



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE SISTEMAS  
ELETRÔNICOS

VILSON GARCIA

**DETECÇÃO DE FALTAS EM MOTORES DE INDUÇÃO POR MEIO DE CAMPO  
MAGNÉTICO EXTERNO AUXILIADO POR CONVERSOR SIGMA-DELTA: ESTUDO  
EM ROTOR COM BARRAS ROMPIDAS**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Joinville  
2024



Vilson Garcia

**DETECÇÃO DE FALTAS EM MOTORES DE INDUÇÃO POR MEIO DE CAMPO  
MAGNÉTICO EXTERNO AUXILIADO POR CONVERSOR SIGMA-DELTA: ESTUDO  
EM ROTOR COM BARRAS ROMPIDAS**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Sistemas Eletrônicos da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Sistemas Eletrônicos.

Orientador: Prof. Diego Santos Greff, Dr.

Coorientadora: Profa. Aline Durrer Patelli Juliani, Dra.

Joinville

2024

Ficha catalográfica gerada por meio de sistema automatizado gerenciado pela BU/UFSC.  
Dados inseridos pelo próprio autor.

Garcia, Vilson

Detecção de faltas em motores de indução por meio de campo magnético externo auxiliado por conversor sigma delta : estudo em rotor com barras rompidas / Vilson Garcia ; orientador, Diegos Santos Greff, coorientadora, Aline Durrer Patelli Juliani, 2024.

112 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Joinville, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Sistemas Eletrônicos, Joinville, 2024.

Inclui referências.

1. Engenharia de Sistemas Eletrônicos. 2. Detecção de faltas. 3. Barras rompidas. 4. Campo magnético. 5. Monitoramento. I. Greff, Diegos Santos. II. Juliani, Aline Durrer Patelli. III. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Sistemas Eletrônicos. IV. Título.

Vilson Garcia

**Detecção de Falhas em Motores de Indução por meio de Campo Magnético Externo auxiliado por Conversor Sigma-Delta: Estudo em Rotor com Barras Rompidas**

O presente trabalho em nível de Mestrado foi avaliado e aprovado, em 23 de agosto de 2024, pela banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Diego Santos Greff, Dr.  
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Anderson Wedderhoff Spengler, Dr.  
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Ademir Nied, Dr  
Universidade do Estado de Santa Catarina

Certificamos que esta é a versão original e final do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Sistemas Eletrônicos.

---

Coordenação do Programa de  
Pós-Graduação

---

Prof. Diego Santos Greff, Dr.  
Orientador

Joinville, 2024.



Este trabalho é dedicado à minha mãe, cujo amor incondicional e apoio constante foram fundamentais em minha jornada acadêmica. À minha família, pela compreensão e incentivo que tornaram possível a realização deste trabalho. Ao meu orientador, pela orientação sábia, paciência e inspiração ao longo deste caminho. E à minha coorientadora, pelo suporte valioso e contribuições significativas para o desenvolvimento desta pesquisa. A todos vocês, minha gratidão eterna.



## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço em primeiro lugar a Deus, por guiar meus passos, conceder-me sabedoria e iluminar meu caminho ao longo desta jornada acadêmica. Sou grato pelas bênçãos recebidas e pela oportunidade de alcançar este objetivo.

À minha mãe, cujo amor inabalável, apoio incondicional e inspiração foram meu alicerce durante todo o percurso. Sua presença constante e seus ensinamentos foram fundamentais para minha formação como pessoa e profissional. Obrigado por sempre acreditar em mim, mesmo quando eu duvidava.

Também expresso minha gratidão à minha família, especialmente ao meu pai Valdir por me ensinar a lutar pelos meus sonhos incansavelmente. Às minhas irmãs Valdicéia, Janine e Jayne, pelo apoio constante, pelo companheirismo e pelo apoio incondicional. Vocês são meu porto seguro e minha fonte de alegria.

Expresso minha gratidão ao meu orientador, cuja orientação, conhecimento, dedicação e estímulo foram essenciais para o desenvolvimento deste trabalho. Sou imensamente grato pela oportunidade de aprender com você.

À minha coorientadora, expresso minha sincera gratidão pelo valioso apoio e pelas contribuições significativas ao longo deste processo. Sua colaboração foi essencial para o aprimoramento deste trabalho.

Por fim, estendo meu agradecimento a todos que, de alguma forma, contribuíram para minha formação acadêmica, seja por meio de ensinamentos, apoio emocional ou colaboração nesta pesquisa.

Este trabalho é resultado não apenas do meu esforço, mas também da contribuição de cada um de vocês. Vocês são parte fundamental desta conquista. Obrigado pelo apoio, pela amizade, pela torcida e por fazerem parte desta conquista!



“Faça o teu melhor, na condição que você tem, enquanto você não tem condições melhores, para fazer  
melhor ainda!”  
(Mario Sergio Cortella)



## RESUMO

Os motores de indução são amplamente utilizados em diversas aplicações industriais. Embora sejam robustos, versáteis e confiáveis, ainda estão suscetíveis a faltas. Por isso, sistemas de monitoramento têm se tornado os dispositivos mais apropriados para o supervisionamento de motores elétricos. O campo magnético externo ao motor pode revelar, em seu conteúdo harmônico, informações sobre a presença de faltas, que podem evoluir e se transformar em potenciais falhas elétricas e/ou mecânicas. Este trabalho visa desenvolver um sensor não invasivo para o monitoramento contínuo do campo magnético externo ao motor, permitindo identificar faltas em motores de indução trifásicos de baixa tensão. Inicialmente, é feita uma revisão sobre indicadores de faltas e métodos de monitoramento das condições de máquinas elétricas rotativas. São apresentados os princípios do campo magnético para identificar as melhores regiões para posicionamento da bobina, discutidos os métodos de amostragem, a qual optou-se pelo sigma-delta, e é realizada a análise do sinal. Uma configuração foi implementada para a realização dos ensaios experimentais, incluindo um freio de *prony* para aplicar carga ao eixo do motor. Por fim, foram realizados furos em algumas barras do rotor para simular uma falta e realizar os ensaios de detecção de barras rompidas. Nos ensaios com diferentes níveis de tensão de alimentação e carga aplicados ao eixo, o sensor mostrou-se promissor. Foi possível identificar alterações no espectro do campo magnético e detectar a falta por meio da Distorção Harmônica Total (THD), calculando-a e comparando-a nos casos de um motor íntegro e com a presença de faltas.

**Palavras-chave:** Campo magnético. Sensores. Monitoramento. Faltas. Sigma-Delta.



## ABSTRACT

Induction motors are widely used in various industrial applications. Although they are robust, versatile, and reliable, they are still susceptible to faults. Therefore, monitoring systems have become the most appropriate devices for the supervision of electric motors. The external magnetic field of the motor can reveal, through its harmonic content, information about the presence of faults that can evolve into potential electrical and/or mechanical failures. This work aims to develop a non-invasive sensor for continuous monitoring of the external magnetic field of the motor, enabling the identification of faults in low-voltage three-phase induction motors. Initially, a review is conducted on fault indicators and condition monitoring methods for rotating electric machines. The principles of the magnetic field are presented to identify the best regions for coil placement, sampling methods are discussed, with sigma-delta being chosen, and signal analysis is performed. A configuration was implemented to carry out experimental tests, including a Prony brake to apply load to the motor shaft. Finally, holes were drilled in some rotor bars to simulate a fault and conduct the broken bar detection tests. In the tests with different levels of supply voltage and load applied to the shaft, the sensor proved to be promising. It was possible to identify changes in the magnetic field spectrum and detect the fault through the Total Harmonic Distortion (THD), calculating and comparing it in cases of a healthy motor and one with faults.

**Keywords:** Magnetic field. Sensors. Monitoring. Faults. Sigma-Delta.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Fontes de faltas em motores de indução. . . . .	35
Figura 2.2 – Distribuição percentual dos pontos de faltas mais frequentes em motores de indução. . . . .	35
Figura 2.3 – Classificação das faltas em motores de indução trifásicos. . . . .	37
Figura 2.4 – Representação das diferentes formas de faltas de curto-circuito no estator. . . . .	38
Figura 2.5 – Faltas em rotores do tipo gaiola de esquilo: (a) barras rompidas; (b) anel de curto-circuito rompido. . . . .	39
Figura 2.6 – Elementos de um rolamento. . . . .	41
Figura 2.7 – Tipos de excentricidades em um motor: (a) estática; (b) dinâmica; (c) mista. . . . .	42
Figura 2.8 – Tipos de desalinhamento em um motor. . . . .	43
Figura 2.9 – Desbalanceamento de massa. . . . .	44
Figura 3.1 – Distribuição de linhas de fluxo de dispersão em uma máquina elétrica.	51
Figura 3.2 – Esquemático das linhas de campo axiais. . . . .	52
Figura 3.3 – Esquemático das linhas de campo radiais. . . . .	52
Figura 3.4 – Componentes do campo magnético. . . . .	52
Figura 3.5 – Princípio de funcionamento do transdutor magneto-resistivo. . . . .	54
Figura 3.6 – Princípio de funcionamento do transdutor de efeito <i>Hall</i> . . . . .	54
Figura 3.7 – Esquemático da tensão induzida em uma bobina submetida a um campo magnético. . . . .	56
Figura 3.8 – Transdutor tipo bobina comercial da empresa <i>Rohde&amp;Schwarz</i> . . . . .	56
Figura 3.9 – Transdutor tipo bobina desenvolvido no âmbito acadêmico. . . . .	57
Figura 3.10 – Regiões para o posicionamento do transdutor de medição do fluxo magnético. . . . .	58
Figura 4.1 – Diagrama da primeira versão sensor de detecção de faltas. . . . .	61
Figura 4.2 – Versão inicial do suporte para a bobina projetado no <i>software Solidworks</i> , apresentado em diversas perspectivas. . . . .	62
Figura 4.3 – Versão inicial do transdutor fabricado. . . . .	63
Figura 4.4 – Representação dos termos empregados na equação para a estimativa da indutância de uma bobina com múltiplas espiras. . . . .	64
Figura 4.5 – Medidor ponte LCR de bancada modelo <i>7200</i> da marca <i>Twintex</i> e as medições realizadas no equipamento. . . . .	65
Figura 4.6 – Medidor ponte RLC portátil modelo <i>510</i> da marca <i>Icel</i> e as medições efetuadas a 1khz no equipamento: (a) indutância, (b) capacitância, (c) resistência. . . . .	65

Figura 4.7 – Segunda versão dos suportes para as bobinas de 3 cm, 4 cm e 5 cm, desenvolvidos no <i>software SolidWorks</i> . . . . .	66
Figura 4.8 – Transdutores fabricados por meio de impressão 3D. . . . .	67
Figura 4.9 – Região de posicionamento do transdutor para condução dos ensaios. . . . .	67
Figura 4.10 – Circuito amplificador inversor com ajuste de <i>offset</i> . . . . .	69
Figura 4.11 – Placa de desenvolvimento <i>NodeMCU</i> . . . . .	69
Figura 4.12 – Módulo <i>MPU-9250</i> (acelerômetro, giroscópio e magnetômetro). . . . .	70
Figura 4.13 – Faces superior e inferior da PCB desenvolvida. . . . .	71
Figura 4.14 – Vista superior e inferior da primeira versão do dispositivo desenvolvido. . . . .	71
Figura 4.15 – <i>AURIX™ TC375 Lite Kit V2 – Infineon Technologies</i> . . . . .	72
Figura 4.16 – Vista superior da configuração completa. . . . .	75
Figura 4.17 – Esquemático do freio de <i>Prony</i> . . . . .	76
Figura 4.18 – Rotores com diferentes números de barras rompidas. . . . .	77
Figura 5.1 – Primeiro ensaio realizado com o sensor, sendo o motor alimentado com 220V e sem carga aplicada ao eixo. . . . .	79
Figura 5.2 – Segundo ensaio realizado com o sensor, sendo o motor alimentado com 220V e sem carga aplicada ao eixo. . . . .	80
Figura 5.3 – Terceiro ensaio realizado com o sensor, sendo o motor alimentado com 220V e sem carga aplicada ao eixo. . . . .	80
Figura 5.4 – Quarto ensaio realizado com o sensor, sendo o motor alimentado com 220V e sem carga aplicada ao eixo. . . . .	80
Figura 5.5 – Quinto ensaio realizado com o sensor, sendo o motor alimentado com 220V e sem carga aplicada ao eixo. . . . .	81
Figura 5.6 – Sinais de tensão induzida com o motor alimentado a 220V e sem carga no eixo. . . . .	86
Figura 5.7 – Sinais de tensão induzida com o motor alimentado a 220V e com uma carga de 1kg. . . . .	87
Figura 5.8 – Sinais de tensão induzida com o motor alimentado a 220V e com uma carga de 2kg. . . . .	87
Figura 5.9 – Sinais de tensão induzida com o motor alimentado a 220V e com uma carga de 3kg. . . . .	87
Figura 5.10 – Sinais de tensão induzida com o motor alimentado a 220V e com uma carga de 4kg. . . . .	88
Figura 5.11 – Sinais de tensão induzida com o motor alimentado a 220V e com uma carga de 5kg. . . . .	88
Figura 5.12 – Espectro em frequência para um ciclo do sinal de tensão induzida, com o motor alimentado a 220V e sem carga no eixo. . . . .	89

Figura 5.13 – Espectro em frequência para um ciclo do sinal de tensão induzida, com o motor alimentado a 220V e com uma carga de 1kg. . . . .	89
Figura 5.14 – Espectro em frequência para um ciclo do sinal de tensão induzida, com o motor alimentado a 220V e com uma carga de 2kg. . . . .	90
Figura 5.15 – Espectro em frequência para um ciclo do sinal de tensão induzida, com o motor alimentado a 220V e com uma carga de 3kg. . . . .	90
Figura 5.16 – Espectro em frequência para um ciclo do sinal de tensão induzida, com o motor alimentado a 220V e com uma carga de 4kg. . . . .	90
Figura 5.17 – Espectro em frequência para um ciclo do sinal de tensão induzida, com o motor alimentado a 220V e com uma carga de 5kg. . . . .	91
Figura 5.18 – Espectro em frequência para três ciclos do sinal de tensão induzida, com o motor alimentado a 220V e sem carga no eixo. . . . .	91
Figura 5.19 – Espectro em frequência para três ciclos do sinal de tensão induzida, com o motor alimentado a 220V e com uma carga de 1kg. . . . .	91
Figura 5.20 – Espectro em frequência para três ciclos do sinal de tensão induzida, com o motor alimentado a 220V e com uma carga de 2kg. . . . .	92
Figura 5.21 – Espectro em frequência para três ciclos do sinal de tensão induzida, com o motor alimentado a 220V e com uma carga de 3kg. . . . .	92
Figura 5.22 – Espectro em frequência para três ciclos do sinal de tensão induzida, com o motor alimentado a 220V e com uma carga de 4kg. . . . .	92
Figura 5.23 – Espectro em frequência para três ciclos do sinal de tensão induzida, com o motor alimentado a 220V e com uma carga de 5kg. . . . .	93



## LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 – Parâmetros medidos e calculados da versão inicial do transdutor construído. . . . .	65
Tabela 4.2 – Parâmetros medidos da segunda versão de transdutores construídos. . . . .	67
Tabela 4.3 – Valores de tensão obtidos nos testes da segunda versão de transdutores. . . . .	68
Tabela 4.4 – Limites de Distorção de Tensão de acordo com o Padrão <i>IEEE 519-214</i> . . . . .	74
Tabela 5.1 – Grandezas medidas com a segunda versão do transdutor, durante operação do motor com o rotor íntegro. . . . .	83
Tabela 5.2 – Grandezas medidas com a segunda versão do transdutor, durante operação do motor com 1 barra do rotor rompida. . . . .	84
Tabela 5.3 – Grandezas medidas com a segunda versão do transdutor, durante operação do motor com 3 barras do rotor rompidas. . . . .	85
Tabela 5.4 – Distorção Harmônica Total (THD) para um ciclo de rede. . . . .	94
Tabela 5.5 – Distorção Harmônica Total (THD) para três ciclos de rede. . . . .	94



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas . . . . .	33
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i> . . . . .	45
WT	<i>Wavelet Transform</i> . . . . .	45
MCSA	<i>Motor Current Signature Analysis</i> . . . . .	46
RNA	Redes Neurais Artificiais . . . . .	46
SIF	Sistema de Inferência Fuzzy . . . . .	46
AG	Algoritmos Genéticos . . . . .	46
DCO	Decomposição em Componentes Ortogonais . . . . .	47
SI	Sistema Internacional . . . . .	64
AD	Analógico/Digital . . . . .	68
MEMS	<i>Micro-Electro-Mechanical Systems</i> . . . . .	70
PCB	<i>Printed Circuit Board</i> . . . . .	70
DHT	<i>Distorção Harmônica Total</i> . . . . .	73
THD	<i>Total Harmonic Distortion</i> . . . . .	73
GREEN	Grupo de Energias Renováveis . . . . .	75



## LISTA DE SÍMBOLOS

$\vec{E}$	Intensidade de campo elétrico . . . . .	55
$\vec{B}$	Densidade de fluxo magnético . . . . .	55



## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>29</b>
1.1	OBJETIVOS	29
1.1.1	<b>Objetivo Geral</b>	<b>29</b>
1.1.2	<b>Objetivos Específicos</b>	<b>30</b>
1.2	CONTRIBUIÇÕES DO TRABALHO	30
1.3	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	31
<b>2</b>	<b>FALTAS EM MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS</b>	<b>33</b>
2.1	DISTINÇÃO ENTRE CONDIÇÕES DE FALTA E FALHA	33
2.2	ORIGENS E ESTIMATIVAS RELATIVAS ÀS FALTAS	34
2.3	CLASSIFICAÇÃO DAS FALTAS	36
2.4	FALTAS ELÉTRICAS	37
2.4.1	<b>Faltas no estator</b>	<b>37</b>
2.4.2	<b>Faltas no rotor</b>	<b>39</b>
2.4.3	<b>Faltas na fonte de alimentação</b>	<b>40</b>
2.5	FALTAS MECÂNICAS	41
2.5.1	<b>Faltas em rolamentos</b>	<b>41</b>
2.5.2	<b>Faltas no rotor</b>	<b>42</b>
2.6	MÉTODOS DE DETECÇÃO E DIAGNÓSTICO DE FALTAS - O ESTADO DA ARTE	45
2.7	CONCLUSÃO	48
<b>3</b>	<b>O CAMPO MAGNÉTICO EXTERNO</b>	<b>51</b>
3.1	TRANSDUTORES MAGNÉTICOS PARA MEDIÇÃO DO FLUXO MAGNÉTICO	53
3.1.1	<b>Transdutor magneto-resistivo</b>	<b>53</b>
3.1.2	<b>Transdutor de efeito <i>Hall</i></b>	<b>54</b>
3.1.3	<b>Transdutor do tipo bobina</b>	<b>55</b>
3.2	MELHORES REGIÕES PARA O POSICIONAMENTO DO TRANSDUTOR AO REDOR DA MÁQUINA	58
3.3	CONCLUSÃO	59
<b>4</b>	<b>DESENVOLVIMENTO DO SENSOR E PREPARAÇÃO PARA OS ENSAIOS</b>	<b>61</b>
4.1	DESENVOLVIMENTO DAS BOBINAS (TRANSDUTORES)	62
4.2	AQUISIÇÃO E PRÉ-PROCESSAMENTO DO SINAL	68
4.3	PROCESSAMENTO DOS DADOS E DETECÇÃO DAS FALTAS	73
4.3.1	<b>Distorção Harmônica Total (DHT)</b>	<b>73</b>
4.4	CONFIGURAÇÃO DESENVOLVIDA PARA OS ENSAIOS	74
4.4.1	<b>Freio de <i>Prony</i></b>	<b>76</b>
4.5	SIMULAÇÃO DE FALTAS NO MOTOR	76

4.6	CONCLUSÃO . . . . .	77
<b>5</b>	<b>RESULTADOS EXPERIMENTAIS . . . . .</b>	<b>79</b>
5.1	VERSÃO INICIAL DO SENSOR . . . . .	79
5.2	SEGUNDA VERSÃO DO SENSOR . . . . .	81
5.2.1	<b>Grandezas mensuradas nos ensaios com motor íntegro, 1 barra rompida e 3 barras rompidas . . . . .</b>	<b>82</b>
5.2.2	<b>Comparação pelas formas de onda da tensão induzida . . . . .</b>	<b>86</b>
5.2.3	<b>Comparação do espectro harmônico para um e três ciclos de tensão induzida . . . . .</b>	<b>88</b>
5.2.4	<b>Comparação por THD entre os espectros com e sem falta . . . . .</b>	<b>93</b>
5.3	CONCLUSÃO . . . . .	94
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO . . . . .</b>	<b>97</b>
	<b>REFERÊNCIAS . . . . .</b>	<b>99</b>
	<b>APÊNDICE A – PRINCÍPIOS FUNDAMENTAIS DOS MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS . . . . .</b>	<b>105</b>
	<b>APÊNDICE B – ENSAIOS REALIZADOS . . . . .</b>	<b>111</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O motor de indução trifásico é essencial na indústria moderna, desempenhando um papel crítico em diversas aplicações industriais e comerciais (TAVNER, 2008). Nos últimos anos, o setor industrial brasileiro emergiu como um dos maiores consumidores de energia elétrica do país, representando aproximadamente 40% do consumo total. Cerca de 68% desse consumo energético industrial é destinado à alimentação de motores elétricos, tornando-os componentes cruciais e suscetíveis a desperdícios quando não operam eficientemente (WEG, 2019).

Apesar de sua robustez, versatilidade e confiabilidade, os motores de indução não estão isentos de vulnerabilidades, tanto elétricas quanto mecânicas (VICENTE, 2021). Uma falta incipiente pode reduzir a taxa de produção e aumentar os custos de manutenção, podendo evoluir e levar à paralisação de um processo produtivo completo. As perdas na produção e os custos de manutenção para correção de faltas representam um ônus considerável (ESEN; ÖZDEMIR, 2017).

O campo magnético externo a um motor de indução trifásico pode fornecer informações valiosas em seu conteúdo harmônico, revelando a qualidade da energia fornecida ao motor e indicando potenciais falhas elétricas e/ou mecânicas futuras. Ceban, Pusca e Romary (2012) destacam que os métodos convencionais para diagnóstico de máquinas elétricas, baseados em medições de tensão, corrente, vibração e ruído, têm aplicação limitada devido ao custo elevado.

Em contrapartida, métodos baseados na medição do campo magnético fora da máquina apresentam baixo custo, facilidade de implementação e não invasividade, tornando-os alternativas atrativas. Portanto, este trabalho visa desenvolver um sensor não invasivo, capaz de monitorar continuamente o campo magnético externo ao motor de indução trifásico. Dessa forma, a gestão de manutenção poderá utilizar essas informações para planejar intervenções preditivas, otimizando a operação e prolongando a vida útil dos motores.

### 1.1 OBJETIVOS

Nas seções abaixo estão descritos o objetivo geral e os objetivos específicos.

#### 1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo geral desta pesquisa é desenvolver um sensor destinado à identificação de faltas em motores de indução trifásicos de baixa tensão, por meio da análise do campo magnético externo.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos da pesquisa são:

- Realizar um estudo bibliográfico sobre os principais tipos de faltas em motores de indução trifásicos de baixa tensão, suas causas e os métodos mais aplicados para detecção destas;
- Definir um método para detecção de faltas que atenda aos requisitos: baixo custo, não ser invasivo e facilidade de escalabilidade e implementação;
- Conceber e implementar o *hardware* necessário para a detecção de faltas, e que atenda aos requisitos desta pesquisa;
- Desenvolver o código em linguagem *Python* destinado à aquisição de dados e à sua transmissão eficiente para um sistema computacional;
- Desenvolver a configuração completa para a realização de ensaios em bancada;
- Realizar a validação por meio de ensaios experimentais em bancada.

## 1.2 CONTRIBUIÇÕES DO TRABALHO

Esta dissertação apresenta contribuições significativas no campo da detecção de faltas em motores de indução, especialmente através da utilização de campo magnético externo auxiliados por microcontroladores com conversor Sigma-Delta. As principais contribuições deste trabalho podem ser resumidas nos seguintes pontos, os quais serão apresentados a seguir.

O primeiro artigo, intitulado "*Induction Motor Fault Detection through External Magnetic Field Aided by Sigma-Delta Microcontroller: Rotor Broken Bar Study*" (GARCIA et al., 2023a), apresentado no CoDIT 2023, aborda a identificação de faltas em motores de indução focando em um problema específico: a detecção de barras quebradas no rotor. Este estudo introduz uma abordagem inovadora utilizando um microcontrolador com conversor Sigma-Delta para medir o campo magnético externo do motor.

O segundo artigo, intitulado "*Non-Invasive Fault Detection Through External Magnetic Field Aided by Sigma-Delta Microcontroller*" (GARCIA et al., 2023b), apresentado no SPEC/COBEP 2023, apresenta uma abordagem inicial para uma gama mais ampla de faltas em motores de indução.

Essas contribuições representam avanços significativos na área de manutenção preditiva de motores de indução, oferecendo soluções práticas e inovadoras que podem ser facilmente integradas aos sistemas industriais existentes. A utilização de conversor Sigma-Delta para a medição de campos magnéticos externos proporciona

uma abordagem não-invasiva, eficiente e precisa, que tem o potencial de melhorar significativamente a confiabilidade e a eficiência das operações industriais.

### 1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

No Capítulo 2, inicialmente é apresentada a distinção entre faltas e falhas, sendo posteriormente realizada uma revisão abrangente do estado da arte sobre faltas em máquinas elétricas, abordando os diferentes tipos de faltas, suas causas e origens. Também é apresentada uma classificação dos métodos mais comuns de detecção e diagnóstico dessas faltas.

O Capítulo 3 oferece uma análise detalhada do princípio do campo eletromagnético externo e dos tipos de transdutores que podem ser utilizados para medir o fluxo de dispersão, com um foco especial nos transdutores do tipo bobina e nas áreas ideais para posicioná-los ao redor do motor.

No Capítulo 4, é descrito minuciosamente todo o *hardware* desenvolvido. São apresentadas a primeira versão do transdutor do tipo bobina e a placa de circuito impresso que integra todo o *hardware*. Além disso, cada subsistema que compõe o sensor, incluindo os sistemas de amplificação e correção de *offset*, é discutido. A segunda versão do sensor é também mencionada, destacando todas as modificações em relação à primeira versão. A configuração desenvolvida para os ensaios e as alterações realizadas no motor para possibilitar a simulação das faltas também são abordados.

Finalmente, no Capítulo 5, são apresentados os resultados obtidos com o sensor desenvolvido, levando em conta diferentes níveis de carga e tensão de alimentação aplicados ao motor de indução trifásico.



## 2 FALTAS EM MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS

Neste capítulo, uma análise abrangente das faltas será realizada, considerando-se as mais frequentes, bem como suas origens e características únicas. Cada categoria de falta será examinada em detalhes, proporcionando uma compreensão aprofundada de seus impactos e manifestações.

Além disso, serão apresentados os métodos mais predominantes para detecção e diagnóstico dessas faltas. Para aqueles que buscam uma compreensão mais aprofundada dos motores de indução trifásicos, no Apêndice A encontra-se uma revisão concisa abordando os tipos de motores elétricos, suas características e o princípio de funcionamento específico dos motores de indução trifásicos.

### 2.1 DISTINÇÃO ENTRE CONDIÇÕES DE FALTA E FALHA

A NBR 5462 (ABNT, 1994) é uma norma brasileira que trata da confiabilidade e manutenibilidade de sistemas, equipamentos e processos. Publicada pela Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT, esta norma é essencial para profissionais envolvidos com engenharia de manutenção, gestão de ativos, e garantia de qualidade em setores industriais.

Essa norma define termos e conceitos fundamentais, incluindo a distinção entre falta e falha, que é abordada na seção 2 da norma. Essa seção é dedicada a definir os termos utilizados para descrever eventos e condições relacionados à confiabilidade e manutenção de equipamentos.

Conforme estabelecido na NBR 5462 (ABNT, 1994), a diferença entre as condições de falta e falha é descrita da seguinte forma:

- **Falta:** Qualquer desvio de uma característica de um item em relação aos seus requisitos. Em termos práticos, trata-se de uma condição de anormalidade na qual um item não está operando conforme o esperado, mas ainda não parou de funcionar completamente. Faltas podem ser identificadas através de inspeções ou testes, e, se não forem corrigidas, podem eventualmente evoluir para uma falha.
- **Falha:** Término da capacidade de um item desempenhar a função requerida. Em outras palavras, ocorre quando o sistema, componente ou equipamento perde completamente a sua capacidade de operar, resultando na interrupção total de sua função.

