

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CAMPUS FLORIANÓPOLIS - CENTRO TECNOLÓGICO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E ELETRÔNICA  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Luciano Bortoloto Antunes

**ESTUDO DE SENSORES APLICADOS NA DETECÇÃO DE FALTAS EM  
GERADORES SÍNCRONOS**

Florianópolis

2021

Luciano Bortoloto Antunes

**ESTUDO DE SENSORES APLICADOS NA DETECÇÃO DE FALTAS EM  
GERADORES SÍNCRONOS**

Trabalho de Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Nelson Jhoe Batistela, Dr.

Coorientador: Carlos Alexandre Corrêa Wengerkievitz, M. Sc.

Florianópolis

2021

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Antunes, Luciano Bortoloto

Estudo de sensores aplicados na detecção de faltas em geradores síncronos / Luciano Bortoloto Antunes ; orientador, Nelson Jhoe Batistela, coorientador, Carlos Alexandre Corrêa Wengerkiewicz, 2021.

86 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Graduação em Engenharia Elétrica, Florianópolis, 2021.

Inclui referências.

1. Engenharia Elétrica. 2. Detecção de Faltas. 3. Gerador síncrono. 4. Sensor por indução. I. Batistela, Nelson Jhoe. II. Wengerkiewicz, Carlos Alexandre Corrêa. III. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia Elétrica. IV. Título.

Luciano Bortoloto Antunes

## ESTUDO DE SENSORES APLICADOS NA DETECÇÃO DE FALTAS EM GERADORES SÍNCRONOS

Este Trabalho Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de “Bacharel em Engenharia Elétrica” e aceito, em sua forma final, pelo Curso de Graduação em Engenharia Elétrica.

Florianópolis, 20 de maio de 2021.



Documento assinado digitalmente  
Jean Viane Leite  
Data: 21/05/2021 17:20:57-0300  
CPF: 003.474.909-80  
Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

---

Prof. Jean Viane Leite, Dr.  
Coordenador do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica


### **Banca Examinadora:**



Documento assinado digitalmente  
Nelson Jhoe Batistela  
Data: 20/05/2021 17:43:59-0300  
CPF: 504.929.939-04  
Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

---

Prof. Nelson Jhoe Batistela, Dr.  
Orientador  
Universidade Federal de Santa Catarina

DocuSigned by:  
  
DE147319F8A9490...

21-05-2021 | 6:39 PM BRT

---

Eng. Eletric. Rubens José Nascimento  
Avaliador  
Engie Brasil Energia



Documento assinado digitalmente  
Luis Otavio Steffenmunsberg Grillo  
Data: 20/05/2021 17:47:06-0300  
CPF: 833.860.500-00  
Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

---

Eng. Eletric. Luis Otavio Steffenmunsberg Grillo, M. Sc.  
Avaliador  
Universidade Federal de Santa Catarina

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço aos meus pais pelo suporte e apoio prestados durante todos estes anos de graduação.

Agradeço aos meus companheiros de curso que estiveram nessa jornada sem perder a determinação e a vontade de aprender cada vez mais.

Agradeço aos meus amigos do GRUCAD que sempre estavam dispostos a ajudar quando necessário.

Agradeço o auxílio e a disponibilidade de tempo fornecidos pelos engenheiros eletricitas Cristian F. Mazzola e Luis Otavio S. Grillo na realização dos ensaios experimentais deste TCC.

Agradeço o meu orientador, Nelson Jhoe Batistela, pela oportunidade de fazer parte do GRUCAD e pela orientação fornecida. Agradeço-o também por fornecer a oportunidade de trabalhar com um tema tão interessante.

Agradeço o meu coorientador, Carlos A. C. Wengerkievicz, pelo tempo disponibilizado na correção, durante inúmeras iterações, deste trabalho. Além disso, agradeço-o pelas sugestões propostas para enriquecer ainda mais o projeto.

## RESUMO

A interrupção não programada de unidades geradoras de energia ou de motores industriais gera transtornos econômicos, sociais e em muitas outras áreas. A detecção de faltas incipientes em estágios iniciais permite a realização de manutenções preditivas, diminuindo assim a probabilidade de ocorrência de interrupções não programadas. Os métodos de detecção não invasivos são altamente desejados, visto a dispensa da parada da máquina para inserção dos dispositivos no seu interior. Este trabalho faz um estudo do desempenho entre sensores de campo magnético instalados internamente, invasivos, e externamente, não invasivos. Foram realizados ensaios em uma bancada de testes que permite a imposição, de maneira controlada, de faltas incipientes. É analisado o efeito das faltas no espectro de frequência, no valor eficaz do campo e na tensão induzida por polo do campo girante. Ao fim do trabalho, geraram-se indicativos para aplicações não invasivas de como realizar a detecção de faltas de maneira semelhante à invasiva.

**Palavras-chave:** Sensor de campo. Sensor de entreferro. Detecção de faltas.

## **ABSTRACT**

The unscheduled interruption of power generating units and industrial motors generates economic, social and many other disruptions. The detection of incipient faults in the early stages allows predictive maintenance to be carried out, thus decreasing the probability of unscheduled interruptions. Non-invasive detection methods are highly desirable for not requiring the insertion of devices inside the machine. This work studies the performance of flux sensors installed internally, invasively, and externally, in a non-invasive manner. Tests were carried out in a test bench that allows the controlled imposition of incipient faults. The effect of faults on the frequency spectrum, on the RMS magnetic field and on the induced voltage per pole were analyzed. The results indicate how apply non-invasive sensors to perform fault detection in a similar way to invasive sensors.

