J. A., e Gyftakis, K. N. (2019).
 A New Approach for Broken Rotor Bar Detection in Induction Motors Using Frequency Extraction in Stray Flux Signals. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 55(4):3501–3511.

Park, R. H. (1929). Two-reaction theory of synchronous machines generalized method of analysis-part i. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, 48(3):716–727.

- Park, Y., Jeong, M., Lee, S. Bin, Antonino-Daviu, J. A., e Teska, M. (2017). Influence of Blade
 Pass Frequency Vibrations on MCSA-Based Rotor Fault Detection of Induction Motors.
 IEEE Transactions on Industry Applications, 53(3):2049–2058.
- Park, Y., Yang, C., Kim, J., Kim, H., Lee, S. Bin, Gyftakis, K. N., Panagiotou, P. A., Kia, S. H., e Capolino, G. A. (2019). Stray flux monitoring for reliable detection of rotor faults under the influence of rotor axial air ducts. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 66(10):7561–7570.
- Qi, Y., Zafarani, M., Akin, B., e Fedigan, S. E. (2017). Analysis and Detection of Inter-Turn Short-Circuit Fault Through Extended Self-Commissioning. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 53(3):2730–2739.
- Ramirez-Nunez, J. A., Antonino-Daviu, J. A., Climente-Alarcon, V., Quijano-Lopez, A., Razik,
 H., Osornio-Rios, R. A., e Romero-Troncoso, R. D. J. (2018). Evaluation of the
 Detectability of Electromechanical Faults in Induction Motors Via Transient Analysis of
 the Stray Flux. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 54(5):4324–4332.
- Rao, B. R., e Tiwari, R. (2020). Detection of asymmetric transmission error in geared rotor system through transverse vibration analysis using full spectrum. *Propulsion and Power Research*, 9(3):255-280.
- Refaat, S. S., Abu-Rub, H., Saad, M. S., Aboul-Zahab, E. M., e Iqbal, A. (2013). Discrimination of stator winding turn fault and unbalanced supply voltage in permanent magnet synchronous motor using ANN. *International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives*, pp. 858–863.
- Salah, M., Bacha, K., e Chaari, A. (2014). An improved spectral analysis of the stray flux component for the detection of air-gap irregularities in squirrel cage motors. *ISA Transactions*, 53(3):816–826.
- Sanchez, J. A., Andrada, P., Blanque, B., e Torrent, M. (2020). Predictive Maintenance Plan for Switched Reluctance Motor Drives. *IEEE Latin America Transactions*, 18(1):67–74.
- Santos, D. C. (2020). Projeto e Implementação de um Sensor de Fluxo de Dispersão Interno para Avaliação de Falhas em Motores de Indução por Meio de Padrões de Órbitas Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de São João del-Rei: Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.
- Scheffer, C., e Girdhar, P. (2008). Machinery Vibration Analysis e Predictive Maintenance. Oxford: Newnes.
- Sharifi, R., e Ebrahimi, M. (2011). Detection of stator winding faults in induction motors using three-phase current monitoring. *ISA Transactions*, 50(1):14–20.
- Shravankumar, C., e Tiwari, R. A. J. I. V. (2016). Detection of a fatigue crack in a rotor system

using full-spectrum based estimation. *Sadhana - Academy Proceedings in Engineering Sciences*, 41(2):239–251.

- Siddiqui, K. M., Sahay, K., e Giri, V. (2014). Health monitoring and fault diagnosis in induction motor - A review. International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering, 3(1):6549–6565.
- Surya, G. N., Khan, Z. J., e Ballal, M. S. (2017). Radial flux signature analysis for identifying source unbalance and stator turn fault in cage motors using radial flux sensing coil. 1st IEEE International Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems, ICPEICES 2016, pp. 1-6.
- Tůma, J., e Biloš, J. (2007). Fluid Induced Instability of Rotor Systems with Journal Bearings. *Engineering Mechanics*, 14(1–2):69–80.
- Xu, G., Liu, M., Jiang,Z., Shen, W., e Huang C. (2019). Online Fault Diagnosis Method Based on Transfer Convolutional Neural Networks. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 69(2):509-520.
- Zaparoli, I. O. (2018). Análise do envelope do transitório da corrente para a detecção de curto entre espiras em motores de indução trifásicos. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de São João del-Rei: Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.
- Zaparoli, I. O., Rabelo Baccarini, L. M., Lamim Filho, P. C. M., e Batista, F. B. (2020). Transient envelope current analysis for inter-turn short-circuit detection in induction motor stator. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 42(2).