Resumidamente, na NBR 5462, a falta é vista como um estágio anterior à falha, onde o equipamento apresenta uma irregularidade, mas ainda não parou de funcionar. A falha, por sua vez, representa o estágio em que essa irregularidade evolui para uma interrupção total da função do equipamento.

Essa distinção é fundamental para compreender o objetivo do sensor desenvolvido neste trabalho, que é projetado para detectar faltas, ou seja, atuar no estágio anterior à ocorrência de uma falha. Além disso, o entendimento dessa diferença é essencial para a gestão eficiente de equipamentos e para o desenvolvimento de estratégias eficazes de manutenção.

## 2.2 ORIGENS E ESTIMATIVAS RELATIVAS ÀS FALTAS

Motores de indução são máquinas elétricas rotativas conhecidas por sua robustez e elevada tolerância, sendo amplamente utilizados na indústria. Idealmente, o motor elétrico, em sua concepção, deve apresentar simetria elétrica e mecânica tanto no estator quanto no rotor, a fim de proporcionar um acoplamento mais eficaz e maximizar a eficiência. Contudo, essa condição nem sempre é alcançada devido à incidência de faltas (IRHOUMAH, 2019).

A manutenção preditiva desempenha um papel fundamental na prevenção de faltas, permitindo a detecção antecipada de alterações e o diagnóstico do estado da máquina. As faltas em máquinas elétricas rotativas podem originar-se de diversas fontes, abrangendo desde problemas de projeto e imperfeições na fabricação até questões relacionadas à montagem, instalação, ambiente de operação, natureza da carga, sobrecarga e cronograma de manutenção (IRHOUMAH, 2019) (MENEGAT, 2014).

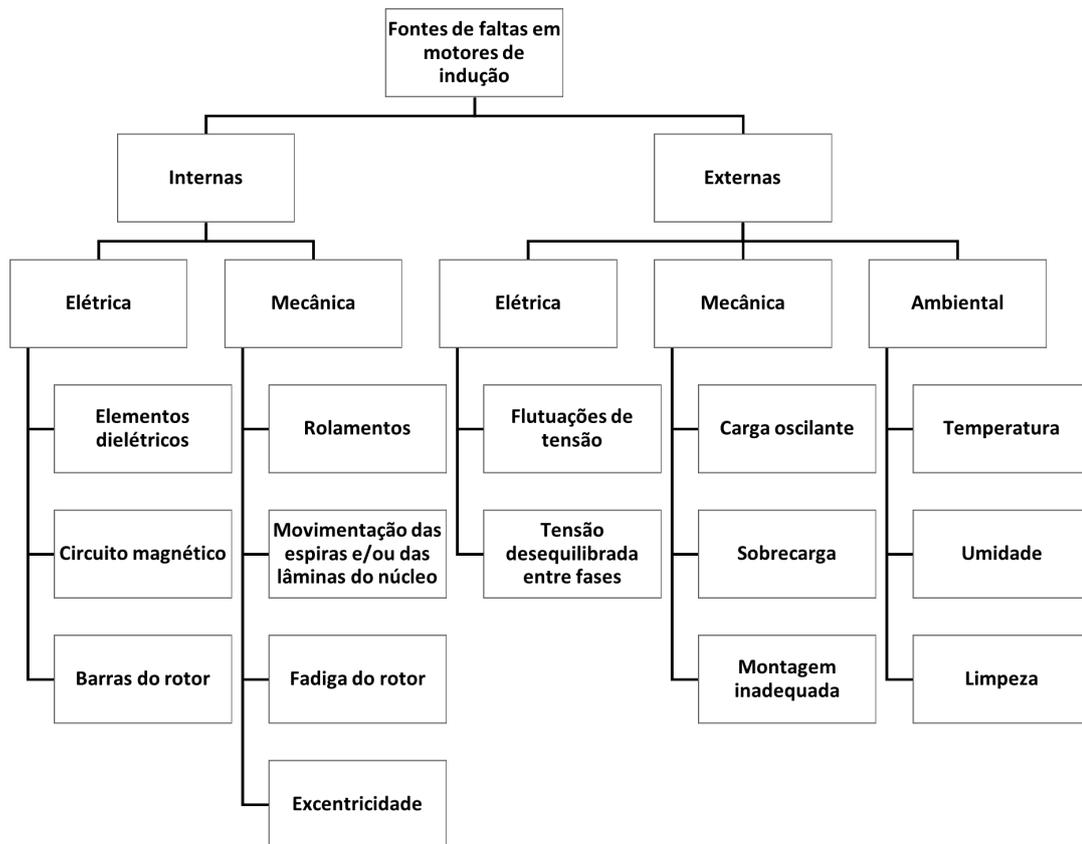
As máquinas elétricas rotativas, incluindo os motores de indução, estão sujeitos a forças mecânicas e eletromagnéticas. Assim, para garantir uma operação estável com o mínimo de ruídos e vibrações, seu projeto deve assegurar uma interação equilibrada entre essas forças, sob condições ideais de instalação e operação. Na ocorrência de faltas, o desequilíbrio entre essas forças pode resultar em problemas mais significativos (MENEGAT, 2014).

As fontes de faltas em motores elétricos podem ser categorizadas como mecânicas, elétricas ou até mesmo ambientais, sendo esta última relacionada a fatores como temperatura, umidade e condições de limpeza no ambiente (MENEGAT, 2014). A Figura 2.1 ilustra as principais fontes de faltas em motores de indução.

Ao observar a Figura 2.1, percebe-se que as faltas internas têm origem nos próprios elementos da máquina, como os circuitos magnéticos do rotor e do estator, enrolamentos do estator, entreferro, gaiola do rotor, entre outros. Por outro lado, as faltas externas são ocasionadas por fatores vindos do ambiente externo, como as tensões de alimentação, carga mecânica e as condições ambientais de operação da máquina (IRHOUMAH, 2019).

A Figura 2.2 exibe uma compilação de um estudo realizado para identificar os principais pontos que apresentam faltas em motores elétricos. De acordo com Swarnkar, Rai e Wadhvani (2022), os resultados indicam que a maior proporção de faltas está nos rolamentos, representando cerca de quarenta por cento de todas as

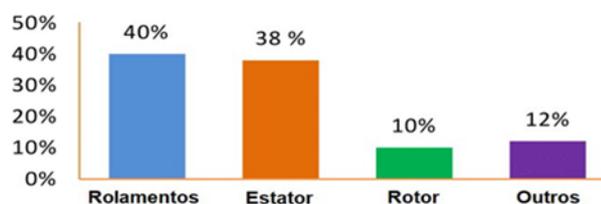
Figura 2.1 – Fontes de faltas em motores de indução.



Fonte: Adaptado de Sharma et al. (2015, p. 1145-1146).

faltas. Em seguida, faltas no estator contribuem com aproximadamente trinta e oito por cento, seguidas por barras quebradas no rotor, responsáveis por cerca de dez por cento das faltas.

Figura 2.2 – Distribuição percentual dos pontos de faltas mais frequentes em motores de indução.



Fonte: Adaptado de Swarnkar, Rai e Wadhvani (2022, p. 585).

Portanto, diversas pesquisas têm focado no estudo detalhado nesses pontos de faltas, visando aumentar o tempo médio entre faltas e, por conseguinte, a confiabilidade dos motores. Num motor defeituoso, a distribuição do fluxo magnético pode sofrer alterações significativas. Em situações em que o motor possui barras danificadas, o

padrão senoidal do campo magnético no rotor deixa de existir ao redor da circunferência do entreferro, devido à ausência de correntes induzidas nas barras danificadas. No caso de curto-circuito nos enrolamentos do estator, a simetria do campo magnético fica comprometida (MENEGAT, 2014).

A Figura 2.2 indica que as faltas mais comuns em motores de indução trifásicos geralmente estão associadas a problemas nos rolamentos e nos enrolamentos do estator. Neste trabalho, optou-se por focar na detecção de falhas no rotor, uma vez que elas são mais fáceis de identificar utilizando um sensor não invasivo.

A detecção de faltas nos rolamentos ou nos enrolamentos do estator exigiria o desenvolvimento de um sensor mais sofisticado, o que demandaria um tempo de desenvolvimento maior, inviável dentro do prazo deste trabalho de mestrado. Outro fator determinante foi a limitada disponibilidade de motores já apresentando problemas nos rolamentos ou enrolamentos do estator.

Para obter dados relacionados a faltas no estator, seria necessário ter acesso a motores com enrolamentos parcialmente defeituosos. Contudo, os motores disponíveis apresentavam enrolamentos totalmente deteriorados, inviabilizando seu funcionamento e, conseqüentemente, a detecção das faltas. Uma alternativa considerada foi a modificação de um motor funcional por uma empresa especializada, para introduzir diferentes níveis de curto-circuito nos enrolamentos do estator. No entanto, essa opção foi descartada devido ao alto custo, à quantidade limitada de motores disponíveis e ao tempo disponível para execução reduzido.

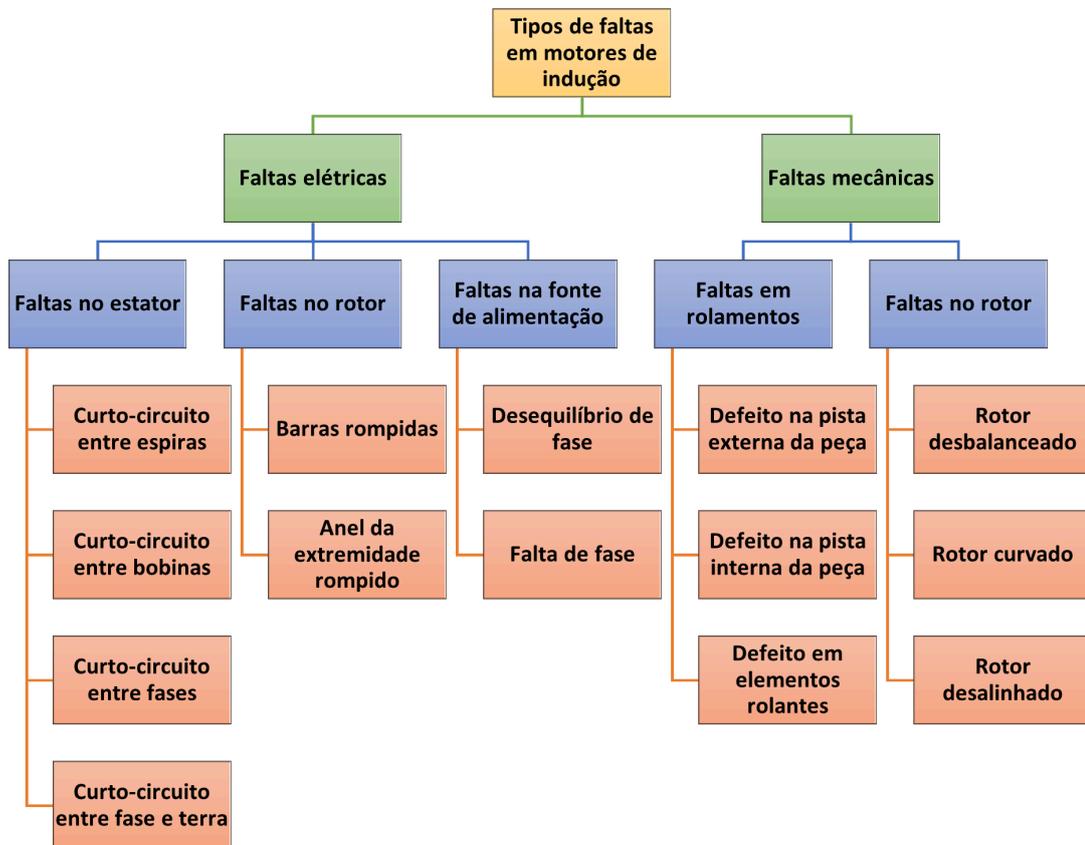
### 2.3 CLASSIFICAÇÃO DAS FALTAS

Segundo Swarnkar, Rai e Wadhwani (2022), as máquinas elétricas podem ser afetadas por uma variedade de faltas envolvendo aspectos elétricos, mecânicos ou uma combinação de ambos. A Figura 2.3 ilustra a classificação das faltas que podem ocorrer em um motor de indução trifásico.

No que tange a faltas de natureza elétrica, no rotor gaiola de esquilo destacam-se barras rompidas e anéis metálicos nas extremidades do rotor rompidos. Quanto ao estator, as faltas mais relevantes são nos enrolamentos, decorrentes de curtos-circuitos entre bobinas, tanto na mesma fase como entre fases diferentes. Essas faltas mencionadas são as principais, havendo diversas outras faltas secundárias (MENEGAT, 2014).

No aspecto mecânico, faltas primárias no rotor incluem excentricidade (estática ou dinâmica) e desalinhamento. No estator, problemas de excentricidade e folga no pacote de chapas também são observados. Ademais, as faltas nos rolamentos, que podem resultar em excentricidade do rotor, constituem uma parcela significativa das faltas em motores de indução. Defeitos como atritos no rotor e fadiga tanto no rotor quanto no estator derivam de faltas mencionadas anteriormente (MENEGAT, 2014).

Figura 2.3 – Classificação das faltas em motores de indução trifásicos.



Fonte: Adaptado de Swarnkar, Rai e Wadhvani (2022, p. 584).

## 2.4 FALTAS ELÉTRICAS

### 2.4.1 Faltas no estator

As faltas elétricas no estator de máquinas de indução trifásicas estão associadas aos enrolamentos, particularmente aos danos ao isolamento das bobinas. Devido ao seu considerável impacto prejudicial (KARMAKAR et al., 2016), essas faltas são bastante abordadas na literatura. Comumente denominada como falta de curto-circuito no estator, essa anomalia ocorre essencialmente devido ao deterioramento do isolamento dos condutores que constituem as bobinas. Conforme indicado por Irhoumah (2019), ela pode se manifestar de diferentes formas:

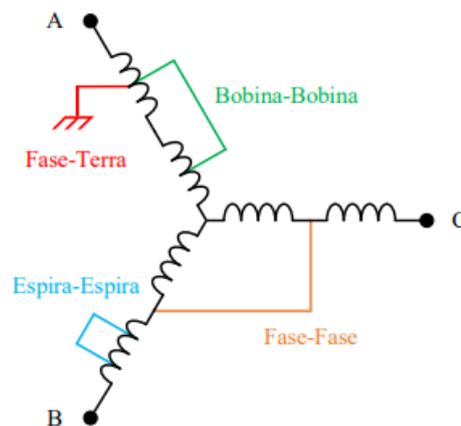
- **Curto-circuito entre espiras:** ocorre quando há ruptura no isolamento dos enrolamentos, resultando em curto-circuito devido ao contato direto entre espiras da mesma bobina. Esse contato anula a passagem de corrente pelas espiras em curto-circuito, reduzindo o número efetivo de espiras no enrolamento;
- **Curto-circuito entre bobinas:** consiste em um curto-circuito entre bobinas

pertencentes à mesma fase, manifestando-se nas cabeças de bobina ou dentro da ranhura;

- **Curto-circuito entre fases:** ocorre quando espiras ou bobinas de fases diferentes estão curto-circuitadas, tipicamente nas cabeças de bobina;
- **Curto-circuito entre fase e terra:** manifesta-se quando há contato entre os condutores do enrolamento e o núcleo do estator.

Na Figura 2.4, estão representadas as configurações das faltas de curto-circuito mencionadas anteriormente. Independentemente do tipo, essas faltas compartilham uma natureza similar, caracterizada pelo contato indesejado entre pontos do enrolamento. De maneira geral, essas faltas implicam na circulação indesejada de corrente nos enrolamentos, não contribuindo para a produção de torque do motor. Essa potência é dissipada como calor, configurando uma forma de perda. Portanto, é fundamental ressaltar que a severidade da falta aumenta proporcionalmente ao número de espiras em curto-circuito, à medida que a resistência do caminho de curto-circuito diminui, resultando no aumento da temperatura da máquina (FAIZ; GHORBANIAN; JOKSIMOVIĆ, 2017).

Figura 2.4 – Representação das diferentes formas de faltas de curto-circuito no estator.



Fonte: Souza (2022, p. 15).

Essas faltas podem surgir de diversas fontes, como sobrecargas, sobretensões, temperaturas elevadas, vibrações, desequilíbrio nas tensões de alimentação, instalação inadequada e até mesmo contaminação na parte interna da máquina (IRHOUMAH, 2019) (MORTAZAVIZADEH; MOUSAVI, 2014).

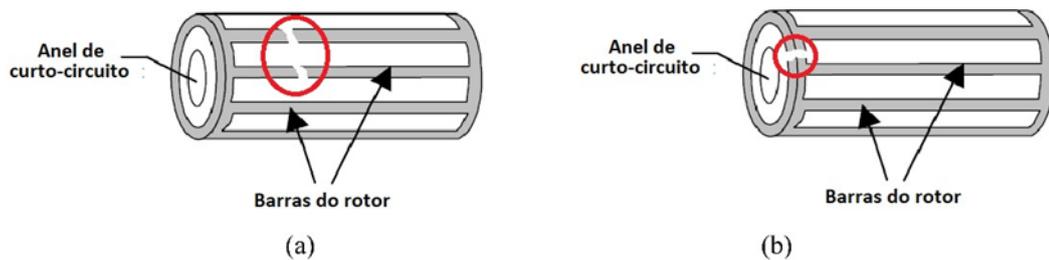
Faltas nos enrolamentos durante a operação do motor podem ocasionar em uma falha, levando a uma parada inesperada. A prevenção desse tipo de interrupção é uma preocupação significativa para fabricantes e usuários do motor, pois pode resultar em perda substancial de receita durante a parada, além de custos associados ao reparo ou

substituição. Assim, consideráveis esforços têm sido dedicados em pesquisas para a análise dos diversos aspectos das faltas de curto-circuito (IRHOUMAH, 2019) (TOLIYAT et al., 2012).

#### 2.4.2 Faltas no rotor

As faltas elétricas no rotor podem ser categorizadas como quebras de barra ou quebras de anel de curto-circuito, ambas ocorrendo com a mesma frequência, conforme indicado por Trigeassou (2013). Diversos fatores contribuem para a ocorrência dessas faltas, incluindo cargas oscilantes, montagem inadequada, partidas prolongadas ou frequentes, bem como defeitos de fabricação, podem enfraquecer os pontos de conexão entre as barras e os anéis terminais. Isso pode resultar em trincas, rachaduras ou quebras parciais ou totais das barras, não apenas na junção barra-anel, mas também em outros pontos da barra ou do anel (KAWASE et al., 2020) (FAIZ; GHORBANIAN; JOKSIMOVIĆ, 2017).

Figura 2.5 – Faltas em rotores do tipo gaiola de esquilo: (a) barras rompidas; (b) anel de curto-circuito rompido.



Fonte: Adaptado de Irhoumah (2019, p. 17).

Além das considerações operacionais e de montagem, o processo de fabricação do motor desempenha um papel fundamental no aumento da probabilidade de quebras. Durante a fundição do rotor, pode ocorrer contaminação do material ou formação de bolhas, resultando em barras com diferentes características elétricas e mecânicas (KAWASE et al., 2020). A desigualdade de dilatação entre as barras e os anéis, especialmente devido às correntes mais elevadas nos anéis de curto-circuito, e as forças centrífugas resultantes também podem contribuir para tensões adicionais nas barras do rotor (TOLIYAT et al., 2012).

Devido a esses fatores, as barras do rotor podem sofrer danos, como rachaduras ou rupturas, prejudicando a distribuição simétrica das correntes. Uma barra trincada tem um aumento significativo de temperatura, concentrando-se no local da trinca e potencialmente levando a uma ruptura total (KAWASE et al., 2020). Condições incipientes de barras quebradas, se não corrigidas, podem se agravar exponencialmente ao longo do tempo, afetando áreas adjacentes e barras laterais. Esse fenômeno pode

resultar na quebra de várias barras do rotor, impactando negativamente o desempenho da máquina (IRHOUMAH, 2019) (KARMAKAR et al., 2016).

Em síntese, a quebra de barra inicialmente impacta a distribuição espacial de corrente, resultando na distorção do campo magnético correspondente. O aumento da saturação magnética, causado pela sobrecorrente, provoca perdas locais e, conseqüentemente, elevação da temperatura em pontos específicos. Efetivamente, uma barra quebrada pode ser considerada como uma assimetria no rotor, gerando efeitos como desequilíbrio nas correntes de linha, redução do torque médio, pulsação da velocidade e do conjugado, além de vibrações (IRHOUMAH, 2019).

### 2.4.3 Faltas na fonte de alimentação

As faltas na fonte de alimentação de um sistema podem se apresentar de diversas formas, sendo duas delas: o desbalanceamento entre fases, caracterizado pelo desequilíbrio de carga entre as fases; e a falta de uma ou mais fases, indicando a ausência de alimentação em uma ou mais partes do sistema.

Os desequilíbrios de tensão induzem a circulação de correntes de sequência negativa nos motores de indução, resultando em aumentos nas perdas ôhmicas nos enrolamentos da máquina e gerando oscilações no torque, potência e velocidade. Esse cenário provoca um incremento na energia dissipada no cobre, elevando a temperatura das bobinas e acelerando a degradação do isolamento estator. Contudo, as maiores perdas não são acompanhadas por aumentos significativos na corrente de entrada, o que pode dificultar a detecção por algumas proteções contra sobrecorrente (DONOLO; BOSSIO; ANGELO, 2011).

Além disso, o desequilíbrio de tensão no estator altera a resistência de sequência negativa no modelo matemático do rotor do motor, ocasionando aquecimentos localizados em curtos períodos de tempo. Em máquinas do tipo gaiola de esquilo, a resistência de sequência negativa é aproximadamente cinco vezes maior do que a resistência de sequência positiva (DONOLO; BOSSIO; ANGELO, 2011).

Os desequilíbrios são caracterizados por magnitudes de tensão desiguais na frequência fundamental do sistema, ou seja, subtensões e sobretensões, além de desvios no ângulo de fase. A irregularidade na distribuição de cargas monofásicas na rede, que pode variar constantemente em um sistema trifásico, é uma das principais causas desse fenômeno. Outras razões incluem assimetrias nas impedâncias dos enrolamentos dos transformadores, linhas de transmissão desbalanceadas, fusíveis queimados em bancos de capacitores trifásicos e mau contato em condutores elétricos (JOUANNE; BANERJEE, 2001).

Por outro lado, a ausência de uma ou mais fases pode resultar na interrupção total ou parcial da operação, demandando atenção imediata para evitar danos mais graves e garantir a continuidade do funcionamento adequado do sistema elétrico. Es-

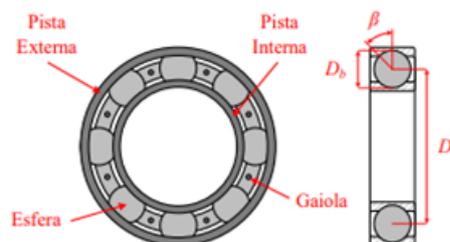
As faltas elétricas demandam monitoramento constante e medidas preventivas para assegurar a estabilidade e a confiabilidade do sistema.

## 2.5 FALTAS MECÂNICAS

### 2.5.1 Faltas em rolamentos

Os rolamentos são utilizados para suportar o rotor em máquinas elétricas, exercendo a função de sustentar o rotor na carcaça e minimizar o atrito durante o funcionamento dos motores. Nesse contexto, a dissipação de energia resultante da fricção desempenha um papel significativo nos parâmetros de eficiência do motor (HASAN; ISLAM; KIM, 2019) (WANG et al., 2017). Os componentes dos rolamentos compreendem a pista externa, pista interna, elemento rolante e gaiola, conforme exemplificado na Figura 2.6.

Figura 2.6 – Elementos de um rolamento.



Fonte: Adaptado de Boudinar et al. (2016, p. 3852).

Devido às cargas contínuas ou desalinhamentos do eixo, esses componentes frequentemente sofrem deterioração, manifestando-se em desgastes abrasivos nas pistas e esferas, fissuras, descamações e indentações, podendo comprometer o desempenho global da máquina (LIU; ZHANG, 2020). Nesse cenário, os danos aos rolamentos são classificados em duas categorias distintas: localizados, quando ocorrem em pontos específicos da peça, como rachaduras e lascas; e distribuídos, que impactam toda a superfície do rolamento, como abrasão e oxidação (ZHANG et al., 2020).

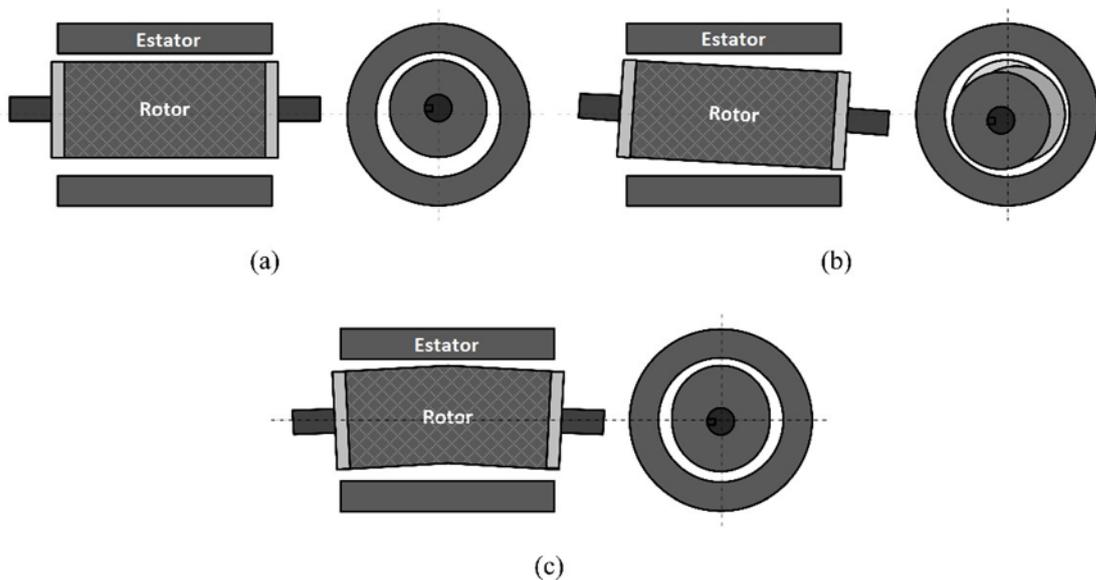
Esses danos nos rolamentos ocasionam distúrbios característicos no espectro de frequências da corrente do estator (NATH et al., 2020) (BOUDINAR et al., 2016). As faltas distribuídas podem impactar todo o espectro da corrente, tornando desafiadora a sua caracterização por meio de análise comparativa de frequências. No entanto, os danos localizados são mais facilmente identificados, pois estão associados a defeitos pontuais específicos (PANDARAKONE; MIZUNO; NAKAMURA, 2017).

### 2.5.2 Falhas no rotor

Faltas mecânicas no rotor de motores de indução trifásicos compreendem o desbalanceamento, que ocasiona uma distribuição desigual de massa no rotor; deformação ou curvatura no cilindro do rotor, denominada excentricidade; e desalinhamento, quando as partes do motor não estão adequadamente alinhadas. Essas questões têm o potencial de afetar consideravelmente o desempenho e a eficiência operacional do motor.

A excentricidade da máquina refere-se à condição de desigualdade no entreferro, que ocorre quando a distância entre o estator e o rotor não é uniforme. Nesse cenário, as indutâncias variáveis resultam em um fluxo magnético desequilibrado, originando harmônicos de falta na corrente de linha, identificáveis no espectro de frequências. Existem três tipos principais de faltas de excentricidade: estática, dinâmica e mista (TOLIYAT et al., 2012). A Figura 2.7 ilustra as excentricidades em um motor:

Figura 2.7 – Tipos de excentricidades em um motor: (a) estática; (b) dinâmica; (c) mista.



Fonte: Adaptado de Irhoumah (2019, p. 18).

A excentricidade estática pode surgir devido à ovalização do núcleo magnético do estator ou ao posicionamento incorreto do rotor ou estator. Se o conjunto rotor-eixo for suficientemente rígido, o nível de excentricidade estática permanece constante (SOUZA, 2022) (SAMONIG; WOLBANK, 2017).