**Keywords:** Field Sensor. Air Gap Sensor. Fault detection.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Rotor de (a) 2 polos lisos. (b) 2 polos salientes. ....	19
Figura 2 – Máquina síncrona (a) Estator. (b) Rotor. ....	19
Figura 3 – Fluxo magnético no rotor medido pelo equipamento <i>FluxTracII-S<sup>TM</sup></i> . ....	21
Figura 4 – Locais de instalação de sensores da Iris Power. ....	21
Figura 5 – Locais de instalação de sensores da VibroSystM. ....	22
Figura 6 – (a) Lei de Faraday-Lenz. (b) Relação entre fluxo e indução. ....	23
Figura 7 – Modelos 3D de sensores Tipo I com formatos quadrado e circular. ....	25
Figura 8 – Sensores Tipo I confeccionados com formatos quadrado e circular. ....	25
Figura 9 – Bobina de Helmholtz, esquema e dispositivo real. ....	27
Figura 10 – Tensão induzida em função da frequência nos três tipos de sensores com formato circular e quadrado. ....	28
Figura 11 – Tensão induzida em função da frequência nos sensores do ensaio de repetibilidade. ....	29
Figura 12 – Comparação entre os desvios das linhas de tendência de tensão induzida, em cada frequência de ensaio, com a repetibilidade da fabricação. ....	30
Figura 13 – Diferença entre tensão induzida em sensores com e sem sobreposição de espiras, para formato circular e quadrado. ....	31
Figura 14 – Indutâncias medidas para os sensores do ensaio de comparação de formatos. ....	32
Figura 15 – Exploratrizes gerador de 8 polos. ....	34
Figura 16 – Simulação em elementos finitos do gerador de 8 polos. ....	35
Figura 17 – Forma de onda esperada dos sinais nas exploratrizes. ....	35
Figura 18 – Aquisição 1, exploratrizes (1), (2), (3) e (5). ....	37
Figura 19 – Aquisição 2, exploratrizes (4), (5), (6) e (7). ....	37
Figura 20 – Aquisição 3, exploratrizes (5), (8), (9) e (10). ....	37
Figura 21 – Aquisição 4, exploratrizes (5), (11), (12) e (13). ....	38
Figura 22 – Aquisição 5, exploratrizes (5), (14), (15) e (16). ....	38
Figura 23 – Sinal exemplo. ....	43
Figura 24 – Integral do sinal exemplo. ....	43
Figura 25 – Forma de onda de uma máquina sadia de 4 polos. ....	44
Figura 26 – Forma de onda de uma máquina defeituosa de 4 polos. ....	45
Figura 27 – Fluxo por polo da máquina. ....	45

Figura 28 – Bancada de testes.....	47
Figura 29 – Esquema para realização de faltas elétricas no rotor.....	49
Figura 30 – Esquema para realização de faltas elétricas no estator.....	50
Figura 31 – Esquema para realização de falta no núcleo do estator.....	51
Figura 32 – Esquema para realização de falta de deslocamento de eixo.....	52
Figura 33 – Maleta contendo circuito de condicionamento e de aquisição.....	53
Figura 34 – Topologia de um canal da maleta.....	54
Figura 35 – Esquemático do ramo direto da maleta.....	55
Figura 36 – Painel frontal do VI da maleta.....	56
Figura 37 – Painel frontal e pinagem da placa NI USB-6361 BNC.....	57
Figura 38 – Circuito de proteção para NI USB-6361 BNC.....	58
Figura 39 – Aparato completo para medição das exploratrizes.....	58
Figura 40 – Esquemático do filtro para gerador em sincronismo.....	59
Figura 41 – Distribuição dos sensores por indução na carcaça do gerador.....	60
Figura 42 – Ensaio na bancada de testes.....	61
Figura 43 – Ensaio 1, sinais das exploratrizes.....	62
Figura 44 – Ensaio 1, valores de pico da exploratriz 90°E.....	62
Figura 45 – Ensaio 1, valores da indução magnética RMS para as exploratrizes.....	63
Figura 46 – Ensaio 1, histórico de amplitudes das exploratrizes.....	64
Figura 47 – Ensaio 1, sinais dos sensores externos.....	65
Figura 48 – Ensaio 1, valores de pico do sensor de campo Q2.....	66
Figura 49 – Ensaio 1, valores do campo magnético RMS para os sensores de campo. .....	66
Figura 50 – Ensaio 1, histórico de amplitudes dos sensores de campo.....	67
Figura 51 – Ensaio 2, sinais das exploratrizes.....	68
Figura 52 – Ensaio 2, valores da indução magnética RMS para as exploratrizes.....	69
Figura 53 – Ensaio 2, histórico de amplitudes das exploratrizes.....	70
Figura 54 – Ensaio 2, sinais dos sensores externos.....	71
Figura 55 – Ensaio 2, valores do campo magnético RMS para os sensores de campo. .....	72
Figura 56 – Ensaio 2, histórico de amplitudes dos sensores de campo.....	72
Figura 57 – Ensaio 3, sinais das exploratrizes.....	73
Figura 58 – Ensaio 3, valores da indução magnética RMS para as exploratrizes.....	74