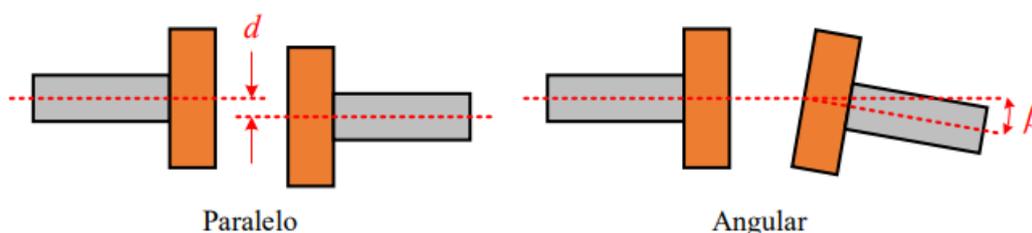
Diferentemente, na excentricidade dinâmica, o centro do rotor não coincide com o centro da rotação, e a posição mínima do entreferro gira com o movimento do eixo. Esse efeito pode ser desencadeado por diversos fatores, como torção no eixo do rotor, desgaste ou desalinhamento do rolamento, ressonância mecânica em velocidade

crítica, entre outros (SOUZA, 2022) (SAMONIG; WOLBANK, 2017).

Neste cenário, a presença simultânea de ambas as formas de excentricidade é referida como excentricidade mista. Tanto a excentricidade dinâmica quanto a estática coexistem em um motor, pois presumir a existência de uma condição central ideal seria imprudente. Além disso, a uniformidade no entreferro é uma característica inerente a qualquer máquina real (SAAD; IRFAN; IBRAHIM, 2018) (SAMONIG; WOLBANK, 2017).

Em contrapartida, o desalinhamento é definido pela ausência de alinhamento entre o eixo do motor e o dispositivo acionado em relação ao referencial central do sistema. Um alinhamento preciso do eixo contribui para a redução de forças axiais e radiais excessivas nas partes mais suscetíveis da estrutura da máquina, como rolamentos, vedações e acoplamentos. Apesar de ser possível assegurar um alinhamento preciso por meio de equipamentos de ajuste, como relógios comparadores e níveis a laser, manter essa condição por longos períodos na prática é um desafio (WANG et al., 2017) (LIM et al., 2010). Nesse contexto, o desalinhamento pode ocorrer de duas formas distintas: deslocamento paralelo ou angular, conforme ilustrado na Figura 2.8.

Figura 2.8 – Tipos de desalinhamento em um motor.



Fonte: Adaptado de Park et al. (2020, p. 1992).

Desalinhamentos causam oscilações no torque do motor e surgem devido a variações nas tolerâncias de fabricação, incluindo conformação, usinagem e acabamento das peças. Além disso, falhas operacionais em caixas de engrenagens ou correias, fixação inadequada do motor e posicionamento incorreto do conjunto eixo-acoplamento contribuem para esses desalinhamentos (SOUZA, 2022).

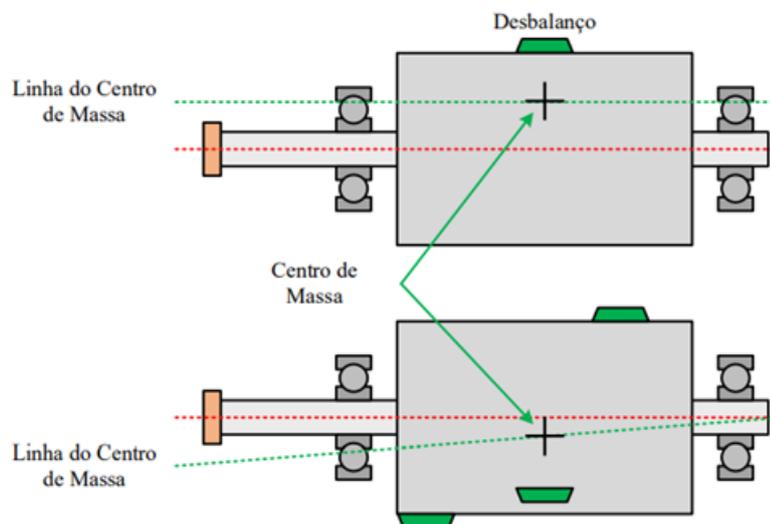
Para atenuar os efeitos do desalinhamento, é comum utilizar acoplamentos elásticos. Esses componentes conseguem lidar com pequenos desalinhamentos e amortecer perturbações na transmissão de energia entre os eixos. A incorporação desses acoplamentos ajuda a reduzir vibrações e tensões indesejadas em outros elementos da instalação. Embora melhorem significativamente o desempenho do sistema, desalinhamentos substanciais resultam em uma considerável redução na vida útil do motor. Além disso, afetam a eficiência da máquina devido ao aumento das perdas causadas pelo incremento da temperatura do acoplamento, resultante do atrito gerado

nas conexões (VERUCCHI et al., 2020).

O desbalanceamento de massa em um sistema rotativo provoca forças síncronas excessivas, levando à diminuição da vida útil de vários componentes mecânicos do motor. Mesmo uma pequena quantidade de desequilíbrio pode causar problemas sérios em altas velocidades, e as vibrações resultantes desse efeito têm o potencial de causar danos significativos aos principais elementos da máquina, como rolamentos, eixos, engrenagens e acoplamentos (SOUZA, 2022).

O desequilíbrio ocorre quando há disparidade no rotor, onde a linha do centro de massa não coincide com o centro geométrico, conforme ilustrado na Figura 2.9. Na prática, é desafiador alcançar um equilíbrio preciso nos rotores devido a imperfeições de fabricação como tolerâncias, porosidade na fundição e variação de densidade no material. Além disso, a expansão térmica pode influenciar o desalinhamento interno ou a flexão do eixo, contribuindo para o mesmo efeito (AMBUR; RINDERKNECHT, 2018) (RAHMAN; UDDIN, 2017).

Figura 2.9 – Desbalanceamento de massa.



Fonte: Adaptado de Karmakar et al. (2016, p. 15).

A presença de um desbalanceamento no rotor pode surgir devido à adição ou remoção de massa devido a erosões ao longo do eixo rotativo. Nesse cenário, a compensação do desequilíbrio pode ser obtida por meio da aplicação de pesos de balanceamento, resultando apenas em um pequeno erro residual dentro dos limites aceitáveis de vibração da máquina (GOHARI; EYDI, 2020) (AMBUR; RINDERKNECHT, 2018).

## 2.6 MÉTODOS DE DETECÇÃO E DIAGNÓSTICO DE FALTAS - O ESTADO DA ARTE

Frente às possíveis faltas discutidas anteriormente, torna-se evidente a necessidade de desenvolver técnicas avançadas de diagnóstico. Isso é essencial para garantir a confiabilidade dos processos e reduzir as consequências das faltas, visando proporcionar maior segurança e disponibilidade nas operações.

Os sistemas de diagnóstico de faltas podem ser classificados em sistemas baseados em modelo e sistemas baseados em sinais. Os sistemas baseados em modelo utilizam representações computacionais do sistema dinâmico para obter referências dos pontos de operação desejados. No entanto, esses sistemas apresentam limitações, como incertezas nos modelos e complexidade computacional. Como resultado, os sistemas baseados em sinais têm recebido considerável atenção na literatura, nos últimos anos, principalmente devido à complexidade associada à modelagem de sistemas eletromecânicos (IRHOUMAH, 2019) (GHANBARI, 2015).

Os métodos de diagnóstico de faltas baseados em sinais envolvem a leitura de variáveis do motor e a aplicação de técnicas avançadas de processamento de sinais. O objetivo é extrair características que apontem a ocorrência de eventos anômalos. Ao utilizar essas características, índices são ajustados para identificar a ocorrência de uma falta e diagnosticar sua severidade de maneira automatizada. Assim, o estado da arte em sistemas de diagnóstico surge da integração entre processamento de sinais e sistemas de inferência de conhecimento (IRHOUMAH, 2019) (LIBONI, 2017).

Um sistema de diagnóstico eficaz para uma determinada aplicação demanda uma arquitetura adequada de variáveis de monitoramento, a aplicação de técnicas avançadas de processamento de sinais e uma análise equilibrada entre o custo e a aplicabilidade de recursos (OSTOJIC et al., 2014). Variáveis como tensão e corrente elétricas, vibrações mecânicas e temperatura são exemplos de sinais monitorados, conforme discutido por Santos, Silva e Suetake (2012).

Uma das etapas mais importantes em um sistema de detecção e diagnóstico de faltas é o processamento dos sinais monitorados. Esse procedimento desempenha um papel fundamental na obtenção de uma identificação precisa e confiável, pois é responsável por extrair características dos sinais correlacionadas com a ocorrência das faltas. Essas características são essenciais para permitir que classificadores, sejam eles inteligentes ou estatísticos, realizem o diagnóstico de forma automática. Atualmente, os métodos de processamento de sinais abrangem ferramentas aplicadas nos domínios do tempo, frequência e tempo-frequência, incluindo técnicas como a Transformada Rápida de Fourier (do inglês, *Fast Fourier Transform* – FFT) para o cálculo da transformada discreta de Fourier e a Transformada Wavelet (do inglês, *Wavelet Transform* – WT) (FROSINI; ZANAZZO; ALBINI, 2016) (YANG et al., 2016) (COSTA; KASHIWAGI; MATHIAS, 2015).

A maior parte dos sistemas de detecção e diagnóstico baseia suas análises em transformadas no domínio da frequência, especialmente no processamento de sinais derivados da assinatura espectral da corrente elétrica do motor, conhecida como Análise de Assinatura de Corrente (do inglês, *Motor Current Signature Analysis – MCSA*). A vantagem da utilização de sinais elétricos para monitorar motores de indução trifásicos é a capacidade de adquirir esses sinais de forma não invasiva e através de transdutores simples integrados à operação do motor (YANG et al., 2016).

Ao analisar estudos relacionados, constata-se que persistem desafios associados à extração de características dos sinais monitorados (YANG et al., 2016). Esses desafios incluem a complexidade na extração de características devido ao espalhamento espectral em algoritmos de processamento no domínio da frequência, a necessidade de períodos extensos de aquisição de sinais, a ausência de resistência a ruídos em algoritmos, especialmente quando motores são alimentados por inversores de frequência, e a escassez de implementações durante períodos transitórios de operação de motores, entre outros obstáculos. Algoritmos de processamento no domínio do tempo também enfrentam dificuldades na extração de características em motores com baixo torque. Dessa forma, é necessário realizar novas pesquisas na área de identificação e diagnóstico de defeitos, especialmente em processamento de sinais, para superar esses desafios (MACIEJEWSKI, 2021).

Na esfera da detecção de barras quebradas, tema central deste estudo, pesquisas exploram diversas abordagens utilizando sistemas inteligentes e ferramentas de aprendizado de máquinas para a tomada de decisões. Essas estratégias incluem o emprego de Redes Neurais Artificiais – RNA (GODOY et al., 2016), Sistema de Inferência Fuzzy – SIF (SEERA et al., 2014), Algoritmos Genéticos – AG (RAZIK; CORREA; SILVA, 2009), classificadores Bayesianos (SILVA; POVINELLI; DEMERDASH, 2013) e árvores de decisão (GARCÍA-ESCUADERO et al., 2011).

Até recentemente, a técnica MCSA era a ferramenta dominante para detecção de faltas. Benbouzid e Kliman (2003) fornecem uma revisão abrangente desse método, que se baseia em cálculos da transformada discreta de *Fourier* aplicados à corrente da linha. Estudos foram conduzidos para detectar e diagnosticar defeitos em motores de indução alimentados tanto por inversor quanto diretamente pela rede elétrica.

A metodologia desenvolvida por Flauzino (2007) consiste na decomposição dos sinais elétricos em uma base gerada pelos próprios sinais analisados, em contraste com bases predefinidas. Essa abordagem, conhecida como Decomposição em Componentes Ortogonais – DCO, foi projetada para aplicação em sistemas elétricos, com o propósito de auxiliar em tarefas como detecção de eventos, estimação de parâmetros e filtragem de sinais. Em estudos como Batista et al. (2016) e Flauzino (2007), a DCO demonstrou promissora aplicação na detecção e localização de faltas de alta impedância em sistemas de distribuição de energia elétrica. Destaca-se que essa técnica é

altamente sensível à dinâmica do sistema em análise, produzindo sinais no domínio do tempo e possibilitando a utilização de outras ferramentas de processamento de sinais existentes para otimizar a extração de características.

Liboni (2017) aprofundou-se na exploração da técnica DCO e utilizou RNA para realizar tanto classificação multi-classes quanto detecção de novidades em sinais elétricos provenientes de máquinas elétricas rotativas. Os parâmetros desses algoritmos foram ajustados para processar índices derivados do sinal elétrico de motores, permitindo a identificação de padrões normais e anômalos. Os resultados obtidos destacaram a eficácia das ferramentas utilizadas, com os índices criados demonstrando uma alta correlação com a ocorrência da falta.

Dentre as métricas frequentemente utilizadas para avaliar a eficácia e a qualidade de um modelo de classificação, ressaltam-se o desempenho preditivo e a acurácia (HAN; PEI; TONG, 2022). A abordagem mais comum para a detecção de faltas em máquinas elétricas remonta à análise de grandezas mensuráveis e sinais apresentados pela máquina. As grandezas e sinais mais empregados em estudos incluem:

- Correntes do estator (SWARNKAR; RAI; WADHWANI, 2022);
- Tensão de alimentação (NEMEC et al., 2010);
- Torque eletromagnético (GYFTAKIS et al., 2020);
- Velocidade de rotação (HAN et al., 2019);
- Potência instantânea (DRIF; CARDOSO, 2014);
- Vibrações mecânicas (KUMAR; SINGH; NAIKAN, 2018);
- Campo magnético externo (NAVARRO-NAVARRO et al., 2022) (ALBERTO; ALMEIDA; FERREIRA, 2021) (TIAN et al., 2020) (CAPOLINO et al., 2019) (IRHOUMAH, 2019);

No entanto, a obtenção de algumas dessas grandezas envolve métodos invasivos, muitos dos quais possuem limitações em relação aos tipos de faltas que podem ser detectadas. As medições invasivas exigem a interrupção e desmontagem da máquina para a instalação do sensor. No entanto, sua utilização é frequentemente limitada a contextos específicos devido ao custo associado e à necessidade de especialização, envolvendo sistemas de monitoramento complexos (IRHOUMAH, 2019).

Por outro lado, as medições não invasivas podem ser realizadas sem a necessidade de interrupção ou desmontagem da máquina para a instalação dos sensores. O monitoramento não invasivo das condições de operação é alcançado por meio de grandezas elétricas, magnéticas ou mecânicas facilmente mensuráveis, como corrente, campo magnético externo, ruídos ou vibrações. Embora técnicas baseadas em vibrações ou análise de assinaturas de corrente sejam amplamente utilizadas no diagnóstico de máquinas elétricas, nas últimas décadas, diversos métodos baseados na análise

do campo magnético externo têm sido desenvolvidos, como apresentado por Irhoumah (2019), Henaou et al. (2014) e Ceban (2012). Irhoumah (2019) sugere que a análise de grandezas externas à máquina, como o campo magnético, pode ser uma abordagem interessante.

## 2.7 CONCLUSÃO

Neste capítulo, foram exploradas diversas metodologias e técnicas avançadas para a detecção de faltas em motores de indução trifásicos de baixa tensão, com um foco específico nas faltas de barras quebradas em rotores do tipo gaiola de esquilo. A análise detalhada das causas e efeitos dessas faltas revelou a importância de monitorar sinais elétricos e mecânicos para identificar e diagnosticar precocemente essas anomalias.

A detecção de barras quebradas é um desafio técnico significativo, exacerbado por fatores que afetam a integridade das barras do rotor. A literatura destaca a eficácia de diversas abordagens de detecção, incluindo o uso de Redes Neurais Artificiais (RNA), Sistemas de Inferência Fuzzy (SIF), Algoritmos Genéticos (AG), classificadores Bayesianos e árvores de decisão, cada uma com seus méritos específicos na identificação de padrões anômalos e normais nos sinais elétricos dos motores.

Adicionalmente, ao considerar as origens e estimativas relativas às faltas, observou-se que uma significativa porcentagem de faltas em motores de indução trifásicos está relacionada a fatores operacionais e de desgaste. A classificação das faltas mostrou que elas podem ser divididas em faltas elétricas e mecânicas, com subdivisões importantes para uma análise detalhada.

No âmbito das faltas elétricas, as faltas no rotor, no estator e na fonte de alimentação são críticas. As faltas no rotor, como barras quebradas, afetam diretamente o desempenho e a eficiência do motor. As faltas no estator, como curto-circuitos entre enrolamentos, também são prejudiciais, podendo causar danos significativos ao motor. As faltas na fonte de alimentação, como flutuações de tensão e harmônicas, influenciam negativamente o desempenho do motor.

Quanto às faltas mecânicas, estas podem ser oriundas de problemas no rotor, como desalinhamentos e desequilíbrios, e em rolamentos, que são componentes vitais para a operação suave do motor. As faltas nos rolamentos são uma causa comum de paradas inesperadas e podem ser difíceis de detectar precocemente sem um monitoramento adequado.

Os métodos de detecção e diagnóstico de faltas, conforme discutido no estado da arte, incluem técnicas baseadas em análises de sinais elétricos, vibração, temperatura e ruído, com avanços significativos em métodos não invasivos de baixo custo, como a medição do campo magnético externo.

Este capítulo estabelece uma base sólida para o entendimento das faltas de

---

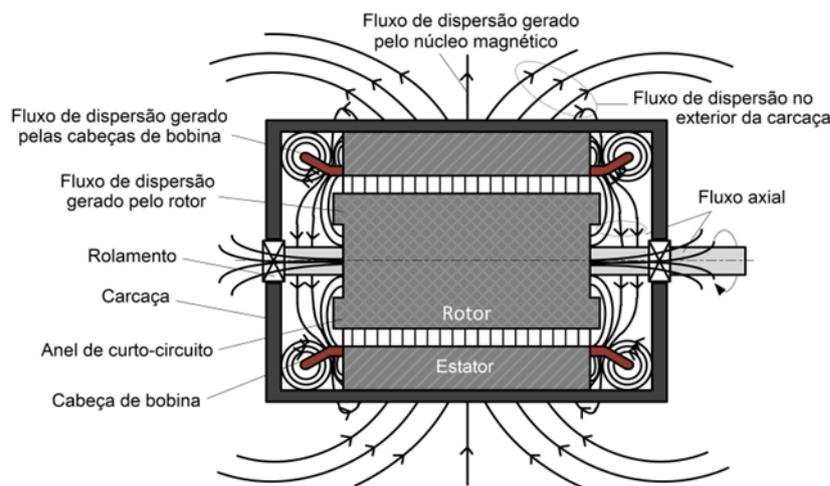
barras quebradas, foco deste estudo, e destaca a importância de técnicas avançadas de monitoramento e diagnóstico, cruciais para a detecção precoce e mitigação de faltas em motores de indução trifásicos. A implementação eficaz dessas técnicas não só aumenta a confiabilidade dos motores, mas também contribui para a redução de custos operacionais e de manutenção, melhorando a produtividade e a segurança nas operações industriais.



### 3 O CAMPO MAGNÉTICO EXTERNO

O campo magnético gerado pelo estator e rotor de uma máquina elétrica, conforme destacado por Ceban (2012), não é completamente confinado pelas partes ferromagnéticas da máquina, ocasionando vazamentos de campo magnético, conhecidos como fluxos de dispersão, que se estendem para a região externa ao redor dela. Uma representação dessas linhas de campo é ilustrada na Figura 3.1.

Figura 3.1 – Distribuição de linhas de fluxo de dispersão em uma máquina elétrica.



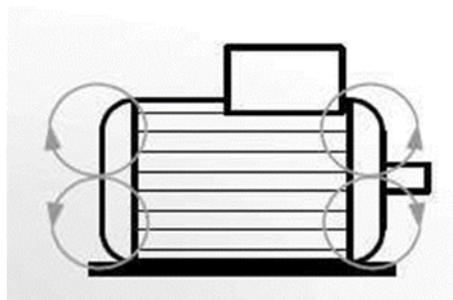
Fonte: Adaptado de Ceban (2012, p. 8).

Ao examinar a distribuição das linhas de campo, nota-se que o campo magnético externo pode ser decomposto em duas partes distintas, conhecidas como campos magnéticos externos axiais e radiais, conforme mencionado por Irhoumah (2019) e Ceban (2012). O campo axial está situado em um plano paralelo ao eixo da máquina, sendo gerado pelas correntes nas extremidades das bobinas da máquina, como ilustrado na Figura 3.2. Esse tipo de campo é composto por componentes tanto das correntes do estator quanto das correntes do rotor, sendo uma característica presente em todas as máquinas elétricas (IRHOUMAH, 2019).

A Figura 3.3 apresenta o campo radial situado em um plano perpendicular ao eixo da máquina. Esse campo deriva da indução do entreferro, sendo atenuado pelo circuito magnético do estator e pela carcaça externa da máquina. Consequentemente, as linhas de campo, ao se fecharem fora da máquina elétrica, podem ser capturadas, e o espectro resultante pode ser analisado (IRHOUMAH, 2019). O campo radial pode ser subdividido em um componente normal e um componente tangencial, como ilustrado na Figura 3.4, conforme apontado por Ceban (2012).

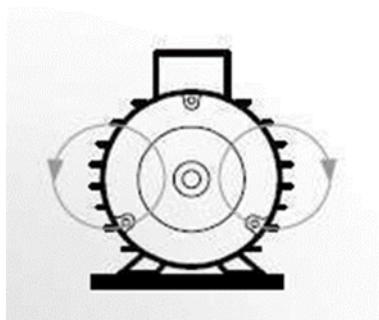
A análise do fluxo de dispersão pode fornecer informações sobre a presença de faltas e, eventualmente, sua localização (CEBAN, 2012). De acordo com Irhoumah

Figura 3.2 – Esquemático das linhas de campo axiais.



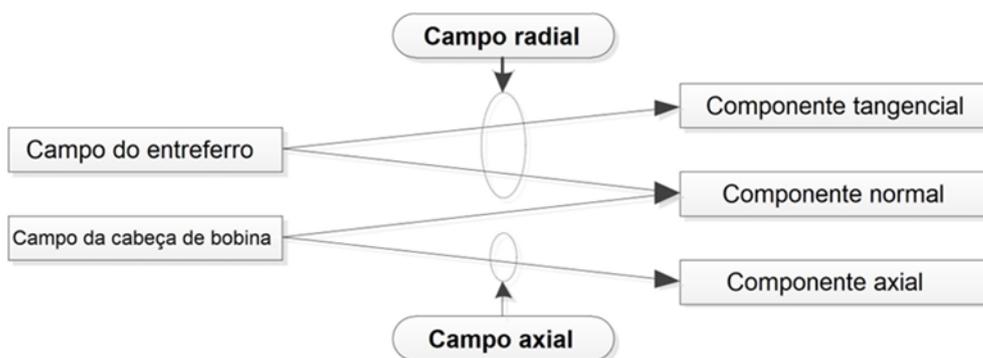
Fonte: Irhoumah (2019, p. 27).

Figura 3.3 – Esquemático das linhas de campo radiais.



Fonte: Irhoumah (2019, p. 27).

Figura 3.4 – Componentes do campo magnético.



Fonte: Ceban (2012, p. 8).

(2019), métodos de diagnóstico que se baseiam na análise do campo magnético externo de uma máquina elétrica são atrativos devido ao fato de serem não invasivos. Além disso, tais métodos são de baixo custo e fáceis de implementar, envolvendo a instalação de um sensor na periferia do motor e a análise do sinal de fluxo de dispersão para detecção de faltas.

Alguns estudos encontrados na literatura, incluindo os de Irhoumah (2019), Ceban (2012) e Pusca et al. (2012), fundamentam-se na análise do campo radial para a identificação de faltas em máquinas elétricas. Essa abordagem destaca-se como uma estratégia promissora para identificar e localizar potenciais defeitos, oferecendo uma visão aprofundada sobre o comportamento do campo magnético externo.

### 3.1 TRANSDUTORES MAGNÉTICOS PARA MEDIÇÃO DO FLUXO MAGNÉTICO

Atualmente, os transdutores desempenham um papel fundamental em diversas operações de manutenção e controle na indústria. Esses dispositivos viabilizam a medição de diversas grandezas físicas, como umidade, temperatura, pressão, aceleração, e, especificamente, fluxo magnético. No contexto deste trabalho, destaca-se o interesse nos transdutores de fluxo magnético, que são empregados em sensores dedicados à detecção de faltas em máquinas elétricas (CEBAN, 2012).

Os transdutores magnéticos são amplamente utilizados em diversas aplicações não apenas devido ao seu custo, mas também devido à sua faixa de medição, resolução, princípio de funcionamento, entre outros fatores (IRHOUMAH, 2019). Conforme o princípio utilizado para medir o campo magnético, os transdutores magnéticos podem ser classificados em duas categorias principais, de acordo com Irhoumah (2019):

1. Transdutores magnéticos que medem o fluxo magnético ao longo de um ou mais eixos:
  - Transdutor magneto-resistivo;
  - Transdutor de efeito Hall.
2. Transdutores magnéticos que medem o fluxo magnético que passa por uma superfície:
  - Transdutor do tipo bobina.

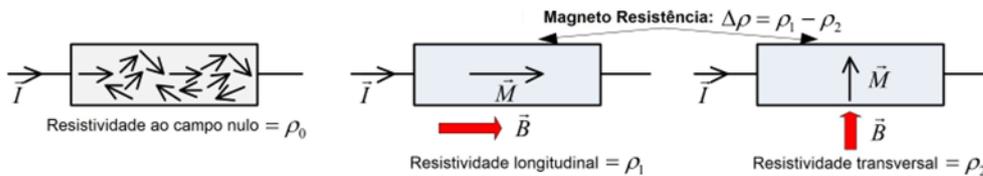
Nesta seção, serão explorados de forma detalhada esses tipos de sensores magnéticos mais frequentemente mencionados acima, os quais têm aplicação na medição do fluxo magnético de dispersão.

#### 3.1.1 Transdutor magneto-resistivo

Os transdutores magneto-resistivos são reconhecidos pela capacidade de detecção de valores muito baixos da indução magnética, variando entre 1 e 5 mT. Eles

consistem em uma resistência cujo valor é sensível à indução magnética à qual está sujeita. Esses transdutores têm a propriedade de variar sua resistência conforme a direção do campo magnético ao qual são expostos, gerando um correspondente nível de tensão na saída (CEBAN, 2012). O princípio de funcionamento de um transdutor magneto-resistivo é ilustrado na Figura 3.5.

Figura 3.5 – Princípio de funcionamento do transdutor magneto-resistivo.



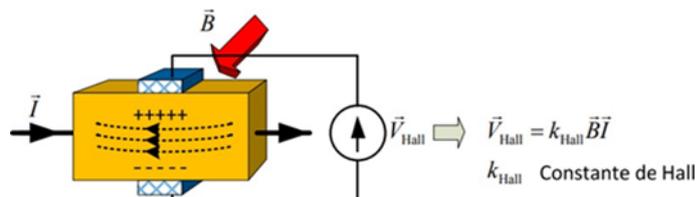
Fonte: Adaptado de Ceban (2012, p. 11).

Quando um material ferromagnético é percorrido por uma corrente  $\vec{I}$ , e exposto a um campo magnético  $\vec{B}$ , seus elétrons se alinham na direção da magnetização, resultando em uma condução elétrica. Se a direção da magnetização mudar, a orientação dos momentos magnéticos e, conseqüentemente, a resistividade do material também são modificadas (CEBAN, 2012).

### 3.1.2 Transdutor de efeito Hall

Transdutores de efeito *Hall* são também empregados na medição de campos magnéticos. Seu princípio de funcionamento é simples: uma barra condutora submetida a uma corrente  $\vec{I}$  e a uma densidade de campo magnético  $\vec{B}$  perpendicular à corrente gera uma tensão proporcional em seus terminais, conforme ilustrado na Figura 3.6. Essa tensão, denominada tensão *Hall*, é diretamente proporcional tanto ao campo magnético quanto à corrente que percorre a barra (CEBAN, 2012).

Figura 3.6 – Princípio de funcionamento do transdutor de efeito Hall.



Fonte: Adaptado de Ceban (2012, p. 11).

O transdutor de efeito *Hall* possibilita a medição do campo magnético e de outras grandezas físicas que o impactam, como posição e deslocamento. Apresenta vantagens significativas em termos de custo, linearidade e amplitude de medição. No

entanto, é importante destacar que a temperatura exerce uma grande influência na mobilidade dos elétrons, tornando o transdutor sensível a variações térmicas, o que representa sua principal desvantagem (CEBAN, 2012).

Conforme observado por Ceban (2012), tanto os resultados provenientes deste tipo de transdutor quanto os do tipo magneto-resistivo não são recomendados para a detecção de faltas no estator, pois não é viável destacar, em relação à componente fundamental, as linhas de alta frequência essenciais para a detecção.

### 3.1.3 Transdutor do tipo bobina

O princípio dos transdutores do tipo bobina é medir o fluxo abraçado por uma bobina posicionada em algum ponto do espaço (TUMANSKI, 2007). Como o transdutor fornece uma força eletromotriz igual à derivada temporal desse fluxo, a medição é viável apenas para campos variáveis. Essa medição é direta e simples, pois não exige eletrônica associada, a menos que seja necessária para amplificar o sinal da força eletromotriz induzida. A eficácia da medição está relacionada ao tamanho da bobina, ao número de espiras e às características do fio utilizado (CEBAN; PUSCA; ROMARY, 2012).

A principal vantagem desse tipo de transdutor é a sua construção simples, permitindo que os usuários desenvolvam a bobina conforme suas necessidades (CEBAN; PUSCA; ROMARY, 2012). Esses transdutores podem ser empregados na detecção de faltas por meio do campo magnético de dispersão de máquinas elétricas, conforme evidenciado em pesquisas de Irhoumah (2019), Ceban, Pusca e Romary (2012) e outros.

O transdutor do tipo bobina de fio enrolado opera com base na Lei de Faraday. Conforme explicado por Fitzgerald, Kingsley e Umans (2006), um campo elétrico é gerado pela variação temporal de um campo magnético, conforme expresso pela Lei de Faraday na Equação 3.1.

$$\oint_C \vec{E} \cdot d\vec{S} = -\frac{d}{dt} \int_S \vec{B} \cdot d\vec{A} \quad (3.1)$$

A equação evidencia que a integral de linha da intensidade do campo elétrico  $\vec{E}$  ao longo do contorno fechado  $C$  é equivalente à variação temporal da densidade de fluxo magnético  $\vec{B}$  que concatena, ou seja, que atravessa esse contorno (FITZGERALD; KINGSLEY; UMANS, 2006).

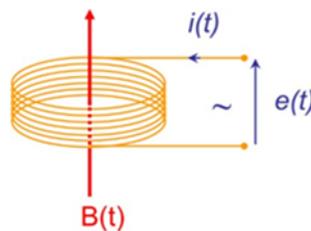
Em casos de enrolamentos com alta condutividade elétrica, o campo elétrico  $\vec{E}$  no fio é consideravelmente baixo, permitindo sua desconsideração. Nesse cenário, o termo à esquerda da equação pode ser simplificado para a negação da tensão induzida ( $e$ ) nos terminais do enrolamento, enquanto o termo à direita da equação prevalece como a taxa de variação temporal do fluxo ( $\phi$ ) no núcleo do enrolamento, multiplicado

pelo número de espiras ( $N$ ). Assim, conforme exposto por Fitzgerald, Kingsley e Umans (2006), a Lei de Faraday é reduzida a:

$$e = N \frac{d\phi}{dt} \quad (3.2)$$

Portanto, a força eletromotriz induzida ( $e$ ) em uma bobina de núcleo de ar, sujeita a um campo magnético, é diretamente proporcional à sua variação temporal do fluxo ( $\phi$ ) que atravessa o núcleo da bobina, como ilustrado na Figura 3.7.

Figura 3.7 – Esquemático da tensão induzida em uma bobina submetida a um campo magnético.



Fonte: Irhoumah et al. (2020, p. 2).

Um transdutor do tipo bobina comercial, denominado *HZ-10* da empresa *Rohde&Schwarz*, é apresentado na Figura 3.8. Este sensor possui um diâmetro de 133 milímetros e é composto por 36 espiras. A escolha cuidadosa de características, como o número de espiras, reflete a adaptabilidade desses transdutores às necessidades específicas de medição, proporcionando uma abordagem versátil para a detecção de faltas em máquinas elétricas (ROHDE&SCHWARZ, 2022).

Figura 3.8 – Transdutor tipo bobina comercial da empresa *Rohde&Schwarz*.



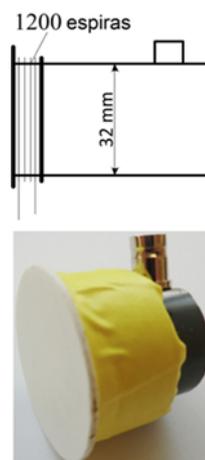
Fonte: Rohde&Schwarz (2022, p. 1).

O ponto negativo associado ao dispositivo da *Rohde&Schwarz* é a sua limitação em medir os componentes de campo necessários para máquinas menores e de baixa potência, uma vez que seu considerável diâmetro pode não ser ideal para essas

configurações específicas (CEBAN; PUSCA; ROMARY, 2012). Essa limitação decorre do fato de que, em máquinas elétricas de menor porte e potência, o campo magnético gerado é proporcionalmente menor, o que pode resultar em uma dificuldade para captura adequada pelo transdutor *HZ-10* da *Rohde&Schwarz*. Portanto, embora seja um sensor eficaz para determinadas aplicações, sua aplicabilidade pode ser restrita em contextos específicos de máquinas elétricas de menor escala.

Outro exemplo de transdutor do tipo bobina, desenvolvido no estudo de Ceban, Pusca e Romary (2012), é apresentado na Figura 3.9. Esse dispositivo opera com o mesmo princípio do equipamento comercial mencionado na Figura 3.8. No entanto, sua principal vantagem em relação ao transdutor comercial reside no tamanho reduzido, tornando-o mais apropriado para máquinas de menor potência e dimensões compactas. A bobina que compõe esse transdutor possui aproximadamente 32 milímetros de diâmetro e 1200 espiras, e visa superar as limitações de dispositivos comerciais maiores (CEBAN; PUSCA; ROMARY, 2012).

Figura 3.9 – Transdutor tipo bobina desenvolvido no âmbito acadêmico.



Fonte: Ceban, Pusca e Romary (2012, p. 10).

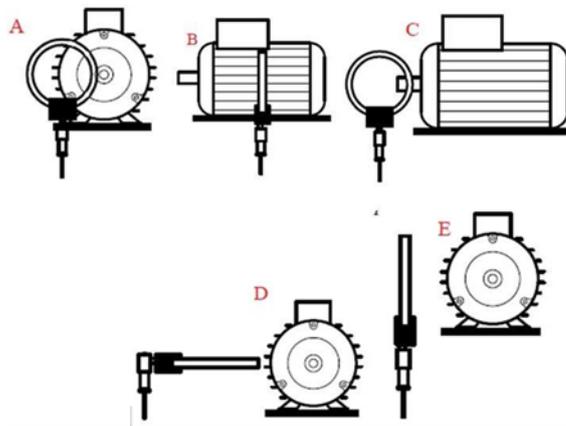
Segundo (CEBAN, 2012), este transdutor apresenta uma frequência de ressonância em torno de 93 kHz. É importante ressaltar que, para a detecção de faltas, essa frequência ressonante não representa um problema significativo, pois está consideravelmente acima da faixa de frequência relevante para esse propósito.

A ressonância em uma faixa tão elevada não interfere nas medições destinadas à detecção de irregularidades em máquinas elétricas, garantindo assim a eficácia do dispositivo. Assim, esta dissertação propõe a utilização de um transdutor do tipo bobina, semelhante ao apresentado na Figura 3.9, para conduzir as medições necessárias.

### 3.2 MELHORES REGIÕES PARA O POSICIONAMENTO DO TRANSDUTOR AO REDOR DA MÁQUINA

Ao analisar a distribuição das linhas de campo na Figura 3.1, percebe-se que, dependendo da posição do sensor, o fluxo de dispersão medido poderá variar devido à intensidade dos campos axiais e radiais em cada região da máquina elétrica (CEBAN, 2012). Irhoumah (2019) fornece informações sobre diferentes regiões para o posicionamento do sensor, baseadas na observação dos sinais fornecidos por sensores colocados em diferentes posições ao redor da máquina. As diversas posições são ilustradas na Figura 3.10.

Figura 3.10 – Regiões para o posicionamento do transdutor de medição do fluxo magnético.



Fonte: Irhoumah (2019, p. 28).

Observa-se que a posição *E*, embora definida para medir principalmente o campo radial, também pode abranger parte do campo axial, dependendo da proximidade do sensor em relação às cabeças da bobina. A posição *D* é considerada como puramente radial, pois nenhuma linha de campo axial pode cruzar a seção do sensor nessa posição. Os níveis de amplitude para as posições *D* e *E* geralmente são menores, pois nessas posições a bobina está mais distante do motor em comparação com outras posições, onde o sensor está pressionado contra a carcaça.

A posição ideal para o sensor pode ser caracterizada como aquela em que está pressionado contra o motor, no centro, de modo a limitar ou até mesmo anular os efeitos das cabeças da bobina. No entanto, a escolha da posição de instalação é condicionada pela construção, ambiente de utilização e pontos de acessibilidade específicos de cada máquina elétrica (IRHOUMAH, 2019). Segundo o mesmo autor, várias posições são inacessíveis ou não recomendadas, incluindo:

- A posição em frente ao bloco de terminais, sujeita ao risco de considerar o campo irradiado pelos cabos por onde passam as correntes de linha;

- A parte inferior da máquina, muitas vezes de difícil acesso, devido à base onde a máquina está instalada;
- A posição na extremidade do eixo, uma vez que, se o eixo estiver acoplado ou se for saliente, isso pode comprometer as medições ou exigir precauções adicionais.

Importante destacar que a medição do fluxo de dispersão não demanda que o transdutor esteja diretamente conectado ao motor (IRHOUMAH, 2019). No entanto, é benéfico posicionar o sensor o mais próximo possível, garantindo assim uma intensidade de fluxo mais elevada, facilitando a identificação de faltas. O método de detecção a ser desenvolvido nesta dissertação requer cuidados específicos durante as medições, como realizar leituras em várias regiões ao redor da máquina para identificar o ponto de maior intensidade de fluxo, otimizando assim a detecção de anomalias em tempo reduzido.

### 3.3 CONCLUSÃO

Neste capítulo, foram explorados o princípio do campo magnético externo em máquinas de corrente alternada, suas características e seu potencial para a detecção de faltas.

A análise do fluxo de dispersão mostrou-se uma ferramenta valiosa para a detecção e localização de faltas, oferecendo uma abordagem não invasiva, de baixo custo e fácil implementação. Ao instalar um sensor na periferia do motor e analisar o sinal de fluxo de dispersão, é possível identificar precocemente anomalias no funcionamento da máquina. A utilização de transdutores magnéticos para a medição do fluxo magnético foi detalhada, destacando a importância desses dispositivos em operações de manutenção e controle na indústria.

Os transdutores do tipo bobina mostraram-se promissores para a detecção de faltas em máquinas elétricas devido à simplicidade de construção e eficiência em medições de campos variáveis. A construção de transdutores adaptados, como o modelo desenvolvido por Ceban, Pusca e Romary (2012), permite superar as limitações dos dispositivos comerciais maiores, oferecendo soluções eficazes para máquinas de menor potência e dimensões compactas.

Além das características dos transdutores, a posição ideal para o sensor ao redor da máquina é crucial para garantir medições precisas e eficazes. Dependendo da construção e do ambiente de utilização da máquina, diferentes regiões de posicionamento do sensor impactam a intensidade do fluxo de dispersão medido. Posições como a frente do bloco de terminais ou a parte inferior da máquina podem não ser ideais devido a riscos de interferências e dificuldades de acesso.

Embora a medição do fluxo de dispersão não exija que o transdutor esteja diretamente conectado ao motor, posicionar o sensor o mais próximo possível aumenta a intensidade do fluxo capturado, facilitando a identificação de faltas. O método de detecção desenvolvido nesta dissertação requer medições em várias regiões ao redor da máquina para identificar o ponto de maior intensidade de fluxo, otimizando a detecção de anomalias em tempo reduzido.

Este capítulo estabeleceu os fundamentos teóricos e práticos necessários para entender como o campo magnético externo e os transdutores magnéticos podem ser utilizados no diagnóstico de faltas em motores de indução trifásicos. A aplicação dessas técnicas aprimora a confiabilidade dos motores e contribui significativamente para a otimização dos processos de manutenção preditiva, reduzindo custos operacionais e aumentando a eficiência operacional. A contínua pesquisa e desenvolvimento de novas metodologias e algoritmos são essenciais para superar os desafios atuais, garantindo uma detecção mais precisa e eficiente de faltas em máquinas elétricas.

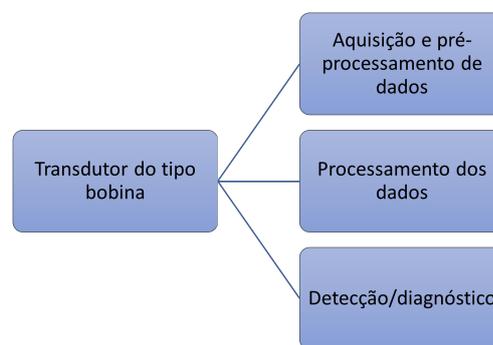
## 4 DESENVOLVIMENTO DO SENSOR E PREPARAÇÃO PARA OS ENSAIOS

Neste capítulo, serão apresentadas as etapas fundamentais do desenvolvimento do projeto. Inicialmente, será discutida a construção das bobinas (transdutores) e os parâmetros necessários para sua fabricação adequada, visando à aplicação na medição do fluxo de dispersão em motores de indução trifásicos.

Em seguida, serão exploradas as outras componentes que integram a primeira versão do *hardware* desenvolvido neste projeto do sensor de detecção de faltas. Também serão discutidas as modificações realizadas no *hardware*, após o exame de qualificação, para a segunda versão do sensor. Por fim, serão abordadas sobre a configuração implementada e as alterações realizadas no motor, visando os ensaios de detecção de faltas com o sensor.

A Figura 4.1 exibe o diagrama de blocos contendo todos os subsistemas que constituem a primeira versão do sensor, concebido para o diagnóstico de faltas em motores de indução trifásicos, com base no campo magnético externo irradiado ao redor da máquina.

Figura 4.1 – Diagrama da primeira versão sensor de detecção de faltas.



Fonte: Autor (2024).

Para detecção e diagnóstico de faltas, posiciona-se o sensor em algum ponto ao redor da máquina elétrica. O sensor é constituído por um transdutor (bobina) para capturar o sinal do fluxo magnético, além de um circuito de aquisição e pré-processamento de dados que transmite os dados para o computador. Posteriormente, um sistema computacional realiza o processamento dos dados e aplica métodos computacionais para análise do sinal no domínio do tempo e no espectro da frequência, como a Transformada Rápida de *Fourier* (FFT), viabilizando a geração de gráficos e a identificação de faltas.

O desenvolvimento do conjunto destinado à detecção e diagnóstico de faltas envolve três etapas principais:

- a) Identificação do sistema de medição apropriado (transdutor e sistema de

- aquisição adequados);
- b) Desenvolvimento de *software* para análise dos dados de acordo com os métodos desenvolvidos;
  - c) Calibração do sistema desenvolvido, incluindo testes em diversas máquinas.

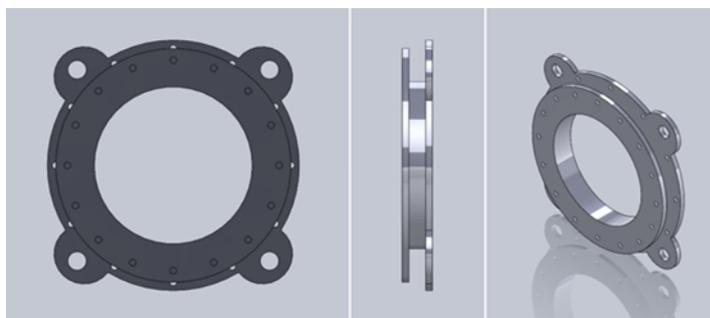
#### 4.1 DESENVOLVIMENTO DAS BOBINAS (TRANSDUTORES)

O funcionamento dos transdutores do tipo bobina baseia-se na medição do fluxo abraçado por uma bobina posicionada no espaço. A variação nas características construtivas das bobinas pode influenciar a sensibilidade do transdutor na captação do fluxo magnético de dispersão, conforme evidenciado nos estudos de (IRHOUMAH et al., 2020) e (IRHOUMAH, 2019).

Nesta seção, serão discutidos os fatores construtivos que podem causar variações na tensão induzida no transdutor. Conforme destacado por (IRHOUMAH, 2019), no projeto do sensor, é importante considerar que a amplitude do sinal deve ser adequada para facilitar o processamento e a análise do sinal, ou seja, deve atingir vários milivolts.

Inicialmente, foi criado no *software Solidworks* um suporte destinado ao enrolamento da bobina que integrará o transdutor, como ilustrado na Figura 4.2. O suporte foi produzido por meio de uma impressora 3D, e os fios foram enrolados manualmente, resultando em uma bobina com diâmetro interno de 5 cm e 1000 espiras, utilizando fio AWG 25, como evidenciado na Figura 4.3.

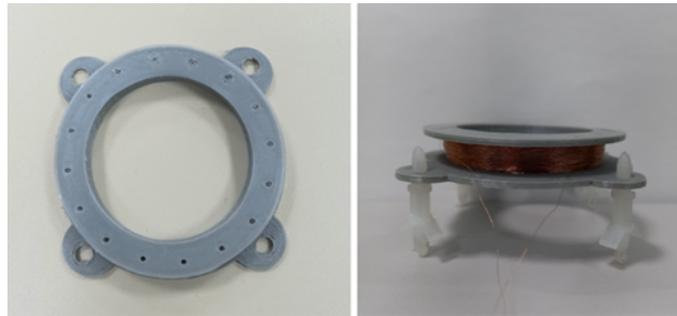
Figura 4.2 – Versão inicial do suporte para a bobina projetado no *software Solidworks*, apresentado em diversas perspectivas.



Fonte: Autor (2024).

O núcleo desse transdutor pode ser feito de material ferromagnético, conforme realizado por Vicente (2021). No entanto, neste projeto, optou-se por um transdutor com núcleo de ar para evitar perda de sensibilidade e linearidade devido à saturação. É importante destacar que, devido ao uso desse tipo de núcleo, a amplitude dos sinais

Figura 4.3 – Versão inicial do transdutor fabricado.



Fonte: Autor (2024).

nos terminais do transdutor será mais baixa, mas essa questão pode ser solucionada com a implementação de um circuito de condicionamento de sinais.

A largura de banda do transdutor é determinada com base em sua frequência de ressonância. No caso de uma bobina sem circuito adicional, ela pode ser modelada como um circuito  $RLC$ , onde  $R$  é a resistência do fio,  $L$  é a indutância da bobina e  $C$  é a capacitância parasita criada entre as espiras da bobina. Esse circuito pode entrar em ressonância quando o sinal atinge uma frequência específica (IRHOUMAH, 2019). De acordo com Irhoumah (2019), uma medição típica da frequência de ressonância para um transdutor de fio enrolado é mostrada na equação, onde a frequência de ressonância é dada por:

$$F_o = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (4.1)$$

Na equação fornecida,  $L$  representa a indutância da bobina, enquanto  $C$  é a capacitância parasita, com as respectivas unidades de medidas *henry* e *faraday*.

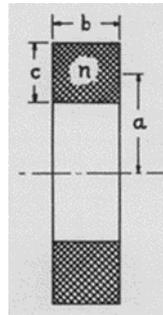
Para uma estimativa aproximada da indutância ( $L$ ) de uma bobina com múltiplas espiras e núcleo de ar, Wheeler (1928) propõe a equação abaixo.

$$L = \frac{0,8a^2n^2}{6a + 9b + 10c} \quad (4.2)$$

Os termos são representados na Figura 4.4, onde a indutância é proporcional ao quadrado do número de espiras ( $n$ ) e ao raio médio da bobina ( $a$ ), ambos multiplicados por um fator, e inversamente proporcional ao raio médio da bobina ( $a$ ), ao comprimento longitudinal ( $b$ ) e à espessura ( $c$ ), cada um deles multiplicado por um fator inteiro. As dimensões consideradas nesta equação estão na unidade de medida polegada, e o valor da indutância é expresso em micro *henry*.

Entretanto, Silva (2020) reformula essa equação, ajustando-a para o Sistema Internacional – SI, e o resultado é expresso na equação apresentada abaixo. Essa nova

Figura 4.4 – Representação dos termos empregados na equação para a estimativa da indutância de uma bobina com múltiplas espiras.



Fonte: Wheeler (1928, p. 1398).

formulação permite calcular o valor aproximado da indutância ( $L$ ), em *henry*, levando em consideração as variáveis dimensionais da equação na unidade de medida metro.

$$L = \frac{31,5a^2n^2}{6a + 9b + 10c} \cdot 10^{-6} \quad (4.3)$$

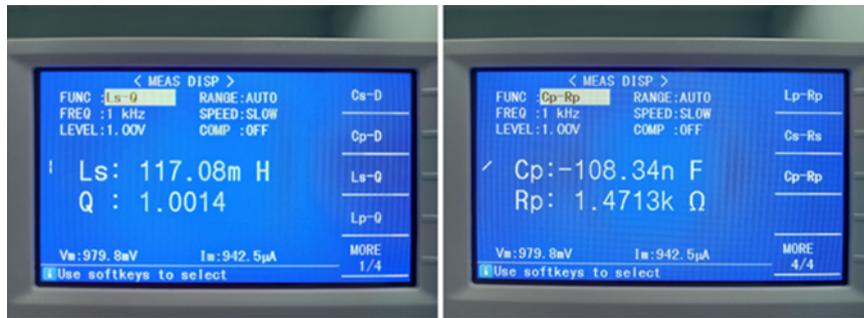
Cabe destacar que a equação acima presume que o material que constitui o enrolamento seja de alta condutividade elétrica. Dessa forma, como o fator relacionado ao material de construção da bobina não está incluído na equação, o cálculo da indutância para bobinas semelhantes, mas feitas de diferentes materiais, pode resultar em valores próximos de indutância.

A indutância e a capacitância do transdutor construído, necessárias para o cálculo da frequência de ressonância, foram medidas utilizando dois equipamentos. Um dos equipamentos é um medidor de ponte *RLC* portátil modelo 510 da marca *Icel*, e o outro é um medidor de ponte *LCR* de bancada modelo 7200 da marca *Twintex*. As medições de indutância, capacitância e resistência desta versão inicial do transdutor construído, realizadas nesses equipamentos, são apresentadas na Figura 4.5 e na Figura 4.6.

As medições foram conduzidas a uma frequência de 1 kHz devido à limitação do medidor portátil, que não oferece muitos níveis de frequência para as medições. Portanto, a frequência de 1 kHz foi selecionada por ser comum em ambos os equipamentos.

A Tabela 4.1 apresenta tanto os valores calculados da indutância e da frequência de ressonância quanto as medições de indutância, capacitância e resistência, realizadas nos medidores ponte *RLC* portátil e de bancada. No cálculo da frequência de ressonância ( $F_0$ ), optou-se por utilizar os valores medidos com a ponte *LCR* de bancada modelo 7200 do fabricante *Twintex*, e o cálculo da indutância foi realizado por meio da equação mostrada anteriormente, na qual foram inseridos as dimensões e o número de espiras da bobina.

Figura 4.5 – Medidor ponte LCR de bancada modelo 7200 da marca Twintex e as medições realizadas no equipamento.



Fonte: Autor (2024).

Figura 4.6 – Medidor ponte RLC portátil modelo 510 da marca Icel e as medições efetuadas a 1khz no equipamento: (a) indutância, (b) capacitância, (c) resistência.



Fonte: Autor (2024).

Tabela 4.1 – Parâmetros medidos e calculados da versão inicial do transdutor construído.

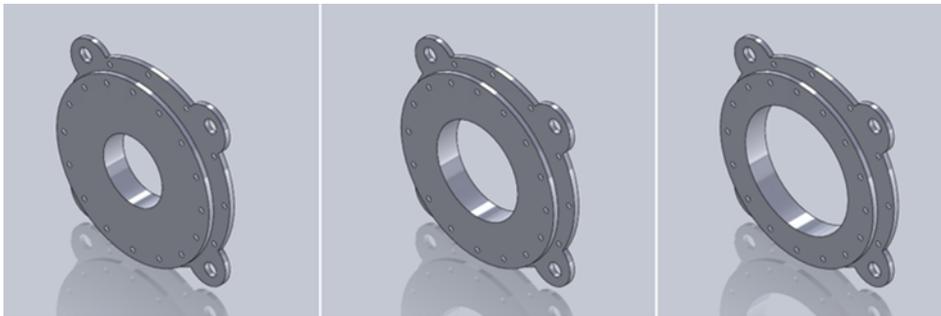
Parâmetro	Medido		Calculado
	Ponte RLC mod. 7200	Ponte LCR mod. 510	
Indutância ( $L$ )	117,08 mH	117,04 mH	90,75 mH
Capacitância ( $C$ )	108,34 nF	106,71 nF	-
Resistência ( $R$ )	1,47 kΩ	1,48 kΩ	-
Freq. ressonância ( $Fo$ )	-	-	1,41 kHz

Fonte: Autor (2024).

Com o intuito de compreender o desempenho dos transdutores e ajustá-los para a detecção de faltas no motor de indução, serão realizados ensaios para avaliar a influência do diâmetro do fio, do número de espiras ( $N$ ) e do diâmetro do núcleo ( $d$ ) da bobina. Para conduzir esses ensaios, foram desenvolvidos novos modelos de suporte para enrolar as bobinas no *software SolidWorks*. Esses modelos foram baseados na versão inicial do suporte construído e nas bobinas implementadas nos trabalhos de Silva (2020) e Irhoumah et al. (2020).

Os três modelos de suporte desta segunda versão são apresentados na Figura 4.7. Eles mantêm as mesmas características da versão inicial, com exceção dos diâmetros dos núcleos das bobinas, que são de 3 cm, 4 cm e 5 cm, respectivamente.

Figura 4.7 – Segunda versão dos suportes para as bobinas de 3 cm, 4 cm e 5 cm, desenvolvidos no *software SolidWorks*.



Fonte: Autor (2024).

Os 12 novos suportes, sendo 4 de cada modelo, foram fabricados em impressora 3D, com diâmetros internos de 3 cm, 4 cm e 5 cm, respectivamente, conforme mostrado da esquerda para a direita na Figura 4.8. Posteriormente, os fios serão enrolados manualmente, utilizando diferentes números de espiras e diâmetros de fio. Inicialmente, a intenção é empregar os fios AWG 25 e AWG 35, pois o laboratório GREEN já dispõe desses fios em estoque.

Assim, após a construção, cada transdutor será submetido a testes para medir os valores de indutância, capacitância e resistência em série utilizando o medidor ponte *LCR* de bancada modelo 7200 da *Twintex*, da mesma maneira que foi feito com a versão inicial do transdutor. Os valores medidos estão resumidos na Tabela 4.2, conforme apresentado a seguir.

Os transdutores foram finalmente testados acoplados ao motor, posicionados na região central da máquina para obter o máximo de tensão induzida com o mínimo de ruído e deformação, conforme ilustrado na Figura 4.9. Os resultados desses testes estão apresentados na Tabela 4.3.

Com base nos dados apresentados na Tabela 4.3, é possível analisar qual dos transdutores proporciona um sinal com maior amplitude e menor interferência de ruído

Figura 4.8 – Transdutores fabricados por meio de impressão 3D.



Fonte: Autor (2024).

Tabela 4.2 – Parâmetros medidos da segunda versão de transdutores construídos.

Número da bobina	Diâmetro do fio	Número espiras	Diâmetro núcleo	Indutância (L)	Capacitância (C)	Resistência (R)
1	AWG25	375	3 cm	7,31 mH	1,72 $\mu$ F	91,91 $\Omega$
2	AWG25	375	4 cm	10,68 mH	1,31 $\mu$ F	135,00 $\Omega$
3	AWG25	375	5 cm	14,97 mH	1,02 $\mu$ F	192,11 $\Omega$
4	AWG25	750	3 cm	32,27 mH	610,08 nF	487,37 $\Omega$
5	AWG25	750	4 cm	43,79 mH	467,76 nF	699,31 $\Omega$
6	AWG25	750	5 cm	47,29 mH	432,61 nF	753,95 $\Omega$
7	AWG35	375	3 cm	7,47 mH	325,67 nF	159,36 $\Omega$
8	AWG35	375	4 cm	12,68 mH	263,61 nF	235,36 $\Omega$
9	AWG35	375	5 cm	15,31 mH	229,16 nF	278,50 $\Omega$
10	AWG35	750	3 cm	30,55 mH	234,50 nF	426,24 $\Omega$
11	AWG35	750	4 cm	45,11 mH	187,76 nF	600,83 $\Omega$
12	AWG35	750	5 cm	57,32 mH	157,58 nF	751,90 $\Omega$

Fonte: Autor (2024).

Figura 4.9 – Região de posicionamento do transdutor para condução dos ensaios.



Fonte: Autor (2024).

Tabela 4.3 – Valores de tensão obtidos nos testes da segunda versão de transdutores.