Figura 59 – Ensaio 3, sinais dos sensores externos.....	75
Figura 60 – Ensaio 3, valores do campo magnético RMS para os sensores de campo. .....	75
Figura 61 – Ensaio 3, histórico de amplitudes dos sensores de campo.....	76
Figura 62 – Esquema de referência para o deslocamento de eixo. ....	77
Figura 63 – Ensaio 4, sinais das exploratrizes. ....	77
Figura 64 – Ensaio 4, valores de pico da exploratriz 90°E e CE. ....	78
Figura 65 – Ensaio 4, valores da indução magnética RMS para as exploratrizes.....	78
Figura 66 – Ensaio 4, histórico de amplitudes das exploratrizes. ....	79
Figura 67 – Ensaio 4, sinais dos sensores externos.....	80
Figura 68 – Ensaio 4, valores de pico do sensor de campo Q2. ....	80
Figura 69 – Ensaio 4, valores do campo magnético RMS para os sensores de campo. .....	81
Figura 70 – Ensaio 4, histórico de amplitudes dos sensores de campo.....	81

## LISTA DE TABELAS

Tabela I – Parâmetros construtivos dos sensores.....	25
Tabela II – Resistências e indutâncias calculadas e medidas. As siglas C e Q se referem a seção circular e quadrada, respectivamente. Sobrep se refere aos sensores sem camadas sobrepostas do ensaio de sobreposição. ....	31
Tabela III – Parâmetros das máquinas elétricas da bancada de testes.....	48
Tabela IV – Parâmetros dos circuitos de proteção para NI USB-6361 BNC.....	58

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

AMR Anisotropic Magneto-Resistive

LAESP Laboratório de Acionamentos Elétricos Especiais

SIN Sistema Interligado Nacional

GS Gerador Síncrono

FFT Fast Fourier Transformation

RMS Root Mean Square

CC Corrente Contínua

CA Corrente Alternada

UFSC Universidade Federal de Santa Catarina

LABMAQ Laboratório de Máquinas e Acionamentos Elétricos

SNR Signal Noise Ratio

CI Circuito Integrado

CMRR Common Mode Rejection Ratio

NI National Instruments

LabVIEW Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench

VI Virtual Instrument

GRUCAD Grupo de Concepção e Análise de Dispositivos Eletromagnéticos

LA Lado Acoplado

LNA Lado Não-Acoplado

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>15</b>
1.1	OBJETIVOS.....	16
1.1.1	<b>Objetivo Geral .....</b>	<b>16</b>
1.1.2	<b>Objetivos Específicos .....</b>	<b>17</b>
<b>2</b>	<b>DETECÇÃO DE FALTAS INCIPIENTES EM GERADORES SÍNCRONOS</b>	<b>18</b>
2.1	A MÁQUINA SÍNCRONA .....	18
2.2	A DETECÇÃO DE FALTAS INCIPIENTES .....	20
<b>3</b>	<b>SENSORES À MEDIÇÃO DE CAMPO MAGNÉTICO .....</b>	<b>23</b>
3.1	SENSOR DE CAMPO MAGNÉTICO POR INDUÇÃO .....	23
3.2	CONFECÇÃO E CALIBRAÇÃO DOS SENSORES POR INDUÇÃO.....	24
3.2.1	<b>Confecção de Amostras .....</b>	<b>24</b>
3.2.2	<b>Estimativa dos Parâmetros Elétricos .....</b>	<b>26</b>
3.2.3	<b>Aparato para Realização de Ensaios em Sensores Por Indução .....</b>	<b>27</b>
3.2.4	<b>Ensaio de Comparação de Formatos.....</b>	<b>27</b>
3.2.5	<b>Ensaios de Repetibilidade.....</b>	<b>28</b>
3.2.6	<b>Ensaio de Sobreposição de Espiras .....</b>	<b>30</b>
3.2.7	<b>Medição da Indutância e Resistência .....</b>	<b>31</b>
3.2.8	<b>Conclusão do Estudo de Aspectos Construtivos de Sensores por Indução ....</b>	<b>32</b>
3.3	EXPLORATRIZES .....	33
3.4	CONFECÇÃO E CALIBRAÇÃO DAS EXPLORATRIZES .....	36
<b>4</b>	<b>TÉCNICAS DE ANÁLISE .....</b>	<b>40</b>
4.1	INDICADORES NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA.....	40
4.2	INDICADORES NO DOMÍNIO DO TEMPO .....	40
4.2.1	<b>Valor Eficaz do Campo Magnético .....</b>	<b>41</b>
4.2.2	<b>Fluxo por Polo.....</b>	<b>44</b>

<b>5</b>	<b>SISTEMA DE ENSAIOS.....</b>	<b>47</b>
5.1	BANCADA DE TESTES .....	47
5.2	SISTEMAS DE CONDICIONAMENTO E AQUISIÇÃO DE SINAIS.....	52
<b>5.2.1</b>	<b>Sistema para Sensores de Campo Externo .....</b>	<b>52</b>
<b>5.2.2</b>	<b>Sistema para Exploratrizes.....</b>	<b>56</b>
5.3	CONEXÃO COM A REDE ELÉTRICA .....	59
<b>6</b>	<b>ENSAIOS NA BANCADA DE TESTES.....</b>	<b>60</b>
6.1	ENSAIO 1 - RETIRADA DE ESPIRAS DE UM POLO DO ROTOR .....	61
<b>6.1.1</b>	<b>Ensaio 1 – Exploratrizes .....</b>	<b>61</b>
<b>6.1.2</b>	<b>Ensaio 1 – Sensores por Indução.....</b>	<b>65</b>
6.2	ENSAIO 2 – RETIRADA DE ESPIRAS DE UM POLO DO ESTATOR .....	68
<b>6.2.1</b>	<b>Ensaio 2 – Exploratrizes .....</b>	<b>68</b>
<b>6.2.2</b>	<b>Ensaio 2 – Sensores por Indução.....</b>	<b>71</b>
6.3	ENSAIO 3 – CURTO DE LÂMINAS NO NÚCLEO.....	73
<b>6.3.1</b>	<b>Ensaio 3 – Exploratrizes .....</b>	<b>73</b>
<b>6.3.2</b>	<b>Ensaio 3 – Sensores por Indução.....</b>	<b>74</b>
6.4	ENSAIO 4 – DESLOCAMENTO DE EIXO.....	76
<b>6.4.1</b>	<b>Ensaio 4 – Exploratrizes .....</b>	<b>77</b>
<b>6.4.2</b>	<b>Ensaio 4 – Sensores por Indução.....</b>	<b>80</b>
<b>7</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>83</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>85</b>

## 1 INTRODUÇÃO

As máquinas elétricas rotativas são largamente utilizadas para diversas finalidades, seja operando como motores em indústrias, como geradores em usinas de geração de energia elétrica, ou em simples elementos do dia-a-dia como eletrodomésticos, brinquedos, computadores e tantas outras aplicações.

No contexto das máquinas de grande potência, a interrupção não programada pode acarretar em diversos problemas. No caso de motores industriais a parada inesperada pode gerar perda de produção. Já em unidades geradoras há o corte do fornecimento de energia para a população, o que leva à perda na qualidade de energia, além, claro, de possíveis multas à concessionária. Em ambos os casos há severas perdas econômicas aos envolvidos. Por essa razão, sistemas de monitoramento de condição de máquina são essenciais para a realização de manutenções preditivas que permitem que haja intervenção na máquina somente quando necessário.

Várias técnicas de detecção de anormalidades em máquinas elétricas são encontradas na literatura, usando diferentes grandezas para o monitoramento das condições internas do equipamento. Por exemplo, em (NADARAJAN, 2015) é abordado um sistema que monitora a vibração da máquina, ao passo que em (YADAIHAH, 2011) é acompanhado o comportamento da corrente de alimentação.

O monitoramento da corrente de armadura já foi amplamente explorado em motores de indução, como se vê em (CUNHA, 2006) e (SPROOTEN, 2007). Contudo, mesmo essas técnicas apresentando bons resultados, o trabalho de (HENAO, 2005) mostra que um sensor de fluxo externo pode obter melhores resultados.

A principal referência deste projeto é o trabalho de (RIGONI, 2014) que expõe métodos de detecção de faltas em geradores síncronos através do campo magnético externo. Esta é uma técnica não invasiva, ou seja, não há necessidade de interferência sobre a máquina, pois monitora-se o espectro em frequência do campo externado pelo gerador. Aliado a esse trabalho, o estudo mostrado por (THOMSON, 1999) exhibe claramente que existem locais na máquina em que o campo magnético externo é mais intenso do que em outros. Este último trabalho reforça a ideia de que diferentes aplicações de sensores no entorno da máquina podem fornecer resultados aprimorados no âmbito da detecção de falta incipientes.

Há diversos tipos de sensores para medição de campo magnético, como por exemplo, podem-se citar: sensores por indução, sensores por efeito Hall, sensores do tipo AMR e bobinas

de Rogowski. Especificamente no âmbito do monitoramento do campo magnético externo de máquinas, os sensores por indução, com núcleo de ar, destacam-se em relação aos outros tipos por não perderem sensibilidade e linearidade, já que não há saturação de seus núcleos.

A investigação de sensores realizada neste trabalho emprega uma bancada de testes que possui um gerador síncrono com sensores de entreferro já posicionados em seu interior, denominados de exploratrizes. Essas exploratrizes são consideradas sensores invasivos, pois há necessidade de intervenção interna na máquina para instalá-los. Este trabalho então propõe realizar um estudo do desempenho entre essas exploratrizes com sensores por indução posicionados ao redor da carcaça para a detecção de faltas incipientes.

Esse estudo de desempenho será feito através do espectro em frequência dos sinais adquiridos por esses sensores, que trata-se de uma técnica bastante estudada por (RIGONI, 2014) e (DOS SANTOS, 2016). Além disso, são realizadas comparações no domínio do tempo através do valor eficaz do campo magnético e do valor de pico por polo da máquina para verificar se indicadores no domínio do tempo podem fornecer informação adicional para a detecção de faltas incipientes.

Este TCC foi motivado e parcialmente custeado pelos projetos regulados pela ANEEL e desenvolvidos no âmbito do Programa de P&D da ENGIE Brasil Energia, PD-0403-0033/2012 e PD-00403-0048/2019, ambos intitulados “Equipamento não Invasivo para Detecção de Falhas em Geradores Síncronos através do Campo Magnético Externo”. As soluções desenvolvidas neste trabalho fazem parte do equipamento em desenvolvimento para aplicação no setor de energia, evidenciando a proximidade da academia com as demandas da indústria e a sua preocupação em contribuir ativamente com a sociedade.