Número da bobina	Diâmetro do fio	Número espiras	Diâmetro núcleo	Tensão pico a pico	Valor máximo de tensão	Valor eficaz de tensão
1	AWG25	375	3 cm	88,8 mV	40 mV	23,8 mV
2	AWG25	375	4 cm	132 mV	60 mV	37,75 mV
3	AWG25	375	5 cm	182 mV	86 mV	57,81 mV
4	AWG25	750	3 cm	222 mV	108 mV	60,7 mV
5	AWG25	750	4 cm	304 mV	146 mV	90,88 mV
<b>6</b>	<b>AWG25</b>	<b>750</b>	<b>5 cm</b>	<b>340 mV</b>	<b>162 mV</b>	<b>108,5 mV</b>
7	AWG35	375	3 cm	79,2 mV	39,2 mV	20,65 mV
8	AWG35	375	4 cm	118,4 mV	55,2 mV	34,33 mV
9	AWG35	375	5 cm	156 mV	77,6 mV	49,23 mV
10	AWG35	750	3 cm	166 mV	80 mV	44,97 mV
11	AWG35	750	4 cm	234 mV	108 mV	68,42 mV
12	AWG35	750	5 cm	318 mV	156 mV	100,1 mV

Fonte: Autor (2024).

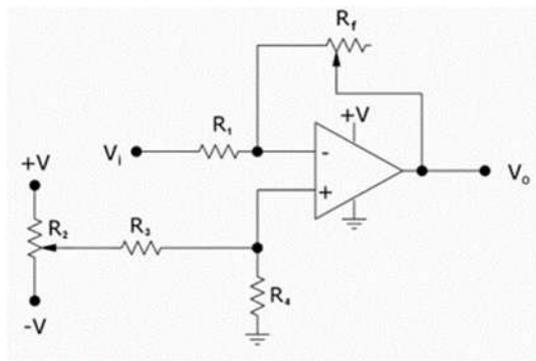
para ser utilizado na detecção de faltas no motor de indução trifásico, similar ao que foi realizado na pesquisa de Irhoumah et al. (2020). O transdutor que apresentou o melhor desempenho nos testes foi o de 750 espiras, com 5 centímetros de diâmetro, utilizando fio AWG25. Esse resultado era esperado, conforme os resultados apresentados na pesquisa de Alberto, Almeida e Ferreira (2021). Este transdutor registrou uma tensão de pico a pico de 340mV, com um valor máximo de tensão de 162mV e 108,5mV de tensão eficaz. Todos os testes foram conduzidos em um motor íntegro, alimentado com 220V de fase e sem carga acoplada em seu eixo.

## 4.2 AQUISIÇÃO E PRÉ-PROCESSAMENTO DO SINAL

O sistema de aquisição e pré-processamento do sinal desempenha um papel crucial no funcionamento do sensor. Essencialmente, ele é responsável por várias etapas que visam garantir a qualidade e a confiabilidade do sinal adquirido antes que seja processado para detecção de faltas no motor de indução trifásico. Este sistema é dividido em duas partes distintas: o *hardware* antes das alterações, que representa a versão inicial, e a segunda versão do *hardware*, já incorporando as modificações implementadas.

Na primeira versão do *hardware*, o sistema de aquisição e pré-processamento é constituído por um circuito mais complexo, encarregado de efetuar a amplificação, o ajuste de *offset*, a filtragem, a conversão Analógico/Digital – AD e a transmissão dos dados.

Na Figura 4.10, é apresentada a seção do circuito responsável pela amplificação e ajuste de *offset* do sinal analógico proveniente do transdutor. Para amplificar o sinal, foi empregado o circuito conhecido como amplificador inversor com ajuste de *offset*. Adicionalmente, um capacitor é incorporado a este circuito para efetuar a filtragem do

Figura 4.10 – Circuito amplificador inversor com ajuste de *offset*.

Fonte: Autor (2024).

sinal proveniente do transdutor. A Figura 4.11 destaca a placa de desenvolvimento *NodeMCU*, que abriga o conversor AD.

Figura 4.11 – Placa de desenvolvimento *NodeMCU*.

Fonte: Autor (2024).

A placa de desenvolvimento *NodeMCU*, ilustrada na Figura 4.11, destaca-se pelo seu baixo custo, suporte integrado a redes *wi-fi*, tamanho compacto e eficiência energética.

Apesar de o transdutor possibilitar uma medição simples e direta do campo magnético, é importante observar que o conversor AD acoplado ao *NodeMCU* opera entre 0 e 3,3V. Nesse sentido, é essencial utilizar um circuito para amplificar e aplicar um *offset* no sinal proveniente do transdutor, a fim de ajustá-lo aos níveis adequados de tensão para operação do conversor AD, que varia entre 0 e 3,3V. O conversor AD integrado à placa de desenvolvimento *NodeMCU* possui 10 bits de resolução.

Como complemento e para aumentar as possibilidades de detecção de faltas no motor de indução, a versão inicial do *hardware* incluiu o módulo *MPU-9250*. Esse módulo possui circuitos integrados de acelerômetro, giroscópio e magnetômetro, sendo este último de particular interesse para identificar alterações que possam indicar faltas. Na Figura 4.12, é possível visualizar o referido módulo. A utilização de um Sistema

Microeletromecânico (do inglês, *Micro-Electro-Mechanical Systems* – MEMS), como o *MPU-9250*, é atrativa devido ao seu tamanho compacto, o que torna o sensor bastante reduzido.

Figura 4.12 – Módulo *MPU-9250* (acelerômetro, giroscópio e magnetômetro).



Fonte: Autor (2024).

O magnetômetro MEMS de três eixos presente no módulo *MPU-9250*, conforme indicado no *datasheet* do dispositivo, apresenta as seguintes características: é um sensor magnético de efeito *Hall* monolítico de silício de 3 eixos com concentrador magnético; possui uma ampla faixa de medição dinâmica e alta resolução com consumo de corrente reduzido; a resolução de dados de saída é de 14 bits ( $0,6\mu T/LSB$ ); a faixa de medição em escala total é de  $\pm 4800\mu T$ ; a corrente de operação normal do magnetômetro é de  $280\mu A$  a uma taxa de repetição de 8Hz; inclui uma função de autoteste com fonte magnética interna para verificar a operação do sensor magnético nos produtos finais (INVENSENSE INC, 2016).

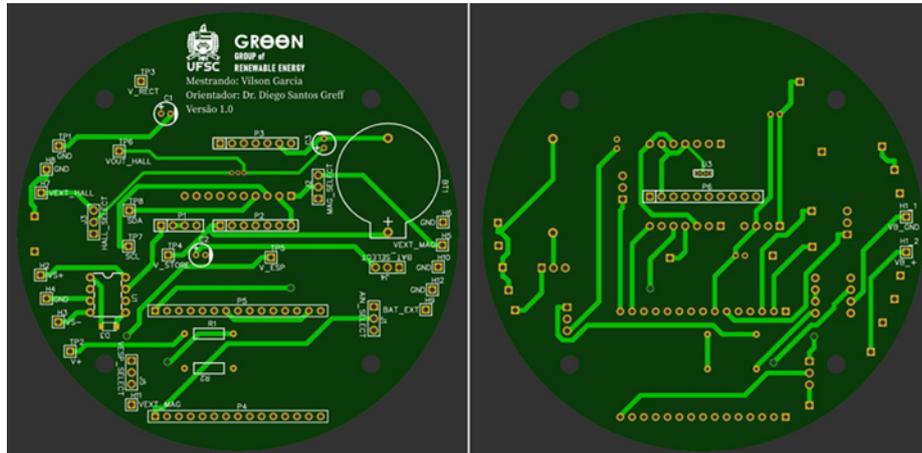
A detecção de faltas por meio do magnetômetro se baseia na medição relativa, comparando as medições do campo magnético do motor em questão com as medições de um motor em perfeito estado de funcionamento. Em caso de falta, ocorrerão alterações no campo magnético, refletidas nas leituras do magnetômetro. Isso possibilita a detecção de faltas no motor elétrico sob monitoramento.

Com a implementação de todas as partes desse sistema, foi desenvolvido um projeto de Placa de Circuito Impresso (do inglês, *Printed Circuit Board* – PCB) para a integração de todos os subsistemas. A PCB foi projetada para receber os terminais da bobina na entrada, o circuito de amplificação e ajuste de *offset*, o conversor AD e o módulo MPU-9250, que inclui o magnetômetro.

O design da PCB, que abrange ambas as faces, é apresentado na Figura 4.13. A Figura 4.14 ilustra a primeira versão do dispositivo desenvolvido, após a instalação de todos os componentes.

Em uma segunda geração de *hardware*, optou-se por eliminar o circuito de condicionamento de sinais por amplificadores operacionais por meio da utilização de um ADC Sigma-Delta. Uma vantagem da utilização deste tipo de conversor é que dispensa filtros analógicos, amplificadores adicionais (uma vez que o sinal proveniente

Figura 4.13 – Faces superior e inferior da PCB desenvolvida.



Fonte: Autor (2024).

Figura 4.14 – Vista superior e inferior da primeira versão do dispositivo desenvolvido.



Fonte: Autor (2024).

da bobina está dentro dos limites de entrada do microcontrolador), e realiza uma conversão analógico-digital bastante precisa.

O Sigma-Delta opera de maneira simples, iniciando com o *oversampling* do sinal de entrada analógico a uma frequência elevada, consideravelmente superior à taxa de *Nyquist* do sinal. Em seguida, as amostras são submetidas a um filtro passa-baixa, reduzindo o ruído e os erros de quantização causados pela taxa de amostragem superdimensionada (SCHREIER; TEMES et al., 2005).

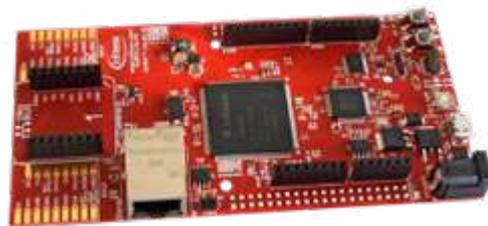
Após essa etapa, o sinal filtrado é quantizado em um sinal digital de 1 bit, constituído por uma sequência de pulsos com amplitude e frequência fixas, que é retroalimentado no modulador Sigma-Delta. Este utiliza um circuito de realimentação para ajustar continuamente a amplitude e frequência dos pulsos, minimizando o erro

entre o sinal digital e o sinal analógico original (SCHREIER; TEMES et al., 2005). Em seguida, molda o ruído de quantização em um ruído de alta frequência que é posteriormente eliminado da faixa de interesse por meio de um filtro passa-baixa (PAVAN; SCHREIER; TEMES, 2017). Esse processo de moldagem de ruído possibilita que o Sigma-Delta ADC alcance uma resolução e precisão muito superiores em comparação com os ADCs tradicionais (SCHREIER; TEMES et al., 2005).

Dentre as soluções disponíveis no mercado, na época, escolheu-se a *launchpad Msp430* da *Texas Instruments*. Essa alteração foi necessária devido ao fato de que a detecção não invasiva de faltas com base nas informações do conteúdo harmônico necessitava de um conversor que tivesse alta resolução e operasse com tensões tanto positivas quanto negativas. No entanto, esse conversor ADC Sigma-Delta da *launchpad* da *Texas Instruments* apresentava apenas 512b de memória RAM para armazenamento das leituras. Portanto, os resultados obtidos com este hardware foram insatisfatórios.

Conseqüentemente, decidiu-se migrar para a *launchpad* da *Infineon*, a *AURIX™ Lite Kit V2* conforme mostrado na Figura 4.15, o qual superou as limitações de memória mencionadas anteriormente.

Figura 4.15 – *AURIX™ TC375 Lite Kit V2 – Infineon Technologies*.



Fonte: Autor (2024).

O *AURIX™ Lite Kit V2*, que contém um Microcontrolador *TC375* baseado na tecnologia *TriCore™* da *Infineon Technologies*, é o *kit Launchpad* utilizado para medir a saída da bobina e enviar as informações para o computador para uma análise de dados mais aprofundada. A unidade central de processamento integrada no *Launchpad* apresenta diversas características, que podem ser resumidas da seguinte maneira:

- Unidade de ponto flutuante totalmente pipeline (FPU);
- Opera a uma frequência de até 300 MHz em toda a faixa de temperatura;
- Cache de Instruções de 32 kbytes (ICACHE);
- Cache de Dados de 16 kbytes (DCACHE).

Além das características da unidade central de processamento, é importante examinar os conversores analógico-digitais incluídos no *Launchpad* e suas capacidades. De acordo com o *datasheet* do *AURIX™ Lite Kit V2*, ele possui um conjunto de 12 núcleos ADC independentes, cada um com uma faixa de tensão de entrada de até 5,5V (alimentação do ADC), podendo ser tensão positiva ou negativa, e possui também 6 canais para o conversor Sigma-Delta.

### 4.3 PROCESSAMENTO DOS DADOS E DETECÇÃO DAS FALTAS

Os sinais das tensões induzidas no transdutor, após passarem pelo circuito de aquisição e pré-processamento, são enviados diretamente para um sistema computacional, o qual é responsável pela análise e processamento subsequente. Com isso, as informações são analisadas no domínio da frequência, por meio do cálculo da Distorção Harmônica Total (THD).

#### 4.3.1 Distorção Harmônica Total (DHT)

A Distorção Harmônica Total - DHT (*Total Harmonic Distortion* - THD) refere-se à deformação das formas de onda de tensão e corrente que resulta em desvios da forma senoidal pura (Ajeigbe, Munda e Hamam, 2018). A DHT quantifica a presença de componentes harmônicos nas formas de onda de tensão e/ou corrente, servindo como um indicador do grau de distorção da forma de onda resultante, podendo ser utilizada para avaliar a qualidade do sinal de uma fonte de alimentação elétrica ou uma carga (AIRES, 2022).

Essa distorção é provocada por dispositivos não lineares, sejam eles cargas ou fontes, presentes no sistema de potência. Muitos especialistas na área consideram que a distorção harmônica continua sendo o problema mais significativo em termos de Qualidade de Energia Elétrica - QEE (AIRES, 2022).

Para medir DHT em um circuito, é necessário verificar a amplitude de cada harmônico gerado em relação ao componente fundamental do sinal de entrada. Este cálculo corresponde a uma média dos níveis de tensão ou corrente em relação à entrada (AIRES, 2022). A equação utilizada para o cálculo da DHT é a seguinte:

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{max}} X_h^2}}{X_1} \quad (4.4)$$

Na equação fornecida,  $X$  representa uma variável genérica que pode indicar tensão ou corrente, e  $h$  representa a ordem da componente harmônica.

Devido aos efeitos prejudiciais que os harmônicos podem causar nos equipamentos dos consumidores e na rede elétrica, é essencial monitorar e regular os níveis de harmônicos para mantê-los dentro dos limites permitidos, garantindo o funcionamento adequado do sistema. O padrão *IEEE 519-2014* foi desenvolvido para empresas

de serviços públicos e seus clientes, com o objetivo de limitar o conteúdo harmônico e fornecer a todos os consumidores uma melhor qualidade de energia (AIRES, 2022). Este padrão estabelece os limites de distorção de tensão, conforme listado na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Limites de Distorção de Tensão de acordo com o Padrão *IEEE 519-214*.

Tensão na barra na subestação (V)	Harmônicos individuais (%)	Distorção Harmônica Total (THD)
$V \leq 1kV$	5,0	8,0
$1kV < V \leq 69kV$	3,0	5,0
$69kV < V \leq 161kV$	1,5	2,5
$161kV < V$	1,0	1,5

Fonte: Aires (2022, p. 20).

Os limites de distorção apresentados na Tabela 4.4 não se aplicam necessariamente ao sinal de tensão induzida proveniente do campo magnético do MIT, dado que este sinal foi medido no interior de uma carga, estando suscetível a ruídos que causam alterações na DHT proveniente da rede. Entretanto, a ocorrência de uma falta em um motor também causa distorções na DHT, logo, esse será o método de análise para detecção de faltas de barras rompidas a ser utilizado neste trabalho.

#### 4.4 CONFIGURAÇÃO DESENVOLVIDA PARA OS ENSAIOS

Foi desenvolvida uma configuração para permitir a realização dos ensaios, conforme ilustrado na Figura 4.16. Em outras pesquisas como, por exemplo, a pesquisa de Costa, Kashiwagi e Mathias (2015) também foi montada uma configuração para os ensaios. O conjunto implementado nesta dissertação é composto por:

- Regulador de tensão *Variac* trifásico modelo *TSGC2* – 3kVA para possibilitar a variação da tensão de alimentação do motor;
- Disjuntor para interromper a alimentação em caso de emergência;
- Analisador de potência digital *Yokogawa WT333E* para calcular em tempo real vários parâmetros, como tensão, corrente, potências (aparente, ativa e reativa) e fator de potência, em qualquer uma das três fases;
- Tacômetro digital a laser *Vonder TDV 100* para medir a velocidade no eixo do motor;
- Freio de *Prony* para simular carga aplicada ao eixo do motor; e
- Um motor elétrico trifásico de 1CV da *WEG*, modelo *W22*, com alimentação em 220/380V e 4 polos.

Na configuração de teste elaborada, ilustrado na Figura 4.16, o sensor, composto pelo microcontrolador e pelo transdutor, está conectado ao motor sob teste. O motor utilizado nos experimentos de detecção de ondas magnéticas está localizado no Laboratório do Grupo de Energias Renováveis – GREEN e é um motor trifásico com rotor gaiola de esquilo. Esse motor é capaz de operar com tensões de 220/380V, 60Hz, apresenta um fator de serviço de 1,15 e possui ventilação externa. Em condições nominais, tem um fator de potência de 0,81 e uma potência de saída de 735,5W.

Figura 4.16 – Vista superior da configuração completa.



Fonte: Autor (2024).

Dessa forma, essa configuração possibilita a condução de ensaios de maneira controlada, permitindo a variação da tensão de entrada e da carga aplicada ao eixo, além de possibilitar o monitoramento de diversas variáveis críticas ao longo dos ensaios. O sensor de detecção de faltas desenvolvido nesta pesquisa, o qual está acoplado ao motor, desempenha a função de captar os dados provenientes do campo magnético, enviando-os para o computador por meio de comunicação serial via cabo. Isso possibilita que o computador realize o processamento posterior dessas informações.

O Analisador de Potência Digital *Yokogawa WT333E* foi empregado para medir de forma contínua a tensão, potência, corrente e fator de potência fornecidos ao motor analisado. Essa abordagem permitiu a medição de todos esses fatores e avaliação de como eles interferem, em situações de carga, no estado do campo magnético medido.

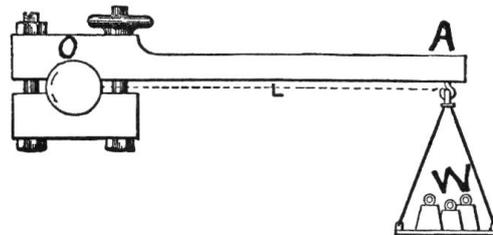
#### 4.4.1 Freio de *Prony*

A fim de criar condições de submeter o motor a cargas e mensurar o sinal de saída gerado pela bobina, foi implementado um freio de *Prony* adaptado na bancada de teste. Esse freio possibilita diferentes configurações de carga nos ensaios, permitindo a observação das variações no comportamento do campo eletromagnético sob carga.

O freio de *Prony* é composto por uma placa de madeira com uma peça de borracha em seu centro, fixada por meio de uma junta giratória presa à mesa com um fixador metálico na ponta. Essa configuração permite que a peça de borracha entre em contato com o invólucro de metal do rotor no centro, além de possibilitar ao operador a aplicação de uma força na ponta não fixa. A placa utilizada possui dimensões de 165 centímetros, com 65 centímetros entre o ponto de giro e o contato com os pontos do motor.

A escolha desse freio foi baseada em sua simplicidade construtiva, custo reduzido e na capacidade de ajuste da força de atrito no eixo do motor por parte de um operador, o que permite a observação das alterações no comportamento do campo eletromagnético em uma situação de carga, ou seja, em condições reais de operação do motor.

Figura 4.17 – Esquemático do freio de *Prony*.



Fonte: Autor (2024).

#### 4.5 SIMULAÇÃO DE FALTAS NO MOTOR

Com o intuito de validar a capacidade do dispositivo em adquirir dados capazes de revelar interferências no campo magnético externo causadas por faltas no rotor, uma falta foi deliberadamente induzida no rotor utilizado para a coleta de dados, análogo ao que foi realizado nas pesquisas de Costa, Kashiwagi e Mathias (2015) e Godoy et al. (2016). Essa falta envolveu a perfuração vertical em direção ao centro geométrico do

rotor, rompendo uma de suas barras e removendo 5g de material, conforme ilustrado na Figura 4.18.

Figura 4.18 – Rotores com diferentes números de barras rompidas.



(a) Rotor com 1 barra rompida.

(b) Rotor com 3 barras rompidas.

Fonte: Autor (2024).

Na Figura 4.18 é mostrado o resultado do procedimento de perfuração o qual foi realizado em três barras, removendo os mesmos 5g de material em cada perfuração. Esse procedimento foi conduzido utilizando uma broca de precisão de 6,0mm de diâmetro, aproximadamente a largura de uma barra.

Para investigar a anomalia gerada no campo magnético devido a uma falta, o mesmo rotor que foi testado sem defeitos foi perfurado intencionalmente para provocar uma falta de barra rompida. Em seguida, esse rotor danificado foi reinstalado na máquina, e o motor foi energizado para operar sob carga, enquanto o dispositivo construído registrava os sinais das componentes do campo magnético.

Foram realizados testes experimentais para identificar faltas de barras rompidas no rotor, comparando o desempenho do motor com o rotor íntegro e, posteriormente, com o mesmo rotor já danificado, ou seja, com as perfurações. É importante destacar que todos os ensaios foram conduzidos utilizando o mesmo motor e rotor. Após a perfuração, o rotor foi remontado no motor para realizar os testes sob condições de falta. Dessa forma, em todo o trabalho, foi utilizado um único motor e o mesmo rotor, desde o início até a conclusão dos ensaios.

#### 4.6 CONCLUSÃO

O desenvolvimento das bobinas (sensores) e do sistema de aquisição e pré-processamento do sinal avançou significativamente na criação de um transdutor robusto e eficiente para a detecção de faltas em motores de indução trifásicos. Inicialmente, as bobinas foram projetadas com base em critérios como largura de banda ampla e amplitude de sinal adequada. A primeira versão utilizou um núcleo de ar para evitar perda de sensibilidade. Parâmetros de indutância e capacitância foram medidos,

e testes identificaram a configuração ideal para maximizar a tensão induzida e minimizar o ruído. O melhor desempenho foi observado em uma bobina de 750 espiras, com fio AWG25 e diâmetro de núcleo de 5 cm, registrando uma tensão pico a pico de 340 mV.

Na fase de aquisição e pré-processamento do sinal, a primeira versão do *hardware* incluiu circuitos para amplificação, ajuste de *offset*, filtragem, conversão AD e transmissão dos dados. O *NodeMCU* foi utilizado para a conversão AD, com necessidade de circuitos adicionais para ajuste de sinal. A segunda versão introduziu o microcontrolador *AURIX™ Lite Kit V2*, equipado com um conversor AD *Sigma-Delta*, eliminando a necessidade de filtros analógicos e amplificadores adicionais, aumentando a precisão e a confiabilidade das medições.

A detecção de faltas baseou-se nas informações do conteúdo harmônico do campo magnético externo do motor de indução, utilizando um microcontrolador com conversor AD *Sigma-Delta* para monitoramento contínuo. O sistema registrava sinais das componentes do campo magnético durante a operação do motor sob carga, observando anomalias geradas por faltas induzidas no rotor.

Em resumo, a combinação de um projeto otimizado de bobinas e a implementação de um sistema avançado de aquisição e pré-processamento de sinal resultaram em um transdutor eficiente para a detecção de faltas em motores de indução trifásicos. Avanços no *hardware* e *software* aumentaram a qualidade e a confiabilidade das medições, atendendo aos requisitos do projeto e abrindo caminho para futuras melhorias e aplicações em sistemas de monitoramento industrial.

## 5 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Neste capítulo, são apresentados os resultados obtidos com as versões inicial e aprimorada do sensor desenvolvido para medir o campo magnético ao redor de um motor. A finalidade é, inicialmente, determinar a localização ideal para a instalação do sensor e avaliar sua capacidade em identificar a presença de barras rompidas no rotor do motor.

Inicialmente, serão discutidos os resultados da versão inicial do sensor, seguidos pelos resultados da versão aprimorada, com destaque para a análise das formas de onda, da Distorção Harmônica Total (THD) e dos espectros de frequência, obtidos por meio da Transformada Rápida de Fourier (FFT).

### 5.1 VERSÃO INICIAL DO SENSOR

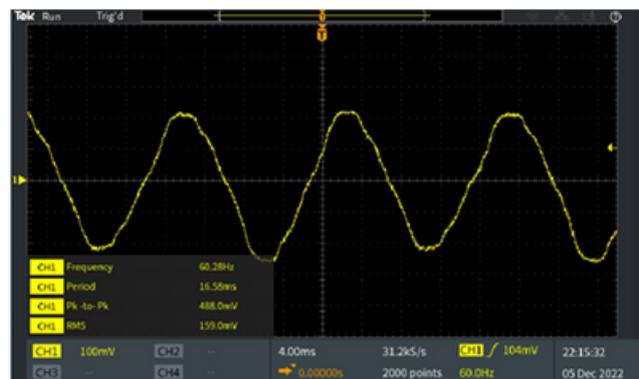
Nesta seção, são apresentados os resultados obtidos com a versão inicial do sensor desenvolvido para medir o campo magnético em torno de um motor. A finalidade é determinar a região ideal para a instalação do sensor, a fim de identificar a presença de barras rompidas no rotor, similar ao que foi realizado na pesquisa de Capolino et al. (2019).

Conforme pode ser observado nas figuras a seguir, o sensor foi instalado em diversas regiões ao redor do motor. Para cada posição, foram coletados dados detalhados sobre a forma de onda, amplitude, distorção e valor eficaz da tensão induzida. Essas figuras ilustram os resultados obtidos em cada posição, oferecendo uma visão clara das variações e comportamentos do campo magnético em diferentes pontos.

Figura 5.1 – Primeiro ensaio realizado com o sensor, sendo o motor alimentado com 220V e sem carga aplicada ao eixo.



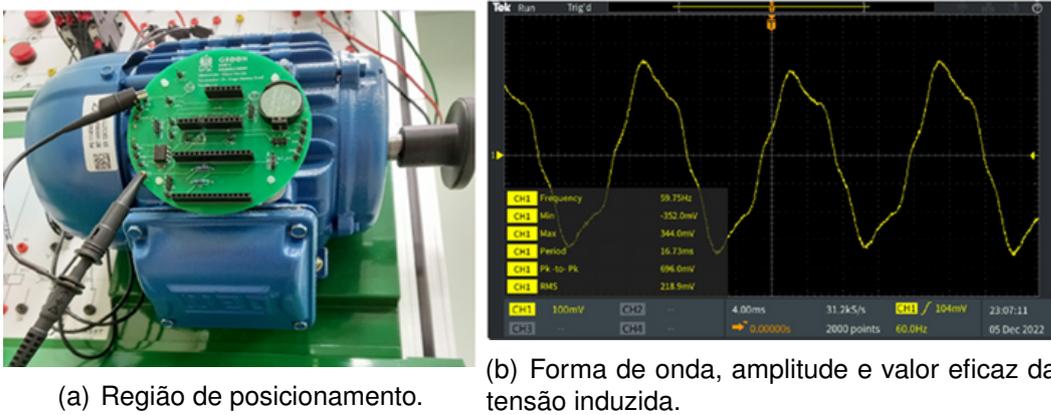
(a) Região de posicionamento.



(b) Forma de onda, amplitude e valor eficaz da tensão induzida.

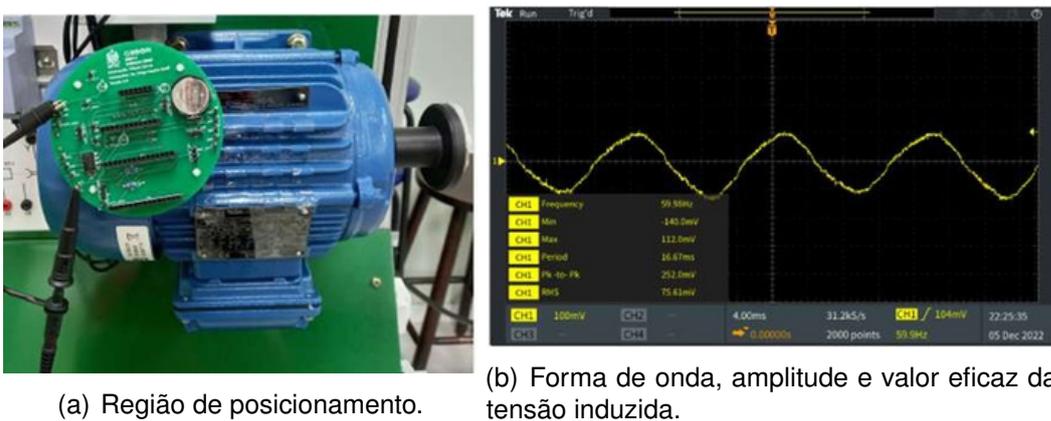
Fonte: Autor (2024).