## 1.1 OBJETIVOS

Nas seções abaixo estão descritos o objetivo geral, que expõe o contexto geral do trabalho, e os objetivos específicos, os quais detalham os passos para execução deste TCC.

### 1.1.1 Objetivo Geral

Realizar um estudo do desempenho entre sensores de campo magnético invasivos e não-invasivos na detecção de faltas incipientes em geradores síncronos.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos para este trabalho são:

- Estudar aspectos de geradores síncronos sob o ponto de vista de faltas incipientes;
- Estudar a técnica de medição do campo magnético por sensores por indução;
- Estudar a técnica de medição do campo magnético por sensores no entreferro;
- Confeccionar e calibrar sensores por indução;
- Implementar um sistema para medição de sinais provenientes das exploratrizes no entreferro;
- Compreender a operação da bancada de testes;
- Realizar ensaios de imposição de faltas na bancada de testes;
- Analisar e comparar os resultados obtidos por diferentes sensores.

O trabalho está apresentado em seis capítulos. O capítulo 2 descreve os aspectos de geradores síncronos sob o ponto de vista de faltas incipientes. No capítulo 3 tem-se o estudo dos sensores por indução e dos sensores de entreferro, além de suas confecções e calibrações. As técnicas de análise nos domínios do tempo e da frequência são descritas no capítulo 4. A apresentação da bancada de testes e do sistema de condicionamento é realizada no capítulo 5. O capítulo 6 aborda os ensaios experimentais realizados, bem como os resultados obtidos. Por fim, o capítulo 7 fornece a conclusão do trabalho e possíveis perspectivas para futuros trabalhos.

## 2 DETECÇÃO DE FALTAS INCIPIENTES EM GERADORES SÍNCRONOS

Nesta seção é abordado um resumo sobre a máquina síncrona envolvendo seu princípio de funcionamento, os componentes que a compõem e sua operação em um sistema interligado de grande potência. Além disso, serão abordados alguns métodos de detecção de faltas incipientes presentes na literatura.

### 2.1 A MÁQUINA SÍNCRONA

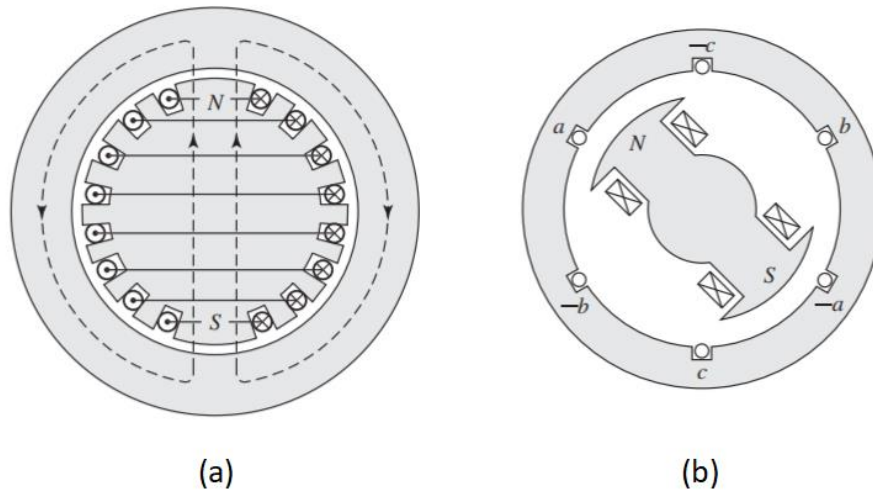
A máquina síncrona, utilizada tanto como gerador quanto como motor, é caracterizada pela presença de um fluxo magnético contínuo produzido no rotor, seja por excitação em corrente contínua ou emprego de ímãs permanentes, e de corrente alternada nos enrolamentos de armadura localizados no estator. Em regime permanente, o rotor gira à mesma velocidade, ou em sincronismo, com o campo magnético girante produzido pelas correntes no estator. (FITZGERALD, 2014).

Os motores e geradores síncronos são, normalmente, constituídos de duas peças principais, o estator e o rotor que são separados por um entreferro com a menor espessura possível. O estator é a parte estática da máquina e aloja em suas ranhuras o enrolamento de armadura, o qual pode ser concentrado ou distribuído. O núcleo do estator é composto de um pacote de lâminas de material ferromagnético para evitar a criação de correntes de Foucault e gerar a maior indução magnética possível no entreferro da máquina. O rotor, o qual pode ser de polos lisos ou salientes, é a parte rotativa da máquina e acomoda o enrolamento de campo. A construção com polos lisos é usada para turbogeradores de dois a quatro polos. Já a construção com polos salientes é melhor adaptada a geradores multipolares hidrelétricos de baixa velocidade (FITZGERALD, 2014).

A Figura 1 (a) mostra o esquema de uma máquina de 2 polos lisos, ao passo que a Figura 1 (b) mostra uma máquina de 2 polos salientes.