Figura 5.2 – Segundo ensaio realizado com o sensor, sendo o motor alimentado com 220V e sem carga aplicada ao eixo.



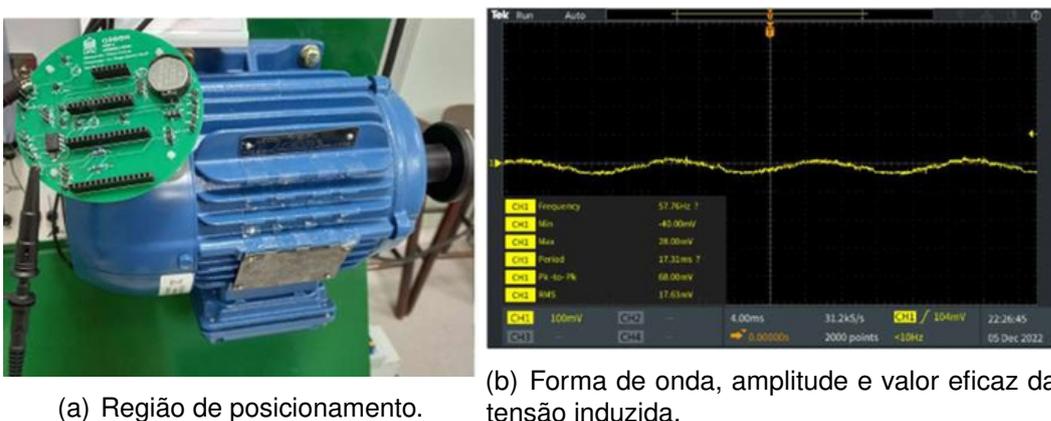
Fonte: Autor (2024).

Figura 5.3 – Terceiro ensaio realizado com o sensor, sendo o motor alimentado com 220V e sem carga aplicada ao eixo.



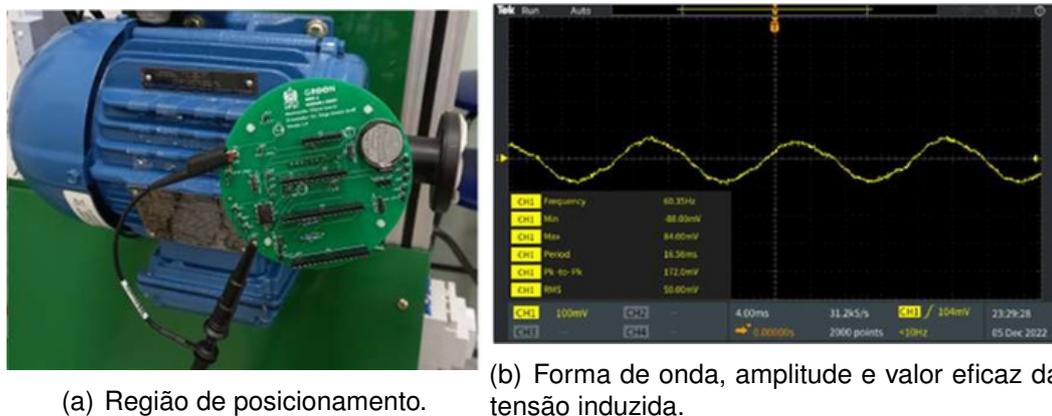
Fonte: Autor (2024).

Figura 5.4 – Quarto ensaio realizado com o sensor, sendo o motor alimentado com 220V e sem carga aplicada ao eixo.



Fonte: Autor (2024).

Figura 5.5 – Quinto ensaio realizado com o sensor, sendo o motor alimentado com 220V e sem carga aplicada ao eixo.



Fonte: Autor (2024).

Durante os testes, observou-se que a posição do sensor impacta de maneira significativa a qualidade do sinal captado. Os resultados demonstram que o posicionamento do sensor pode tanto maximizar quanto reduzir a amplitude e a distorção do sinal de tensão induzida. Dependendo do posicionamento, o sinal de tensão induzida pode se aproximar de uma forma de onda senoidal quando o motor está operando em tensão nominal e sem carga, o que facilita a identificação de alterações ao comparar essa forma de onda com a tensão induzida sob condições de carga.

## 5.2 SEGUNDA VERSÃO DO SENSOR

Devido à necessidade de características de alta precisão na conversão analógico-digital, foi decidido construir uma segunda versão do sensor utilizando um conversor analógico-digital Sigma-Delta. Este conversor não só proporciona alta resolução, como também permite uma alta taxa de amostragem, essencial para a detecção precisa de faltas em motores.

Portanto, nesta seção são apresentados os resultados da segunda versão do sensor, projetada para aprimorar a detecção de faltas nas barras do rotor de motores de indução trifásicos tipo gaiola de esquilo. Usando os equipamentos da bancada de testes previamente descrita, diversos ensaios foram realizados para avaliar a eficácia deste sensor atualizado na identificação de barras rompidas. Os detalhes dos resultados obtidos são apresentados ao longo deste capítulo.

Os dados foram coletados sob diferentes condições operacionais:

- Motor íntegro;
- Motor com uma barra rompida; e
- Motor com três barras rompidas.

Além disso, variaram-se a carga e a tensão de alimentação do motor para avaliar o desempenho do sensor em diferentes condições. Foram realizados ensaios experimentais com diversas tensões de alimentação e níveis de carga aplicados ao eixo, conforme descrito no Apêndice B. As tensões utilizadas nos testes foram 55V, 110V, 165V e 220V, com a carga aplicada ao eixo, por meio do freio de *prony*, variando desde a condição a vazio até 5 kg, com incrementos de 1 kg nos pesos aplicados ao freio de *prony*. Isso permitiu identificar padrões distintos ao comparar os ensaios com diferentes conjuntos de parâmetros de entrada.

Contudo, serão apresentados apenas os resultados com a tensão nominal de alimentação aplicada nos ensaios, sendo 220V eficazes de tensão de fase em ligação estrela, visto que permite maior amplitude de tensão induzida e percepção das alterações devido à falta. O motivo disso é que, em condições de tensão menor, a intensidade do sinal de tensão induzida é reduzida, dificultando ainda mais a análise para a detecção de faltas.

Para uma análise detalhada, foram mensuradas grandezas como tensão de alimentação, potência, velocidade, forma de onda e o espectro do sinal, após a aplicação da Transformada Rápida de Fourier (FFT). Dessa forma, a análise destas informações como tensão, corrente, distorção harmônica total (THD) e Transformada Rápida de Fourier (FFT) vão gerar informações para possibilitar a identificação de duas condições do motor: íntegro ou com falta.

As subseções seguintes discutirão os resultados dos ensaios, detalhando cada uma das condições de teste e das observações feitas. A conclusão deste capítulo, na última seção, sintetizará as ideias e destacará as melhorias proporcionadas pela segunda versão do sensor.

### **5.2.1 Grandezas mensuradas nos ensaios com motor íntegro, 1 barra rompida e 3 barras rompidas**

Os primeiros ensaios com esta segunda versão do sensor foram conduzidos com um motor íntegro, sem nenhuma barra rompida, para explorar a sensibilidade do sensor. A Tabela 5.1 apresenta as grandezas medidas com o Analisador de Potência Digital *Yokogawa WT333E* e com o tacômetro digital *Vonder TDV 100*.

As diferentes condições de carga e tensão de alimentação apresentadas nas tabelas a seguir foram ajustadas conforme descrito no Apêndice B, utilizando tensões de 55V, 110V, 165V e 220V, e com variação de carga aplicada ao eixo, por meio do transformador variável (*Variac*) e do freio de *prony*, respectivamente.

Nos campos das tabelas onde há apenas um traço, isso indica que, nas condições específicas de tensão de alimentação e carga aplicada no freio de *prony*, o motor não conseguiu girar devido ao baixo torque desenvolvido, o que resultou no travamento do eixo e impossibilitou a coleta de dados.

Tabela 5.1: Grandezas medidas com a segunda versão do transdutor, durante operação do motor com o rotor íntegro.

<b>Carga</b>	<b>Tensão eficaz (V)</b>	<b>Corrente eficaz (A)</b>	<b>Potência média (W)</b>	<b>Fator de potência</b>	<b>Veloc. (RPM)</b>
Vazio	55,08	0,24	5,98	0,4188	1786,1
1 kg	-	-	-	-	-
2 kg	-	-	-	-	-
3 kg	-	-	-	-	-
4 kg	-	-	-	-	-
5 kg	-	-	-	-	-
Vazio	110,09	0,43	8,48	0,1802	1796,5
1 kg	108,24	1,01	94	0,8619	1725,3
2 kg	107,32	1,53	147,02	0,8972	1691,5
3 kg	105,42	2,24	213,54	0,9040	1642,8
4 kg	-	-	-	-	-
5 kg	-	-	-	-	-
Vazio	165,16	0,67	13,33	0,1204	1797,9
1 kg	164,57	0,87	88,61	0,6170	1771,3
2 kg	163,99	1,03	123,08	0,7286	1766,2
3 kg	163,39	1,39	194,02	0,8525	1738,3
4 kg	162,78	1,66	236,85	0,8743	1732,6
5 kg	162,22	2,08	303,65	0,9002	1674,2
Vazio	220	1,09	24,57	0,1028	1797,8
1 kg	219,91	1,16	94,14	0,3690	1784,3
2 kg	219,44	1,18	117,40	0,4551	1779,4
3 kg	219,67	1,41	203,03	0,6545	1767,6
4 kg	219,11	1,35	184,08	0,6241	1771,4
5 kg	218,81	1,74	295,77	0,7786	1751,7

Fonte: Autor (2024).

Numa segunda bateria de ensaios com esta segunda versão do sensor, utilizou-se um motor com uma barra do rotor rompida, seguindo os mesmos procedimentos e utilizando os mesmos equipamentos do ensaio anterior.

Tabela 5.2: Grandezas medidas com a segunda versão do transdutor, durante operação do motor com 1 barra do rotor rompida.

<b>Carga</b>	<b>Tensão eficaz (V)</b>	<b>Corrente eficaz (A)</b>	<b>Potência média (W)</b>	<b>Fator de potência</b>	<b>Veloc. (RPM)</b>
Vazio	55,07	0,23	4,74	0,3705	1788,5
1 kg	-	-	-	-	-
2 kg	-	-	-	-	-
3 kg	-	-	-	-	-
4 kg	-	-	-	-	-
5 kg	-	-	-	-	-
Vazio	110,05	0,43	7,70	0,1615	1796,1
1 kg	108,41	1,09	102,04	0,8657	1716,8
2 kg	105,75	1,97	187,78	0,8992	1644,6
3 kg	-	-	-	-	-
4 kg	-	-	-	-	-
5 kg	-	-	-	-	-
Vazio	165,05	0,68	12,14	0,1078	1799,4
1 kg	164,23	0,89	93,87	0,6437	1769,9
2 kg	163,02	1,15	148,26	0,7889	1751,8
3 kg	162,62	1,62	230,35	0,8738	1720,3
4 kg	162,15	2,14	313,90	0,9033	1678,1
5 kg	161,86	2,39	350,77	0,9063	1667,3
Vazio	220,04	1,09	22,16	0,0916	1798,4
1 kg	219,64	1,16	108,02	0,4224	1784
2 kg	219,39	1,28	166,89	0,5881	1769,1
3 kg	219,43	1,55	241,72	0,7095	1758,1
4 kg	218,94	1,65	275,08	0,7595	1749,6
5 kg	218,88	1,83	318,17	0,7952	1736,4

Fonte: Autor (2024).

Já na terceira baterias de ensaios, o motor testado possuía três barras rompidas. Os dados coletados, conforme a Tabela 5.3, foram medidos utilizando os mesmos

procedimentos e instrumentos dos ensaios anteriores.

Tabela 5.3: Grandezas medidas com a segunda versão do transdutor, durante operação do motor com 3 barras do rotor rompidas.

<b>Carga</b>	<b>Tensão eficaz (V)</b>	<b>Corrente eficaz (A)</b>	<b>Potência média (W)</b>	<b>Fator de potência</b>	<b>Veloc. (RPM)</b>
Vazio	55,09	0,31	11,15	0,6530	1769,5
1 kg	-	-	-	-	-
2 kg	-	-	-	-	-
3 kg	-	-	-	-	-
4 kg	-	-	-	-	-
5 kg	-	-	-	-	-
Vazio	110,01	0,42	11,10	0,2389	1791,7
1 kg	108,46	0,92	85,07	0,8466	1716,5
2 kg	105,81	2,17	206,70	0,8991	1588
3 kg	-	-	-	-	-
4 kg	-	-	-	-	-
5 kg	-	-	-	-	-
Vazio	165,08	0,66	16,79	0,1528	1797,3
1 kg	164,30	0,89	94,23	0,6479	1765,6
2 kg	163,49	1,19	154,58	0,7965	1745
3 kg	163,09	1,59	223,40	0,8641	1716,6
4 kg	162,68	2,00	278,88	0,8878	1690,6
5 kg	162,07	2,29	335,13	0,9046	1667,8
Vazio	220,02	1,07	22,51	0,0951	1798
1 kg	219,80	1,16	100,36	0,3945	1780,8
2 kg	219,45	1,29	159,11	0,5625	1772,8
3 kg	219,47	1,41	200,84	0,6497	1763,7
4 kg	219,52	1,55	246,54	0,7222	1751,3
5 kg	219,10	1,76	301,58	0,7842	1743,7

Analisando apenas os dados coletados e apresentados nas tabelas anteriores, não é possível concluir se há ou não uma falta de barra rompida. Embora se observe uma perda de torque desenvolvido pelo motor em situações de baixa tensão de alimentação quando há uma barra rompida, essa análise isolada dos dados não permite a detecção conclusiva desse tipo de falta.

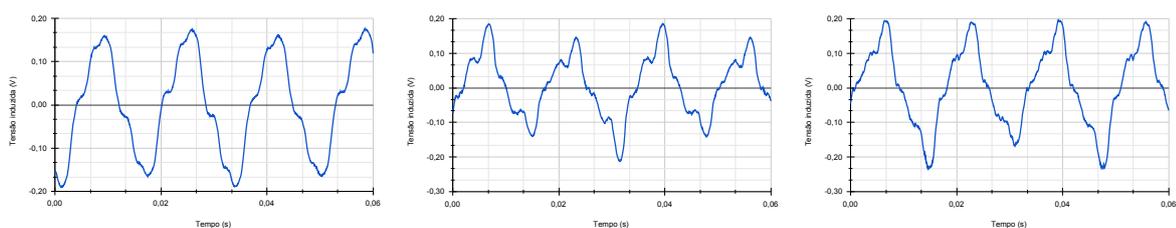
Dado que a análise exclusivamente dos dados coletados não permitiu uma conclusão clara, nas próximas seções serão exploradas outras abordagens. Isso incluirá a avaliação das formas de onda no domínio do tempo e a aplicação de técnicas complementares para obter informações mais detalhadas do espectro no domínio da frequência. A finalidade é identificar características específicas associadas a faltas de barras rompidas.

## 5.2.2 Comparação pelas formas de onda da tensão induzida

Nesta seção, será realizada a comparação das formas de onda, no domínio do tempo, da tensão induzida no sensor para três diferentes situações: rotor íntegro, uma barra rompida e três barras rompidas. As formas de onda apresentadas foram obtidas com uma tensão de alimentação de 220V eficazes de fase, ligação estrela, pois em condições de tensão menor, a intensidade da forma de onda é reduzida, dificultando ainda mais a análise para a detecção de faltas.

As figuras a seguir ilustram as formas de onda da tensão induzida no sensor sob diferentes níveis de carga, permitindo uma comparação clara entre as diferentes condições do rotor. Estas comparações são essenciais para identificar características específicas que diferenciam um motor íntegro de um com barras rompidas.

Figura 5.6 – Sinais de tensão induzida com o motor alimentado a 220V e sem carga no eixo.



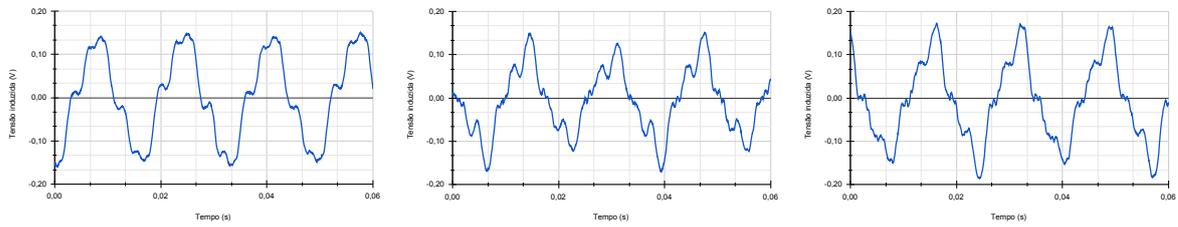
(a) Rotor íntegro.

(b) Rotor com 1 barra rompida.

(c) Rotor com 3 barras rompidas.

Fonte: Autor (2024).

Figura 5.7 – Sinais de tensão induzida com o motor alimentado a 220V e com uma carga de 1kg.



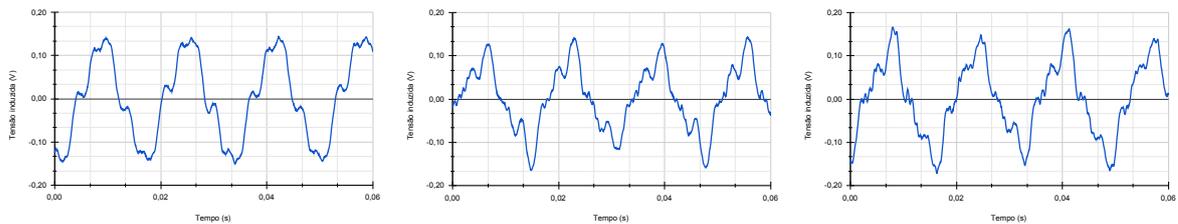
(a) Rotor íntegro.

(b) Rotor com 1 barra rompida.

(c) Rotor com 3 barras rompidas.

Fonte: Autor (2024).

Figura 5.8 – Sinais de tensão induzida com o motor alimentado a 220V e com uma carga de 2kg.



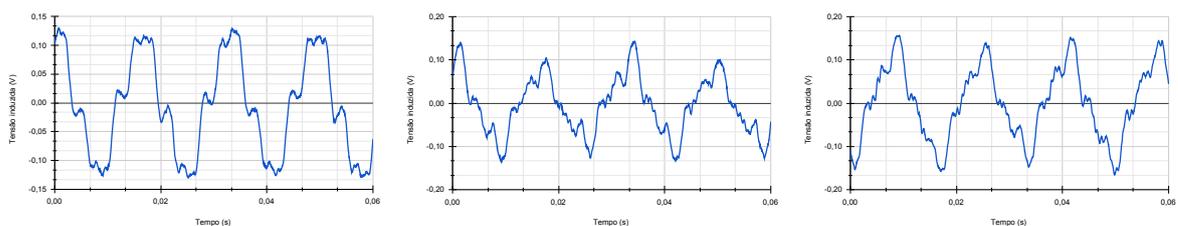
(a) Rotor íntegro.

(b) Rotor com 1 barra rompida.

(c) Rotor com 3 barras rompidas.

Fonte: Autor (2024).

Figura 5.9 – Sinais de tensão induzida com o motor alimentado a 220V e com uma carga de 3kg.



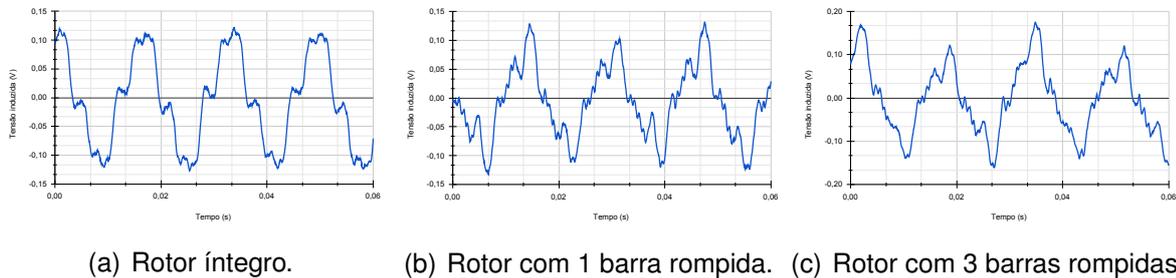
(a) Rotor íntegro.

(b) Rotor com 1 barra rompida.

(c) Rotor com 3 barras rompidas.

Fonte: Autor (2024).

Figura 5.10 – Sinais de tensão induzida com o motor alimentado a 220V e com uma carga de 4kg.



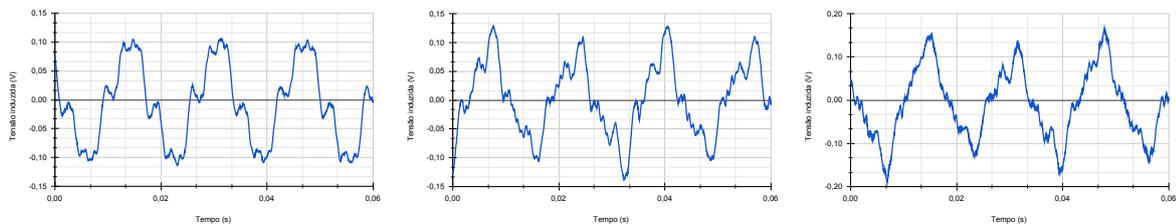
(a) Rotor íntegro.

(b) Rotor com 1 barra rompida.

(c) Rotor com 3 barras rompidas.

Fonte: Autor (2024).

Figura 5.11 – Sinais de tensão induzida com o motor alimentado a 220V e com uma carga de 5kg.



(a) Rotor íntegro.

(b) Rotor com 1 barra rompida.

(c) Rotor com 3 barras rompidas.

Fonte: Autor (2024).

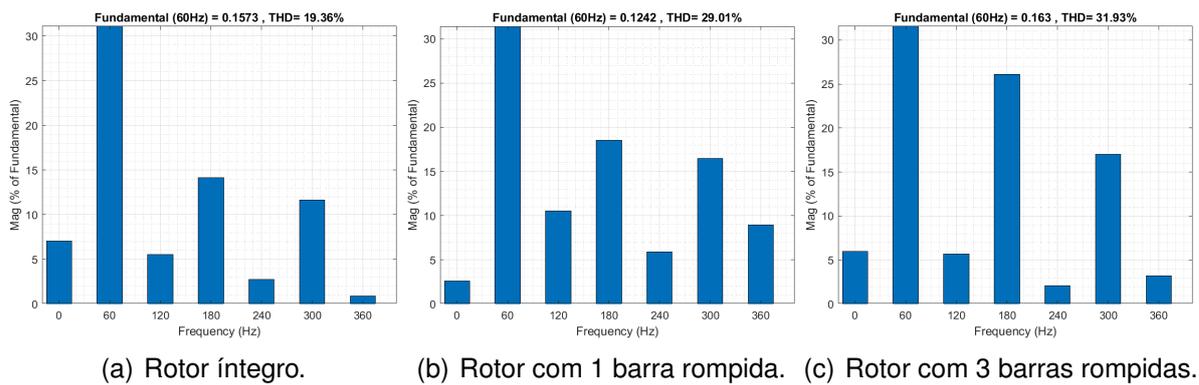
Analisando as formas de onda da tensão induzida no sensor, apresentadas nas figuras anteriores, é possível perceber uma leve diferença entre as formas de onda com o motor íntegro e com faltas de barras rompidas, independentemente do nível de carga aplicado ao eixo. No entanto, essa diferença não é suficiente para concluir de forma definitiva a presença de uma barra rompida. Isso porque diversas fontes de ruído, incluindo variações na alimentação do motor, podem influenciar as formas de onda da tensão induzida. Portanto, essa análise isolada não permite a detecção conclusiva desse tipo de falta.

### 5.2.3 Comparação do espectro harmônico para um e três ciclos de tensão induzida

Utilizando os mesmos dados das formas de onda da tensão induzida no domínio do tempo, mostradas anteriormente, será aplicada a Transformada Rápida de Fourier (FFT) no programa Matlab para obter os espectros no domínio da frequência. Essa abordagem permitirá analisar, por meio do espectro de frequência, a capacidade do sensor em detectar faltas de barras rompidas. Inicialmente, serão apresentados os

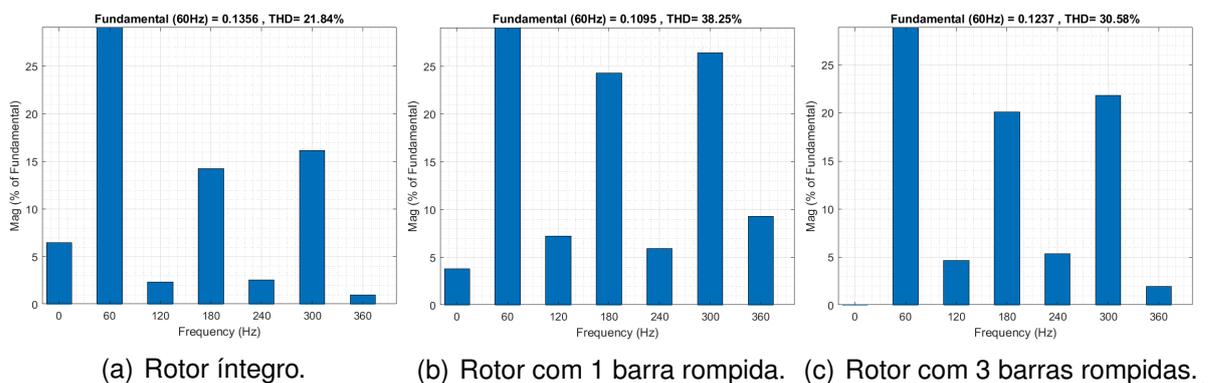
espectros no domínio da frequência obtidos a partir de um único ciclo e, em seguida, a partir de três ciclos do sinal de tensão induzida.

Figura 5.12 – Espectro em frequência para um ciclo do sinal de tensão induzida, com o motor alimentado a 220V e sem carga no eixo.



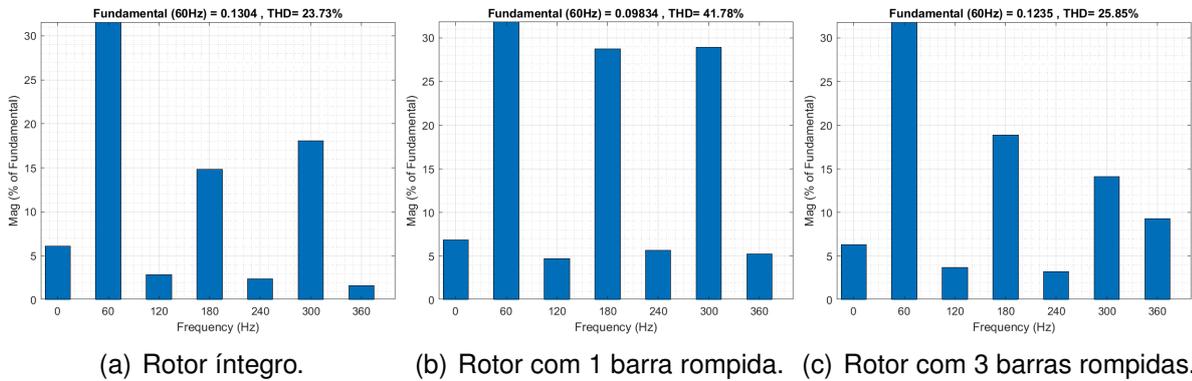
Fonte: Autor (2024).

Figura 5.13 – Espectro em frequência para um ciclo do sinal de tensão induzida, com o motor alimentado a 220V e com uma carga de 1kg.