É evidente que em máquinas com rotor de polos salientes o entreferro não possui tamanho constante, ao contrário do rotor cilíndrico (polos lisos). Além disso, a operação em altas velocidades de motores e geradores com rotor de polos salientes não é recomendada, visto a presença de problemas mecânicos de fixação desses polos junto ao rotor. No pior dos casos, um dos polos do rotor poderia se desacoplar e colidir com o estator da própria máquina, causando assim grandes avarias, ou até perda total da máquina elétrica rotativa.

Figura 1 – Rotor de (a) 2 polos lisos. (b) 2 polos salientes.



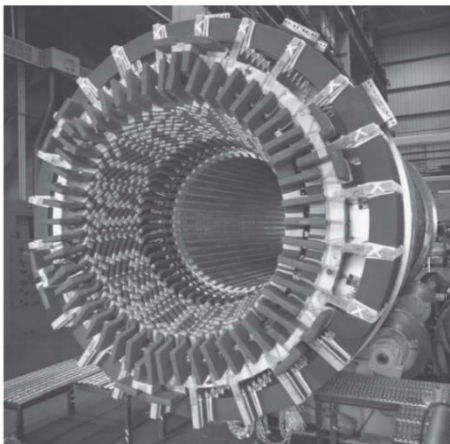
Fonte: (FITZGERALD, 2014).

A frequência mecânica ( $f_{mec}$ ), a frequência elétrica ( $f_{el}$ ) e o número de polos ( $p$ ) de uma máquina síncrona relacionam-se através de (2.1). É possível observar que máquinas com um maior número de polos tem uma frequência mecânica menor, ou seja, possuem uma velocidade de rotação menor. Por essa razão as máquinas de polos salientes possuem, geralmente, um maior número de polos.

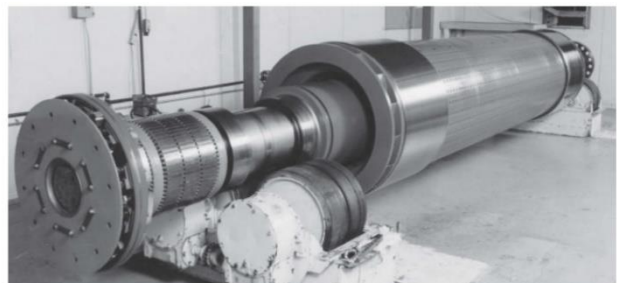
$$f_{mec} = \frac{2}{p} \cdot f_{el} \quad (2.1)$$

Apresenta-se na Figura 2 (a) o estator de um gerador síncrono de 16,5 kV, 275 MVA e 3600 rpm, e na Figura 2 (b) o rotor de um gerador a turbina de 100 MW.

Figura 2 – Máquina síncrona (a) Estator. (b) Rotor.



(a)



(b)

Fonte: (FITZGERALD, 2014).

Na operação como gerador, a máquina atua como uma fonte de tensão cuja frequência é determinada por seu acionador mecânico primário (máquina motriz ou máquina primária). No gerador síncrono, a tensão gerada é proporcional à velocidade do rotor e à corrente de campo. Quando um gerador síncrono é conectado a um sistema interligado de grande porte, contendo muitos outros geradores, a tensão e a frequência em seus terminais de armadura são determinadas de modo substancial pelo sistema. Assim, o fluxo magnético correspondente a essa tensão aplicada gira na velocidade síncrona, determinada pela frequência elétrica  $f_{el}$  do sistema (FITZGERALD, 2014).

A tensão terminal do gerador difere-se da tensão induzida internamente por consequência da resistência e da indutância de dispersão dos enrolamentos do estator. Além disso, há o efeito de reação de armadura que causa uma redução na indução magnética no entreferro da máquina.

O aumento da potência ativa gerada está ligado ao maior fornecimento de conjugado da máquina primária. No caso da operação do gerador conectado a um sistema interligado, no qual a tensão e frequência são fixos, esse aumento de potência se dá na forma de uma defasagem angular entre o campo girante do estator e do rotor. A essa defasagem deu-se o nome de ângulo de carga.

O controle da potência reativa está intimamente ligado ao nível de excitação do enrolamento de campo. Quando a máquina opera sobreexcitada, há o fornecimento de potência reativa, já na condição subexcitada há a absorção de potência reativa.

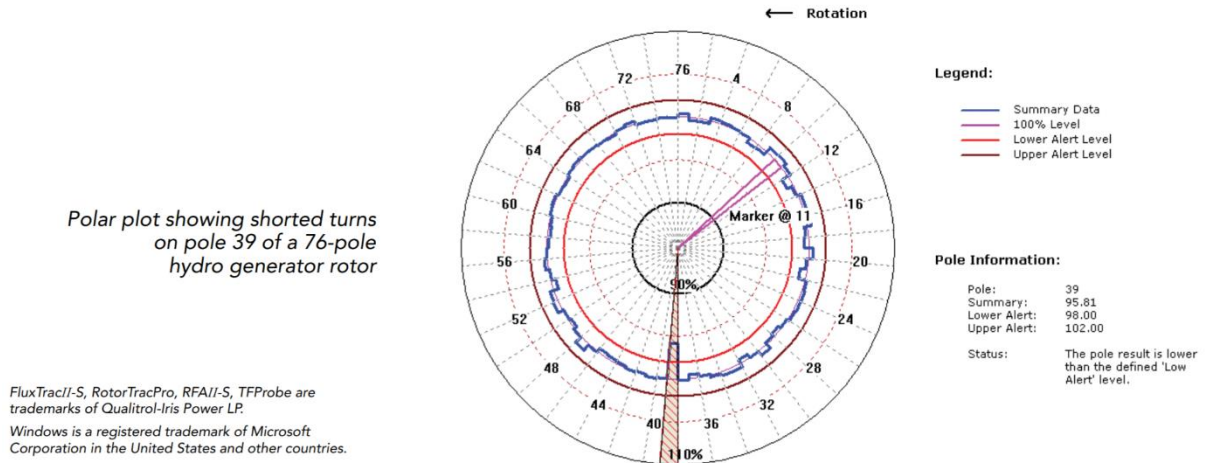
## 2.2 A DETECÇÃO DE FALTAS INCIPIENTES

Sistemas de monitoramento da condição de máquinas elétricas rotativas são altamente desejados. Em específico, no contexto de geradores síncronos presentes no ramo de fornecimento de energia elétrica, a parada não programada devido à problemas internos na máquina pode levar a interrupção no abastecimento, e dessa forma implicar em multas para a empresa fornecedora de energia. Equipamentos que detectam faltas incipientes em estágios iniciais garantem a possibilidade de execução de manutenções preditivas, evitando assim transtornos para a população e multas para a concessionária de energia.

Nesse ramo de monitoramento da condição de máquina, a empresa canadense *Iris Power* se destaca mundialmente por oferecer diversos equipamentos no mercado. Por exemplo, o equipamento *FluxTracII-S<sup>TM</sup>* monitora o fluxo magnético do rotor através de sensores de

entreferro, sendo uma das mais poderosas técnicas para detecção de curto de espiras no rotor (IRIS POWER, 2021). A Figura 3 mostra o fluxo magnético em um rotor de 76 polos, possuindo uma anormalidade no polo de número 39 o qual encontra-se com um fluxo menor. Através do monitoramento do fluxo magnético no entreferro de um motor ou gerador síncrono, o equipamento é capaz de detectar o tipo de falta e o local de ocorrência.

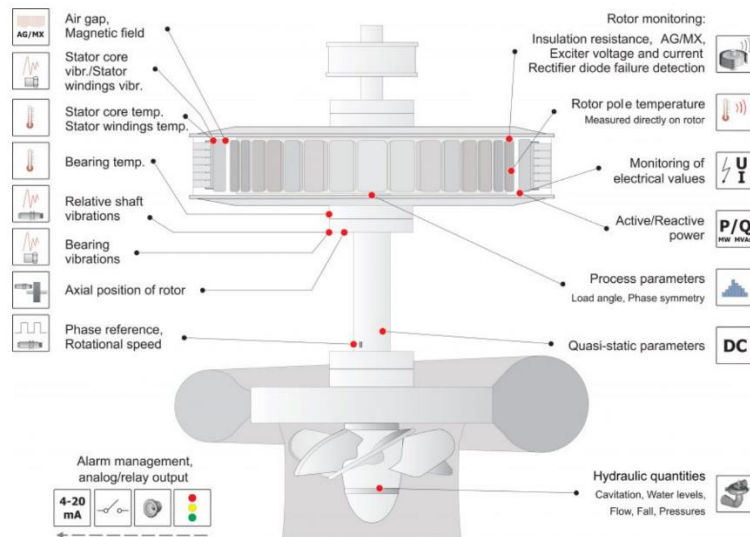
Figura 3 – Fluxo magnético no rotor medido pelo equipamento *FluxTracII-S™*.



Fonte: (IRIS POWER, 2021).

A *Iris Power* possui também equipamentos que realizam o monitoramento de outras grandezas além do fluxo magnético, como a vibração e a temperatura em diferentes pontos do gerador, para detecção de diferentes faltas incipientes. A Figura 4 mostra os locais de instalação de diferentes sensores em um hidrogerador de eixo vertical.

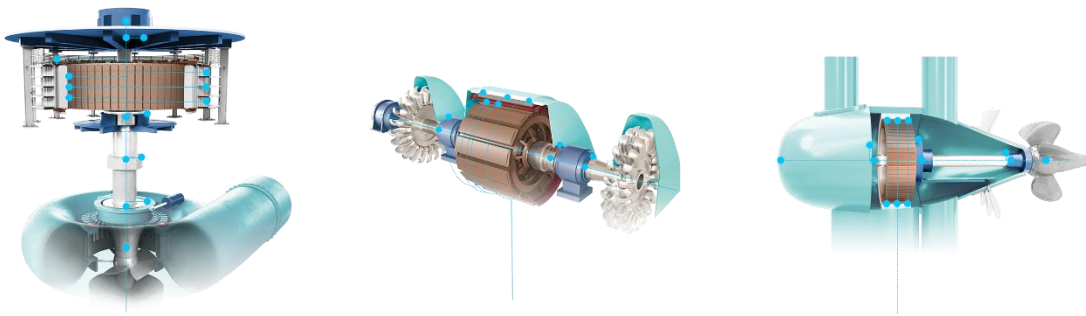
Figura 4 – Locais de instalação de sensores da Iris Power.



Fonte: (IRIS POWER, 2021).