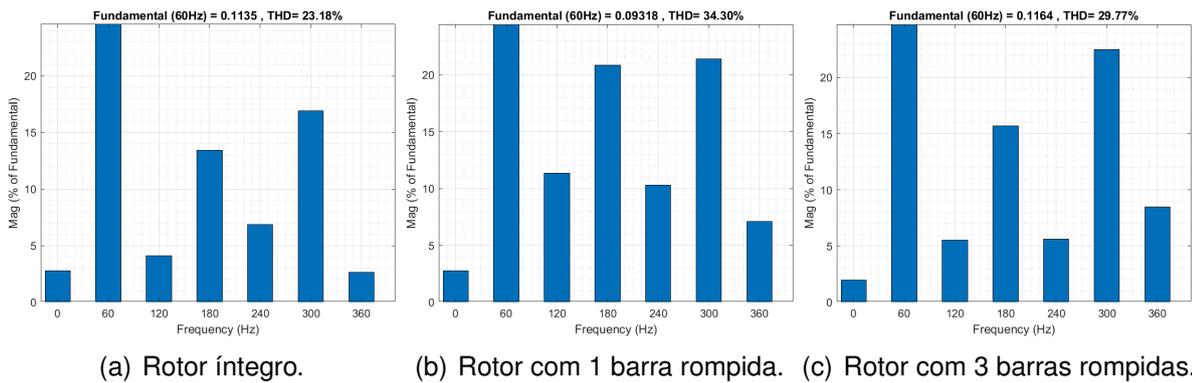
Fonte: Autor (2024).

Figura 5.14 – Espectro em frequência para um ciclo do sinal de tensão induzida, com o motor alimentado a 220V e com uma carga de 2kg.



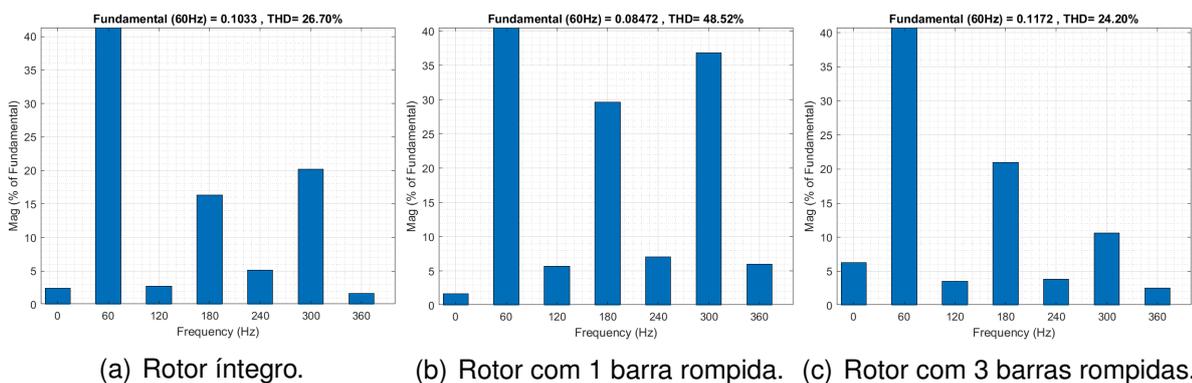
Fonte: Autor (2024).

Figura 5.15 – Espectro em frequência para um ciclo do sinal de tensão induzida, com o motor alimentado a 220V e com uma carga de 3kg.



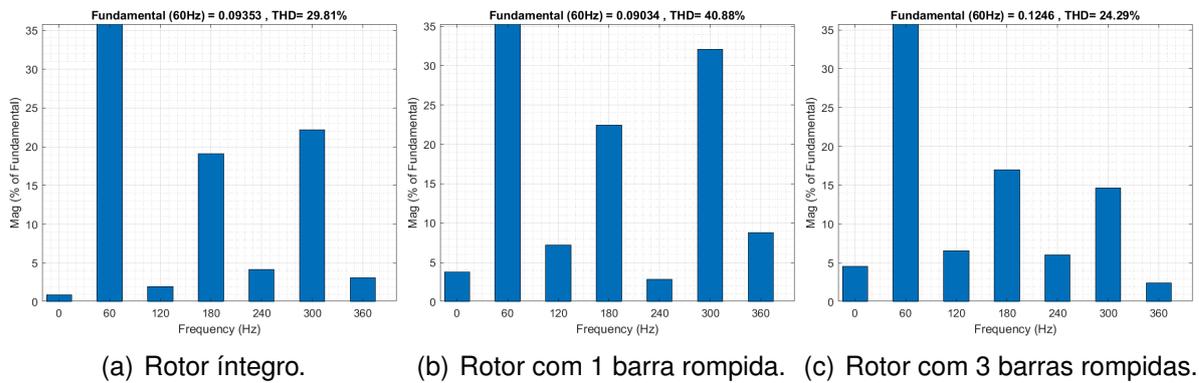
Fonte: Autor (2024).

Figura 5.16 – Espectro em frequência para um ciclo do sinal de tensão induzida, com o motor alimentado a 220V e com uma carga de 4kg.



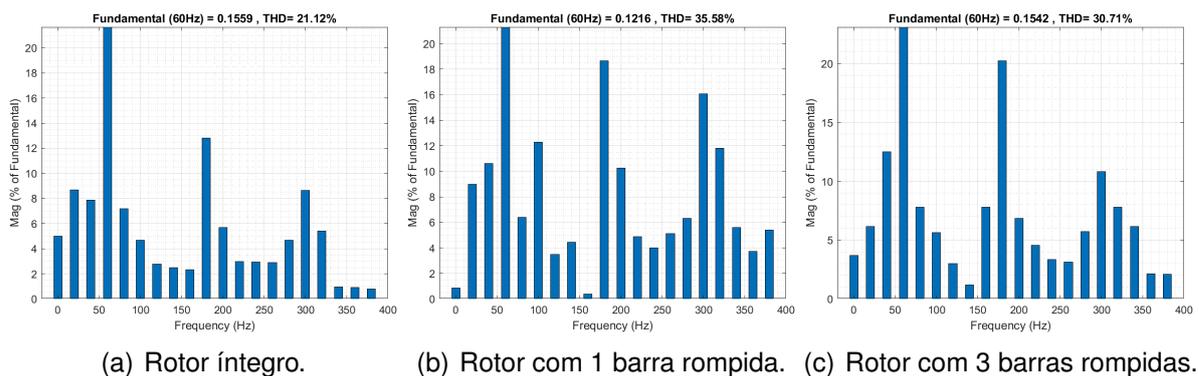
Fonte: Autor (2024).

Figura 5.17 – Espectro em frequência para um ciclo do sinal de tensão induzida, com o motor alimentado a 220V e com uma carga de 5kg.



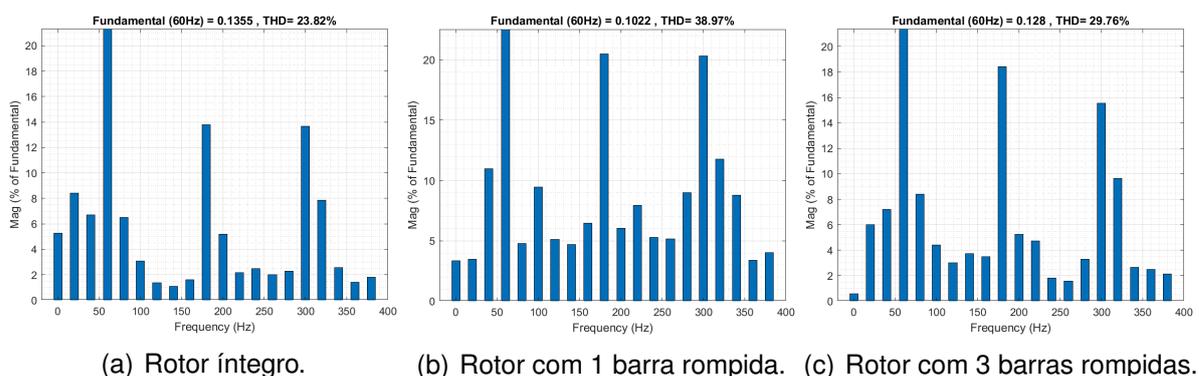
Fonte: Autor (2024).

Figura 5.18 – Espectro em frequência para três ciclos do sinal de tensão induzida, com o motor alimentado a 220V e sem carga no eixo.



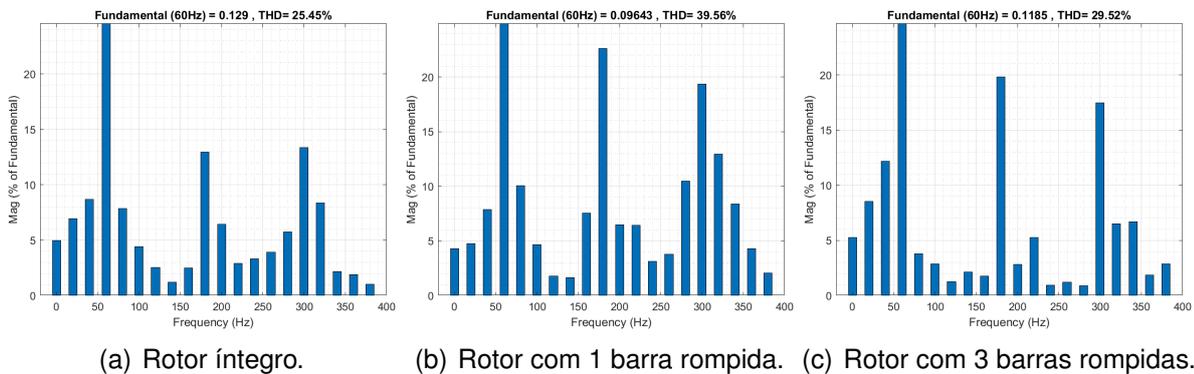
Fonte: Autor (2024).

Figura 5.19 – Espectro em frequência para três ciclos do sinal de tensão induzida, com o motor alimentado a 220V e com uma carga de 1kg.



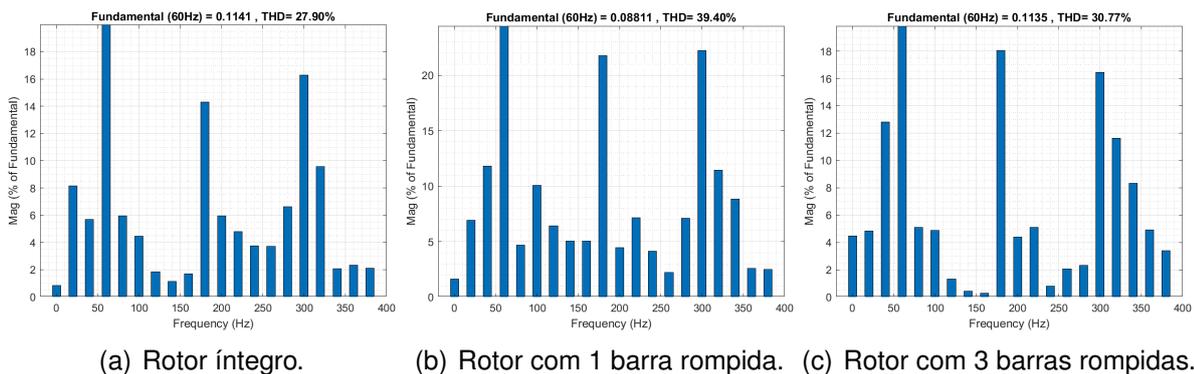
Fonte: Autor (2024).

Figura 5.20 – Espectro em frequência para três ciclos do sinal de tensão induzida, com o motor alimentado a 220V e com uma carga de 2kg.



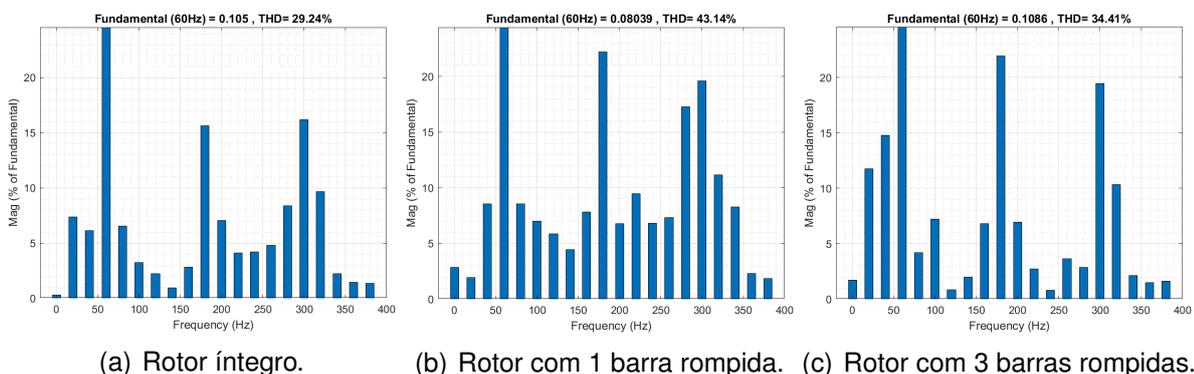
Fonte: Autor (2024).

Figura 5.21 – Espectro em frequência para três ciclos do sinal de tensão induzida, com o motor alimentado a 220V e com uma carga de 3kg.



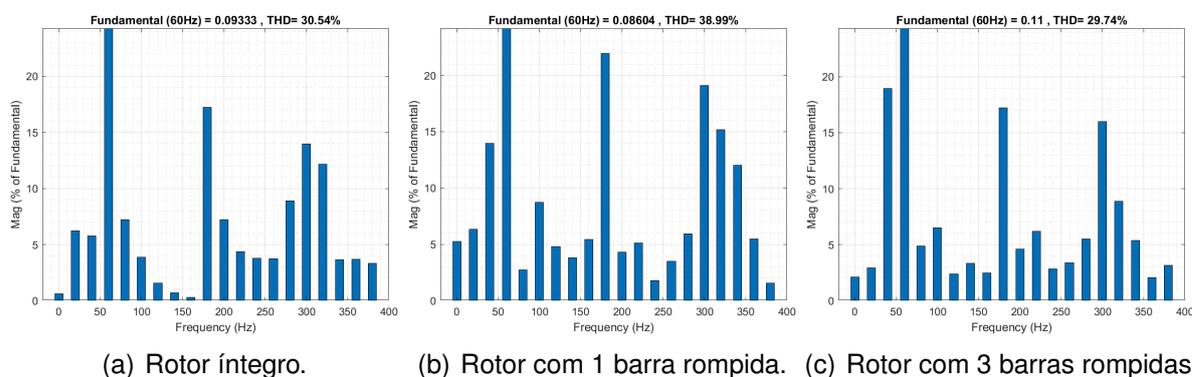
Fonte: Autor (2024).

Figura 5.22 – Espectro em frequência para três ciclos do sinal de tensão induzida, com o motor alimentado a 220V e com uma carga de 4kg.



Fonte: Autor (2024).

Figura 5.23 – Espectro em frequência para três ciclos do sinal de tensão induzida, com o motor alimentado a 220V e com uma carga de 5kg.



Fonte: Autor (2024).

É importante destacar que, desde a Figura 5.12 até a Figura 5.17 são exibidos os espectros no domínio da frequência obtidos pela aplicação da Transformada Rápida de Fourier, utilizando o programa Matlab, em um único ciclo do sinal de tensão induzida, considerando a frequência fundamental de 60Hz. Por outro lado, da Figura 5.18 até a Figura 5.23, são apresentados os espectros para três ciclos do mesmo sinal de tensão induzida, o que permite a exibição de um maior número de harmônicos em comparação com a análise de apenas um ciclo.

A análise dos espectros harmônicos, tanto para um quanto para três ciclos de tensão induzida, não fornece informações conclusivas sobre a presença de barras rompidas, pois não foram observadas diferenças significativas no conteúdo harmônico que permitisse identificar a falta. As pequenas variações detectadas podem ser atribuídas a diversas fontes de ruído, incluindo variações na alimentação do motor, que também influenciam as harmônicas, assim como observado na forma de onda da tensão induzida no domínio do tempo.

#### 5.2.4 Comparação por THD entre os espectros com e sem falta

Outra abordagem possível é o cálculo da Distorção Harmônica Total (THD), utilizando também o programa Matlab. A comparação dos valores de distorção harmônica entre um motor íntegro e um motor com falta de barra rompida pode permitir a identificação desse tipo de falta.

O sinal de tensão induzida, a partir do qual será calculada a distorção harmônica, é o mesmo que foi obtido com o motor alimentado a 220V e submetido a diferentes níveis de carga aplicada ao eixo, conforme descrito em maiores detalhes na seção anterior. Inicialmente, os valores de Distorção Harmônica Total (THD) obtidos a partir de um único ciclo do sinal de tensão induzida, seguidos pelos valores obtidos a partir de três ciclos.

Tabela 5.4 – Distorção Harmônica Total (THD) para um ciclo de rede.

Carga	Estado do motor			Variação na distorção	
	Íntegro	1 barra rompida	3 barras rompidas	Delta 1	Delta 3
Vazio	19,36%	29,01%	31,93%	9,65%	12,57%
1kg	21,84%	38,25%	30,58%	16,41%	8,74%
2kg	23,73%	41,78%	25,85%	18,05%	2,12%
3kg	23,18%	34,30%	29,77%	11,12%	6,59%
4kg	26,70%	48,52%	24,20%	21,82%	-2,50%
5kg	29,81%	40,88%	24,26%	11,07%	-5,55%

Fonte: Autor (2024).

Tabela 5.5 – Distorção Harmônica Total (THD) para três ciclos de rede.

Carga	Estado do motor			Variação na distorção	
	Íntegro	1 barra rompida	3 barras rompidas	Delta 1	Delta 3
Vazio	21,12%	35,58%	30,71%	14,46%	9,59%
1kg	23,82%	38,97%	29,76%	15,15%	5,94%
2kg	25,45%	39,56%	29,52%	14,11%	4,07%
3kg	27,90%	39,40%	30,77%	11,50%	2,87%
4kg	29,24%	43,14%	34,41%	13,90%	5,17%
5kg	30,54%	38,99%	29,74%	8,45%	-0,80%

Fonte: Autor (2024).

As duas últimas colunas das tabelas acima apresentam a variação da distorção. A coluna 'Delta 1' indica a diferença na distorção entre um motor íntegro e um motor com uma barra rompida, enquanto a coluna 'Delta 3' mostra a diferença na distorção entre um motor íntegro e um motor com três barras rompidas.

Ao analisar as informações apresentadas nas tabelas Tabela 5.4 e Tabela 5.5, especificamente nas colunas de variação de distorção 'Delta 1' e 'Delta 3', observa-se um aumento significativo na distorção harmônica em motores com faltas em comparação com motores íntegros. Embora os valores de variação de distorção 'Delta 1' e 'Delta 3' variem de acordo com o nível de carga aplicada ao eixo e o número de ciclos do sinal de tensão induzida, o aumento consistente na distorção em motores com falta sugere que essa variação pode ser utilizada como um parâmetro conclusivo para a detecção de barras rompidas.

### 5.3 CONCLUSÃO

Portanto, a partir dos ensaios realizados com a primeira versão do sensor, embora ele não tenha sido eficaz na identificação de faltas, foi constatado que a posição do sensor tem um impacto direto na qualidade do sinal captado. O posicionamento adequado do sensor pode tanto maximizar quanto reduzir a amplitude e a distorção do sinal de tensão induzida.

Com a segunda versão do sensor, aprimorada pela inclusão do conversor analógico-digital Sigma-Delta, observou-se que a análise direta dos parâmetros como tensão, corrente, potência, fator de potência e velocidade não são suficientes para detectar a presença de barras rompidas.

A comparação das formas de onda do sinal de tensão induzida também não forneceu resultados conclusivos para determinar a existência de faltas, apesar de pequenas diferenças nas formas de onda terem sido observadas, possivelmente devido a interferências de ruídos.

A análise do espectro no domínio da frequência, realizada por meio da Transformada Rápida de Fourier (FFT) no Matlab, também não se mostrou conclusiva, tanto ao considerar um ciclo quanto três ciclos do sinal de tensão induzida. Embora tenham sido detectadas pequenas variações nas harmônicas, essas também podem ser atribuídas a ruídos, assim como as diferenças observadas nas formas de onda no domínio do tempo.

Já a última abordagem empregada foi o cálculo da Distorção Harmônica Total (THD), utilizando o Matlab. Nas tabelas Tabela 5.4 e Tabela 5.5, os valores calculados são apresentados, e as colunas de variação de distorção 'Delta 1' e 'Delta 3' revelam aumentos significativos na distorção harmônica em motores com faltas em comparação com motores íntegros. Assim, o aumento consistente na distorção harmônica em motores com faltas sugere que essa variação pode servir como um parâmetro conclusivo para a detecção de barras rompidas.



## 6 CONCLUSÃO

Nesta dissertação, foram apresentados os estudos destinados ao projeto de desenvolvimento de um sensor não invasivo para detecção de faltas em motores de indução trifásicos por meio do campo magnético externo. O foco abrange não apenas a identificação e diagnóstico de faltas em motores de indução trifásicos, mas também os desafios associados ao desenvolvimento do *hardware* e à adaptação da bancada de experimentos para conduzir ensaios específicos de faltas nas barras do rotor desses motores.

O objetivo central consistiu em identificar faltas por meio da análise do sinal proveniente do campo magnético externo. Para isso, a reestruturação da bancada de experimentos foi conduzida, incorporando um freio de *prony* que permitiu a variação de carga durante os ensaios de barras rompidas. No desenvolvimento desta proposta, foi conduzida uma revisão de referências bibliográficas relacionadas ao tema, abrangendo sensores não invasivos, detecção de faltas e defeitos em motores.

Neste contexto, uma primeira versão de sensor foi desenvolvida com base em experiências documentadas na literatura e em experiências práticas no laboratório. O sensor foi inicialmente posicionado em diversas regiões da carcaça do motor e, embora ele não tenha sido eficaz na identificação de faltas, foi constatado que a posição do sensor tem um impacto direto na qualidade do sinal captado. O posicionamento adequado do sensor pode tanto maximizar quanto reduzir a amplitude e a distorção do sinal de tensão induzida.

Com a segunda versão do sensor, aprimorada pela inclusão do conversor analógico-digital Sigma-Delta, observou-se que a análise direta dos parâmetros como tensão, corrente, potência, fator de potência e velocidade não são suficientes para detectar a presença de barras rompidas. Assim como a comparação das formas de onda do sinal de tensão induzida no domínio do tempo e a análise do espectro no domínio da frequência também não forneceram resultados conclusivos para determinar a existência de faltas.

Na última abordagem de análise empregada, por cálculo da Distorção Harmônica Total (THD), revelaram-se aumentos significativos no percentual da THD em motor com faltas em comparação ao motor íntegro, onde os resultados consolidados nas Tabelas 5.4 e 5.5, a diferença da THD% entre motor com uma barra rompida e motor íntegro se mostrou mais evidente. Assim, entende-se que o aumento na distorção harmônica em motores com faltas pode servir como um parâmetro decisório para a detecção da falta por barras rompidas.

Os resultados obtidos são promissores, destacando que, independentemente da carga, os motores íntegros e aqueles com faltas nas barras do rotor puderam ser distintamente caracterizados. Os sinais foram investigados considerando variações na

tensão de alimentação e nas condições de carga, mas o foco foi com a tensão de alimentação nominal de 220V de fase.

Apesar dos imprevistos no decorrer deste trabalho, os resultados alcançados se mostraram promissores para a detecção de faltas elétricas em motores de indução por meio campo magnético externo, considerando neste trabalho a falta por barras rompidas no estator quando comparado a um motor íntegro.

Como perspectivas para trabalhos futuros, sugere-se:

- Análise do impacto do campo magnético de acordo com a localização/tamanho dos furos nas barras;
- Análise estatística dos dados;
- Implementação de um sistema inteligente para a identificação e diagnóstico de faltas, explorando, por exemplo, o potencial das redes neurais;
- Implementação de um sistema embarcado completo que, em uma parte do ciclo, realiza o recolhimento de energia para alimentar o próprio *hardware* e, em outro momento, realiza a captura, processamento e transmissão das informações;
- Analisar as frequências intermediárias do espectro no domínio da frequência, em relação aquelas apresentadas e discutidas no trabalho;
- Avaliação do desempenho do motor quando acionado por um inversor trifásico;
- Aprimoramentos como estimativa da severidade da falta;
- Expandir a análise para a identificação de outros tipos de faltas (rolamentos, enrolamentos do estator, etc).

## REFERÊNCIAS

- AIRES, O. L. D. *Impacto da integração da geração fotovoltaica no conteúdo harmônico das microrredes*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal da Paraíba, 2022.
- ALBERTO, J.; ALMEIDA, A. T. de; FERREIRA, F. J. T. E. Experimental study on the external shaft axial stray flux in squirrel-cage induction motors. In: *2021 IEEE Workshop on Electrical Machines Design, Control and Diagnosis (WEMDCD)*. [S.l.: s.n.], 2021. p. 254–259.
- AMBUR, R.; RINDERKNECHT, S. Unbalance detection in rotor systems with active bearings using self-sensing piezoelectric actuators. *Mechanical Systems and Signal Processing*, Elsevier, v. 102, p. 72–86, 03 2018. ISSN 0888-3270.
- ASSOCIACAO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS. *NBR 5462: Confiabilidade e manutenibilidade*. Rio de Janeiro, 1994.
- BATISTA, O. E. et al. Methodology for information extraction from oscillograms and its application for high-impedance faults analysis. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Elsevier, v. 76, p. 23–34, 2016. ISSN 0142-0615. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142061515004019>>.
- BENBOUZID, M.; KLIMAN, G. What stator current processing-based technique to use for induction motor rotor faults diagnosis? *IEEE Transactions on Energy Conversion*, v. 18, n. 2, p. 238–244, 2003.
- BOUDINAR, A. H. et al. Induction motor bearing fault analysis using a root-music method. *IEEE Transactions on Industry Applications*, v. 52, n. 5, p. 3851–3860, 2016.
- CAPOLINO, G.-A. et al. State of the art on stray flux analysis in faulted electrical machines. In: *2019 IEEE Workshop on Electrical Machines Design, Control and Diagnosis (WEMDCD)*. [S.l.: s.n.], 2019. v. 1, p. 181–187.
- CEBAN, A. *Méthode globale de diagnostic des machines électriques*. Tese (Doutorado) — Artois, 2012.
- CEBAN, A.; PUSCA, R.; ROMARY, R. Study of rotor faults in induction motors using external magnetic field analysis. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, v. 59, p. 2082–2093, 05 2012. Disponível em: <<https://api.semanticscholar.org/CorpusID:11854838>>.
- CHAPMAN, S. J. *Fundamentos de máquinas elétricas*. [S.l.]: AMGH editora, 2013.
- COSTA, C. da; KASHIWAGI, M.; MATHIAS, M. H. Rotor failure detection of induction motors by wavelet transform and fourier transform in non-stationary condition. *Case Studies in Mechanical Systems and Signal Processing*, v. 1, p. 15–26, 2015. ISSN 2351-9886. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2351988615000044>>.
- DONOLO, P.; BOSSIO, G.; ANGELO, C. D. Analysis of voltage unbalance effects on induction motors with open and closed slot. *Energy Conversion and Management*, Elsevier, v. 52, n. 5, p. 2024–2030, 05 2011.

DRIF, M.; CARDOSO, A. J. M. Stator fault diagnostics in squirrel cage three-phase induction motor drives using the instantaneous active and reactive power signature analyses. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, v. 10, n. 2, p. 1348–1360, 2014.

ESEN, G. K.; ÖZDEMİR, E. A new field test method for determining energy efficiency of induction motor. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, v. 66, n. 12, p. 3170–3179, 2017.

FAIZ, J.; GHORBANIAN, V.; JOKSIMOVIĆ, G. *Fault diagnosis of induction motors*. [S.l.]: Institution of Engineering and Technology, 2017. (IET energy engineering series). ISBN 9781523112395.

FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY, C.; UMANS, S. D. *Máquinas Elétricas - 6.ed.: Com Introdução à Eletrônica de Potência*. [S.l.]: Bookman, 2006. ISBN 9788560031047.

FLAUZINO, R. A. *Identificação e localização de faltas de alta impedância em sistemas de distribuição baseadas em decomposição por componentes ortogonais e inferência Fuzzy*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2007.

FROSINI, L.; ZANAZZO, S.; ALBINI, A. A wavelet-based technique to detect stator faults in inverter-fed induction motors. In: *2016 XXII International Conference on Electrical Machines (ICEM)*. [S.l.: s.n.], 2016. p. 2917–2923.

GARCIA, V. et al. Induction motor fault detection through external magnetic field aided by sigma-delta microcontroller: Rotor broken bar study. In: *2023 IEEE 8th Southern Power Electronics Conference and 17th Brazilian Power Electronics Conference (SPEC/COBEP)*. [S.l.: s.n.], 2023. p. 1–5.

GARCIA, V. et al. Non-invasive fault detection through external magnetic field aided by sigma-delta microcontroller. In: *2023 9th International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT)*. [S.l.: s.n.], 2023. p. 2354–2359.

GARCÍA-ESCUADERO, L. A. et al. Robust condition monitoring for early detection of broken rotor bars in induction motors. *Expert Systems with Applications*, v. 38, n. 3, p. 2653–2660, 2011. ISSN 0957-4174. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0957417410008511>>.

GHANBARI, T. Autocorrelation function-based technique for stator turn-fault detection of induction motor. *IET Science, Measurement & Technology*, v. 10, p. 100–110, 10 2015.

GODOY, W. F. et al. Application of intelligent tools to detect and classify broken rotor bars in three-phase induction motors fed by an inverter. *IET Electric Power Applications*, Wiley Online Library, v. 10, n. 5, p. 430–439, 2016.

GOHARI, M.; EYDI, A. M. Modelling of shaft unbalance: Modelling a multi discs rotor using k-nearest neighbor and decision tree algorithms. *Measurement*, v. 151, p. 107253, 2020. ISSN 0263-2241. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263224119311170>>.

GYFTAKIS, K. N. et al. Induction motors torque analysis via frequency extraction for reliable broken rotor bar detection. In: *2020 International Conference on Electrical Machines (ICEM)*. [S.l.: s.n.], 2020. v. 1, p. 1468–1474.

HAN, J.; PEI, J.; TONG, H. *Data Mining: Concepts and Techniques*. [S.l.]: Elsevier Science, 2022. (The Morgan Kaufmann Series in Data Management Systems). ISBN 9780128117613.

HAN, J.-H. et al. Motor fault diagnosis using cnn based deep learning algorithm considering motor rotating speed. In: *2019 IEEE 6th International Conference on Industrial Engineering and Applications (ICIEA)*. [S.l.: s.n.], 2019. p. 440–445.

HASAN, M. J.; ISLAM, M. M.; KIM, J.-M. Acoustic spectral imaging and transfer learning for reliable bearing fault diagnosis under variable speed conditions. *Measurement*, Elsevier, v. 138, p. 620–631, 02 2019. ISSN 0263-2241.

HENAO, H. et al. Trends in fault diagnosis for electrical machines: A review of diagnostic techniques. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, v. 8, n. 2, p. 31–42, 2014.

INVENSENSE INC. *MPU-9250*: Product specification. [S.l.], 2016. Disponível em: <<https://invensense.tdk.com/wp-content/uploads/2015/02/PS-MPU-9250A-01-v1.1.pdf>>.

IRHOUMAH, M. et al. Adapted coil sensors for measuring the external magnetic field of electrical machines. In: *Proceedings of the 6th International Conference on Engineering & MIS 2020*. [S.l.]: Association for Computing Machinery, 2020. p. 1–7. ISBN 9781450377362.

IRHOUMAH, M. A. A. *Diagnostic des machines électriques par fusion d'informations*. Tese (Doutorado) — Artois, 2019.

JOUANNE, A. V.; BANERJEE, B. Assessment of voltage unbalance. *IEEE transactions on power delivery*, v. 16, n. 4, p. 782–790, 2001.

KARMAKAR, S. et al. *Induction Motor Fault Diagnosis Approach through Current Signature Analysis*. [S.l.: s.n.], 2016. ISBN ISBN 978-981-10-0624-1.

KAWASE, Y. et al. Characteristics analysis of induction motor with broken rotor bars at steady state. In: *2020 23rd International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*. [S.l.: s.n.], 2020. p. 1190–1193.

KIM, S.-H. *Electric motor control: DC, AC, and BLDC motors*. [S.l.]: Elsevier, 2017. ISBN 9780128123195.

KUMAR, T. C. A.; SINGH, G.; NAIKAN, V. Sensitivity of rotor slot harmonics due to inter-turn fault in induction motors through vibration analysis. In: *2018 International Conference on Power, Instrumentation, Control and Computing (PICC)*. [S.l.: s.n.], 2018. p. 1–3.

LIBONI, L. H. B. *Diagnóstico de falhas em motores de indução trifásicos baseado em decomposição em componentes ortogonais e aprendizagem de máquinas*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2017.

LIM, W. Q. et al. Vibration-based fault diagnostic platform for rotary machines. In: *IECON 2010 - 36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*. [S.l.: s.n.], 2010. p. 1404–1409.

LIU, Z.; ZHANG, L. A review of failure modes, condition monitoring and fault diagnosis methods for large-scale wind turbine bearings. *Measurement*, Elsevier, v. 149, p. 107002, 2020. ISSN 0263-2241.

MACIEJEWSKI, N. A. R. *Detecção e diagnóstico de defeitos no regime transitório de motores de indução baseado em sistemas inteligentes*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2021.

MENEGAT, J. Estudo de falhas incipientes em motores de indução trifásicos utilizando a transformada discreta de wavelet. 2014.

MORTAZAVIZADEH, S. A.; MOUSAVI, S. A review on condition monitoring and diagnostic techniques of rotating electrical machines. *Physical Science International Journal*, SCIENCE DOMAIN International, v. 4, n. 3, p. 310–338, 01 2014.

NATH, S. et al. Low latency bearing fault detection of direct-drive wind turbines using stator current. *IEEE Access*, v. 8, p. 44163–44174, 2020.

NAVARRO-NAVARRO, A. et al. Current and stray flux combined analysis for the automatic detection of rotor faults in soft-started induction motors. *Energies*, v. 15, n. 7, 2022. ISSN 1996-1073. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1996-1073/15/7/2511>>.

NEMEC, M. et al. Detection of broken bars in induction motor through the analysis of supply voltage modulation. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, v. 57, n. 8, p. 2879–2888, 2010.

OSTOJIC, P. et al. Advanced motor monitoring and diagnostics. p. 318–326, 2014.

PANDARAKONE, S. E.; MIZUNO, Y.; NAKAMURA, H. Distinct fault analysis of induction motor bearing using frequency spectrum determination and support vector machine. *IEEE Transactions on Industry Applications*, v. 53, n. 3, p. 3049–3056, 2017.

PARK, S.-H. et al. Suppression of torque ripple caused by misalignment of the gearbox by using harmonic current injection method. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, v. 25, n. 4, p. 1990–1999, 2020.

PAVAN, S.; SCHREIER, R.; TEMES, G. C. *Understanding delta-sigma data converters*. [S.l.]: Wiley, 2017. (IEEE Press Series on Microelectronic Systems). ISBN 9781119258278.

PUSCA, R. et al. An improvement of a diagnosis procedure for ac machines using two external flux sensors based on a fusion process with belief functions. In: *IECON 2012 - 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*. [S.l.: s.n.], 2012. p. 5096–5101.

RAHMAN, M. M.; UDDIN, M. N. Online unbalanced rotor fault detection of an im drive based on both time and frequency domain analyses. *IEEE Transactions on Industry Applications*, v. 53, n. 4, p. 4087–4096, 2017.

RAZIK, H.; CORREA, M. B. d. R.; SILVA, E. R. C. da. A novel monitoring of load level and broken bar fault severity applied to squirrel-cage induction motors using a genetic algorithm. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, v. 56, n. 11, p. 4615–4626, 2009.

ROHDE&SCHWARZ. Specifications of hz-10 shielded and calibrated magnetic field pickup coil. *Germany*, 2022. Disponível em: <[https://cdn.rohde-schwarz.com/pws/dl\\_downloads/dl\\_common\\_library/dl\\_brochures\\_and\\_datasheets/pdf\\_1/HZ-10\\_22.pdf](https://cdn.rohde-schwarz.com/pws/dl_downloads/dl_common_library/dl_brochures_and_datasheets/pdf_1/HZ-10_22.pdf)>.

SAAD, N.; IRFAN, M.; IBRAHIM, R. *Condition Monitoring and Faults Diagnosis of Induction Motors: Electrical Signature Analysis*. [S.l.]: CRC Press, 2018. ISBN 9780815389958.

SAMONIG, M. A.; WOLBANK, T. M. Exploiting rotor slotting harmonics to determine and separate static and dynamic air-gap eccentricity in induction machines. In: *2017 IEEE 11th International Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED)*. [S.l.: s.n.], 2017. p. 52–57.

SANTOS, F. M. d. C.; SILVA, I. N. d.; SUETAKE, M. Sobre a aplicação de sistemas inteligentes para diagnóstico de falhas em máquinas de indução-uma visão geral. *Sba: Controle & Automação Sociedade Brasileira de Automatica*, SciELO Brasil, v. 23, n. 5, p. 553–569, 2012. ISSN 0103-1759.

SCHREIER, R.; TEMES, G. C. et al. *Understanding delta-sigma data converters*. [S.l.]: IEEE press Piscataway, NJ, 2005. v. 74.

SEERA, M. et al. Condition monitoring of induction motors: A review and an application of an ensemble of hybrid intelligent models. *Expert Systems with Applications*, Elsevier, v. 41, n. 10, p. 4891–4903, 2014. ISSN 0957-4174. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0957417414000918>>.

SHARMA, A. et al. A review of fault diagnostic and monitoring schemes of induction motors. *International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology*, v. 3, p. 1145–1152, 04 2015.

SILVA, A. M. da; POVINELLI, R. J.; DEMERDASH, N. A. O. Rotor bar fault monitoring method based on analysis of air-gap torques of induction motors. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, v. 9, n. 4, p. 2274–2283, 2013.

SILVA, A. S. d. Desenvolvimento de um módulo de harvesting de energia eletromagnética. Universidade Federal de Santa Catarina, 2020.

SILVA, M. A. d. *Método de estimação da velocidade em motores de indução trifásicos através da corrente de armadura com aplicação da Teoria do Caos*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal da Paraíba, 2021.

SOUZA, W. G. d. *Identificação de falhas em rolamentos aplicados em motores de indução por meio de sensores de corrente de efeito hall, técnicas de processamento de sinais e sistemas inteligentes*. Tese (Doutorado) — Universidade Estadual Paulista (Unesp), 2022.

SWARNKAR, K. K.; RAI, J.; WADHWANI, S. Stator inter-turn fault diagnosis by motor current signature approach. In: *2022 4th International Conference on Smart Systems and Inventive Technology (ICSSIT)*. [S.l.: s.n.], 2022. p. 584–588.

TAVNER, P. *Condition Monitoring of Rotating Electrical Machines*. [S.l.]: Institution of Engineering and Technology, 2008. (Energy Engineering). ISBN 9780863417412.

- TIAN, P. et al. Stray flux sensor core impact on the condition monitoring of electrical machines. *Sensors*, v. 20, n. 3, 2020. ISSN 1424-8220. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1424-8220/20/3/749>>.
- TOLIYAT, H. A.; KLIMAN, G. B. *Handbook of Electric Motors*. [S.l.]: CRC press, 2018. v. 120. (Electrical and computer engineering, v. 120). ISBN 9781420030389.
- TOLIYAT, H. A. et al. *Electric machines: modeling, condition monitoring, and fault diagnosis*. [S.l.]: CRC press, 2012. ISBN 9780849370274.
- TONG, W. *Mechanical design of electric motors*. [S.l.]: CRC press, 2014. ISBN 9781420091434.
- TRIGEASSOU, J.-C. *Electrical Machines Diagnosis*. [S.l.]: Wiley, 2013. ISBN 9781118601709.
- TUMANSKI, S. Induction coil sensors—a review. *Measurement Science and Technology*, IOP Publishing, v. 18, n. 3, p. R31, 2007.
- VERUCCHI, C. J. et al. Efficiency assessment of induction motors drives operating under shaft misalignment conditions. *Advances in Electrical and Electronic Engineering*, v. 18, n. 3, p. 142–152, 09 2020.
- VICENTE, J. P. *Detecção de Falha do Estator de um Motor de Indução Trifásico Utilizando uma Bobina Exploratória Externa*. Dissertação (Mestrado) — Instituto Politecnico de Braganca (Portugal), 2021.
- WANG, Z. et al. Fault diagnosis of a rolling bearing using wavelet packet denoising and random forests. *IEEE Sensors Journal*, v. 17, n. 17, p. 5581–5588, 2017.
- WEG. *Indústria pode mudar o cenário do consumo de energia no Brasil*. [S.l.], 2019. Disponível em: <<https://valor.globo.com/patrocinado/weg/weg/noticia/2019/08/05/industria-4-0-pode-mudar-o-cenario-do-consumo-de-energia-no-brasil.ghtml>>.
- WEG. Guia de especificação de motores elétricos. *Jaraguá do Sul*, 2023. Disponível em: <<https://static2.weg.net/medias/downloadcenter/h32/hc5/WEG-motores-eletricos-guia-de-especificacao-50032749-brochure-portuguese-web.pdf>>.
- WHEELER, H. A. Simple inductance formulas for radio coils. *Proceedings of the Institute of Radio Engineers*, v. 16, n. 10, p. 1398–1400, 1928.
- YANG, T. et al. Feature knowledge based fault detection of induction motors through the analysis of stator current data. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, v. 65, n. 3, p. 549–558, 2016.
- ZHANG, S. et al. Model-based analysis and quantification of bearing faults in induction machines. *IEEE Transactions on Industry Applications*, v. 56, n. 3, p. 2158–2170, 2020.

## **APÊNDICE A – PRINCÍPIOS FUNDAMENTAIS DOS MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS**

Em todos os avanços, a presença do motor elétrico é essencial. Desempenhando um papel crucial na sociedade, esses motores representam o núcleo das máquinas modernas, tornando-se essencial compreender os princípios fundamentais que regem seu funcionamento, desde a fase de construção até as diversas aplicações.

### **A.1 TIPOS DE MOTORES ELÉTRICOS E SUAS CARACTERÍSTICAS**

A máquina elétrica é um dispositivo capaz de converter a energia elétrica em mecânica e vice-versa. Quando este dispositivo é usado com a finalidade de converter energia mecânica em elétrica, ele é chamado de gerador. E quando realiza o processo inverso, ou seja, a conversão da energia elétrica em mecânica, ele é denominado motor. As máquinas elétricas podem ser usadas como gerador ou motor, já que todas elas podem realizar a conversão de energia em ambos os sentidos (CHAPMAN, 2013).

Os motores elétricos são frequentemente categorizados com base nos requisitos de fornecimento de energia em seus terminais, no tipo de enrolamento do rotor, no padrão de controle, na orientação do fluxo magnético, nos métodos de resfriamento, na razão de potência e na topologia da estrutura (TONG, 2014). De acordo com Chapman (2013), os motores elétricos podem ser classificados em dois tipos principais: Corrente Contínua – CC ou Corrente Alternada – CA.

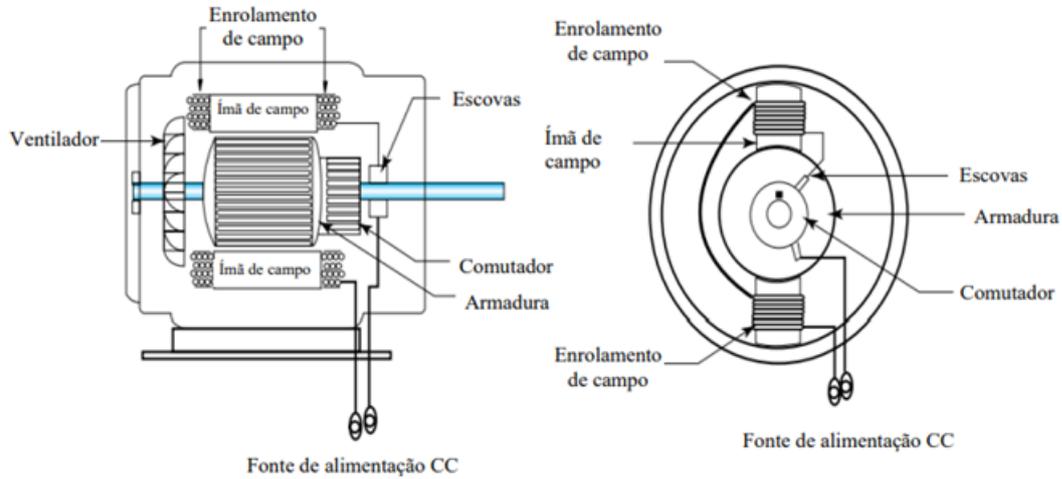
Os motores CC possuem um custo inicial mais elevado, demandando uma fonte de corrente contínua ou dispositivos conversores para adaptar a corrente alternada da rede. Estes motores operam em uma ampla faixa de velocidades ajustáveis, proporcionando alta precisão e flexibilidade. Assim, sua aplicação se restringe a contextos específicos devido aos custos elevados associados à instalação e manutenção (WEG, 2023). Adicionalmente, esses motores são frequentemente classificados com base nas configurações dos enrolamentos de campo, como os motores com excitação em paralelo, série ou independente (TOLIYAT; KLIMAN, 2018).

Ambos os campos magnéticos presentes em um motor CC são estacionários, sendo o campo magnético do estator gerado por ímãs ou pelo enrolamento de campo, e o campo magnético do rotor produzido pela corrente que percorre os condutores desse componente (TOLIYAT; KLIMAN, 2018). A Figura A.1 apresenta os principais componentes de um motor CC.

Já os motores CA são amplamente empregados devido à distribuição convencional de energia em corrente alternada. No caso dos motores de indução, as correntes são induzidas nos enrolamentos do rotor devido aos fenômenos resultantes da variação temporal da corrente do estator e ao movimento relativo do rotor em relação ao estator (TOLIYAT; KLIMAN, 2018). Os componentes que compõem esse tipo de motor

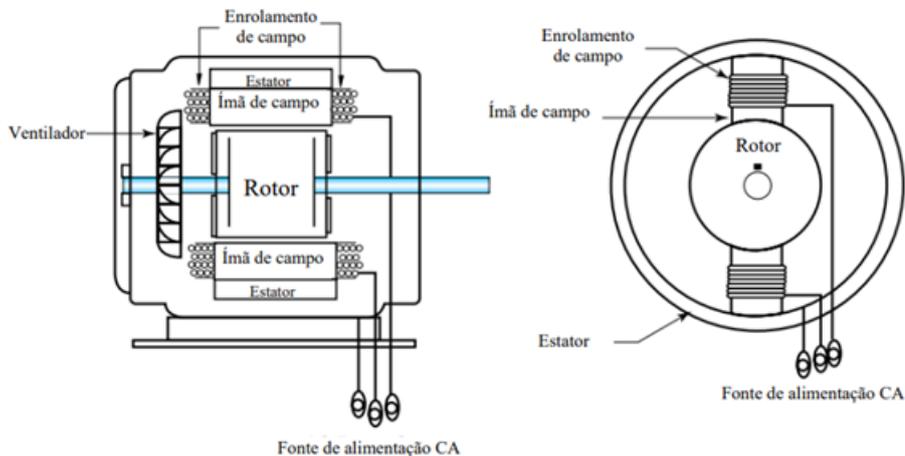
são ilustrados na Figura A.2.

Figura A.1 – Esquema descritivo de um motor CC.



Fonte: Silva (2021, p. 30).

Figura A.2 – Esquema descritivo de um motor CA.



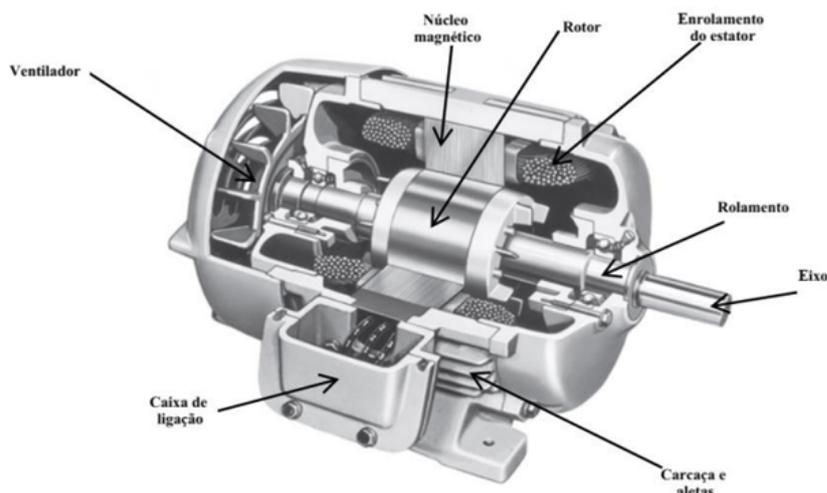
Fonte: Silva (2021, p. 31).

Dentre os diversos tipos de máquinas elétricas, destaca-se o motor de indução como o mais amplamente empregado devido à sua simplicidade, robustez, custo reduzido, exigências mínimas de manutenção, facilidade de transporte, versatilidade para se adaptar a uma ampla gama de cargas e alto desempenho em comparação a outros tipos de motores (SILVA, 2021). Além disso, ele é apropriado para acionar praticamente todos os tipos de máquinas e cargas encontrados na indústria, e é possível controlar a velocidade dos motores de indução com o auxílio de inversores de frequência (CHAPMAN, 2013).

## A.2 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DOS MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS

Os motores de indução derivam sua denominação do método pelo qual transferem potência do enrolamento do estator para o rotor. Essa transmissão resulta do movimento relativo entre o campo magnético gerado pelo enrolamento do estator e os condutores do rotor, gerando uma tensão induzida no rotor. A corrente decorrente dessa tensão interage com o campo magnético, originando o torque do motor (TOLIYAT; KLIMAN, 2018). O motor CA de indução é composto por vários elementos, sendo o estator e o rotor os componentes fundamentais dessa máquina. A Figura A.3 apresenta uma ilustração dos principais componentes que compõem o motor de indução.

Figura A.3 – Diagrama de corte de um motor CA de indução com o rotor gaiola de esquilo.



Fonte: Silva (2021, p. 33).

A carcaça, que constitui a estrutura externa do motor e possui uma superfície aletada para facilitar o resfriamento, abriga o núcleo do estator com o enrolamento trifásico, o qual é instalado nas ranhuras da carcaça. O núcleo do estator é constituído por lâminas com espessura variando de 0,3 mm a 0,5 mm, que são posicionadas no interior do motor. Cada lâmina que compõe o núcleo do estator é isolada para minimizar as perdas por corrente de *Foucault*. A extremidade frontal do motor é coberta por uma tampa, desempenhando a função adicional de sustentar o rolamento de esferas dianteiro. Na outra extremidade, encontra-se um ventilador, apoiado pelo segundo mancal. A caixa de ligação proporciona acesso aos enrolamentos do estator (SILVA, 2021).

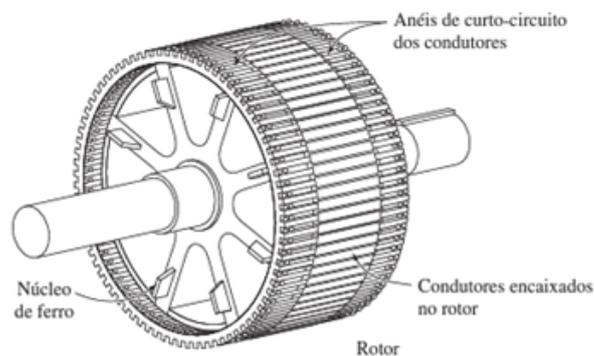
No motor CA de indução, a tensão trifásica é aplicada apenas aos enrolamentos do estator. Esses enrolamentos estão localizados nas ranhuras do núcleo do estator,

dispostos a 120 graus elétricos entre cada fase. Geralmente, eles são conectados em configuração delta quando operam em baixa tensão de alimentação ou em estrela quando a tensão de alimentação é elevada (KIM, 2017).

O rotor desempenha um papel crucial nos motores de indução, sendo o componente mecânico girante responsável por realizar o trabalho necessário para movimentar uma carga externa específica. Existem dois tipos principais de rotores em motores de indução: o rotor bobinado e o rotor gaiola de esquilo (TONG, 2014). No entanto, este trabalho concentra-se no rotor gaiola de esquilo, que equipará o motor utilizado nos ensaios.

O rotor do tipo gaiola de esquilo apresenta em seu projeto uma série de condutores dispostos nas ranhuras superficiais do componente, como ilustrado na Figura A.4. Esses condutores são conectados em curto-circuito por meio de anéis posicionados nas extremidades (CHAPMAN, 2013). A aplicação de tensão nos enrolamentos do estator é responsável pela criação do campo magnético girante, o qual induz uma tensão no rotor (SILVA, 2021).

Figura A.4 – Rotor gaiola de esquilo.



Fonte: Adaptado de Chapman (2013, p. 308).

No que diz respeito ao princípio de funcionamento, ao contrário de um motor CC, onde os campos magnéticos permanecem estacionários, o motor de indução CA se distingue pelo fato de que o campo magnético gerado pelo estator é girante. Essa rotação do campo magnético é a principal diferença no princípio de funcionamento entre um motor de indução CA e um motor CC. Esse fenômeno é resultado da aplicação de uma fonte de tensão alternada trifásica nos enrolamentos do estator, nos quais as correntes, defasadas de 120 graus entre si, produzem um campo magnético girante no entreferro (KIM, 2017).

Devido à variação do fluxo do campo magnético, surge uma força eletromotriz nos condutores do rotor, conforme estabelecido pela lei de *Faraday*. O torque exercido pelo motor resulta da interação entre as correntes causadas pelas tensões induzidas nos condutores em curto e o campo magnético girante. Portanto, o torque provoca

o movimento de rotação do rotor na mesma direção desse campo magnético (KIM, 2017).

### A.2.1 Velocidade síncrona

A velocidade síncrona ( $n_s$ ) do motor é determinada pela velocidade de rotação do campo girante. Este parâmetro é definido pelo número de polos e pela frequência da fonte de alimentação. De acordo com Chapman (2013), a velocidade síncrona, medida em rotações por minuto, é:

$$n_s = \frac{120 \cdot f}{P} \quad (\text{A.1})$$

Onde  $n_s$  é velocidade síncrona (RPM);  $f$  é a frequência da fonte de alimentação (Hz);  $P$  é o número de polos do motor.

### A.2.2 Escorregamento

O desempenho de um motor CA de indução é influenciado pela tensão induzida e pela corrente nos condutores do rotor, ambos dependentes da velocidade do rotor em relação aos campos magnéticos. Em vista disso, é comum descrever os parâmetros do motor em termos de velocidade relativa. Dois termos frequentemente utilizados para esse propósito são a velocidade de escorregamento e o próprio escorregamento. A velocidade de escorregamento é definida como a diferença entre a velocidade de rotação do campo magnético e a do rotor (CHAPMAN, 2013). O escorregamento, por sua vez, é expresso como uma porcentagem da velocidade síncrona, conforme expresso pela Equação A.2.

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \quad (\text{A.2})$$

Em que  $s$  é o escorregamento do motor;  $n_s$  é velocidade síncrona (RPM);  $n$  é a velocidade do motor (RPM).



## APÊNDICE B – ENSAIOS REALIZADOS

Nas duas tabelas apresentadas neste apêndice são mostrados os ensaios e as condições de realização deste ensaios.

Tabela B.1 – Parte 1: condições de realização dos ensaios.

Nº do ensaio	Estado do motor	Tensão alimentação (fase)	Carga
1	Íntegro	55V	Vazio
2			1kg
3			2kg
4			3kg
5			4kg
6			5kg
7		110V	Vazio
8			1kg
9			2kg
10			3kg
11			4kg
12			5kg
13		165V	Vazio
14			1kg
15			2kg
16			3kg
17			4kg
18			5kg
19		220V	<b>Vazio</b>
20			<b>1kg</b>
21			<b>2kg</b>
22			<b>3kg</b>
23			<b>4kg</b>
24			<b>5kg</b>
25	1 barra rompida	55V	Vazio
26			1kg
27			2kg
28			3kg
29			4kg
30			5kg
31		110V	Vazio
32			1kg
33			2kg
34			3kg
35			4kg
36			5kg

Fonte: Autor (2024).

Tabela B.2 – Parte 2: condições de realização dos ensaios.

Nº do ensaio	Estado do motor	Tensão alimentação (fase)	Carga
37	1 barra rompida	165V	Vazio
38			1kg
39			2kg
40			3kg
41			4kg
42		5kg	
43		220V	<b>Vazio</b>
44			<b>1kg</b>
45			<b>2kg</b>
46			<b>3kg</b>
47	<b>4kg</b>		
48	<b>5kg</b>		
49	3 barras rompidas	55V	Vazio
50			1kg
51			2kg
52			3kg
53			4kg
54		5kg	
55		110V	Vazio
56			1kg
57			2kg
58			3kg
59			4kg
60		165V	5kg
61			Vazio
62			1kg
63			2kg
64			3kg
65		4kg	
66		5kg	
67		220V	<b>Vazio</b>
68			<b>1kg</b>
69			<b>2kg</b>
70			<b>3kg</b>
71			<b>4kg</b>
72		<b>5kg</b>	

Fonte: Autor (2024).