Outra empresa neste ramo é a *VibroSystem* que possui o seu próprio sistema de monitoramento baseado em sensores de entreferro e de vibração. Atualmente, o sistema permite ao usuário receber diagnósticos via celular. Um ponto positivo desse sistema é a concentração de todos os sistemas de aquisição em um único gabinete, monitorando simultaneamente todas as grandezas adquiridas. A Figura 5 fornece os pontos típicos de instalação de sensores do equipamento da *VibroSystem* para máquinas de eixo horizontal e vertical.

Figura 5 – Locais de instalação de sensores da VibroSystem.



Fonte: (VIBROSYSTEM, 2021).

Os sistemas de monitoramento de fluxo no entreferro e de vibração apresentam bons resultados, porém são técnicas invasivas, porque necessitam da instalação de sensores no interior da máquina.

Uma técnica não-invasiva de monitoramento foi desenvolvida no projeto PD-0403-0033/2012, intitulado "Equipamento não Invasivo para Detecção de Falhas em Geradores Síncronos através do Campo Magnético Externo". Esse equipamento realiza o monitoramento do campo magnético externado por geradores síncronos, dispensando assim a necessidade da instalação de sensores no interior da máquina. A detecção de faltas é feita através do monitoramento das componentes harmônicas do campo magnético externado pelo gerador.

Dentro deste contexto, os sensores de campo magnético empregados nesta nova abordagem são analisados no capítulo seguinte.

### 3 SENSORES À MEDIÇÃO DE CAMPO MAGNÉTICO

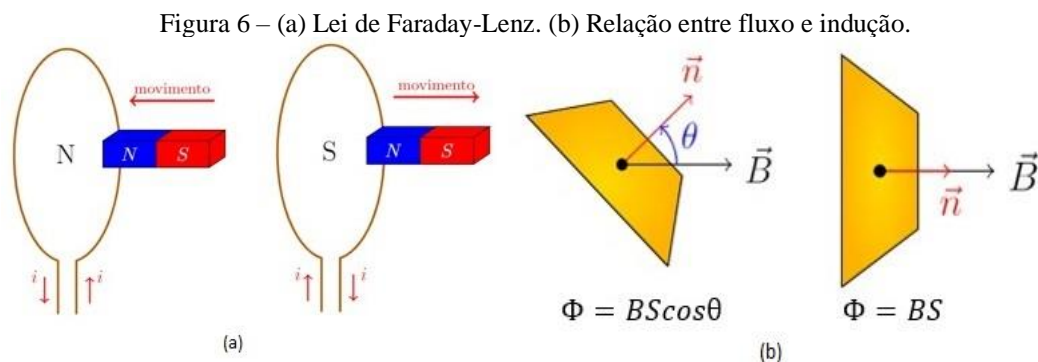
Neste capítulo são apresentados os tipos de sensores utilizados neste trabalho, enfocando o princípio de funcionamento e a obtenção das grandezas desejadas a partir das medições de seus sinais. Além disso, é abordado como foi realizada a fabricação e a calibração dos sensores.

#### 3.1 SENSOR DE CAMPO MAGNÉTICO POR INDUÇÃO

O princípio de funcionamento do sensor de campo magnético por indução sustenta-se na Lei de Faraday-Lenz, segundo a qual uma variação temporal de fluxo magnético em um circuito fechado produzirá uma corrente elétrica de sentido tal a criar um campo magnético que se oponha a variação de fluxo. Caso não haja um caminho fechado para circulação de corrente, é observada uma força eletromotriz induzida nos terminais do circuito. O exposto é dado de forma quantitativa por (3.1), sendo  $v(t)$  a força eletromotriz e  $\Phi(t)$  o fluxo magnético.

$$v(t) = - \frac{d\Phi(t)}{dt} \quad (3.1)$$

O exposto acima é ilustrado pela Figura 6 (a), já a Figura 6 (b) mostra a relação entre o fluxo magnético e a indução magnética  $\vec{B}(t)$  em uma superfície.



Fonte: Autor.

Um sensor de campo magnético por indução nada mais é do que  $N$  espiras de seção  $S$  conectadas em série, com um núcleo para fornecer estabilidade mecânica. Neste trabalho o núcleo dos sensores é composto de material não ferromagnético, para que assim não haja perda de sensibilidade e linearidade devido à saturação. Em contrapartida, o uso deste tipo de núcleo

faz com que a amplitude dos sinais nos terminais do transdutor seja baixa, porém este problema pode ser contornado com o uso de circuitos de condicionamento de sinais.

É possível escrever (3.1) em função do campo magnético  $\mathbf{H}(t)$  utilizando a relação constitutiva  $\mathbf{B}(t) = \mu\mathbf{H}(t)$ , sendo  $\mu$  a permeabilidade magnética do material. Considera-se também que o campo magnético que atravessa as espiras do sensor é homogêneo, ou seja, o dispositivo fonte do campo magnético é suficientemente grande de forma que o sensor possa ser considerado pontual frente a ele. Dessa forma, (3.2) fornece uma relação entre a tensão induzida nos terminais do sensor com a derivada temporal do campo magnético que se deseja medir.

$$v(t) = -NS\mu \frac{d\mathbf{H}(t)}{dt} \quad (3.2)$$

De (3.2) observa-se que é possível aumentar a sensibilidade deste tipo de sensor aumentando o número de espiras, contudo esta abordagem leva a um aumento dos parâmetros parasitas do sensor, como resistência e indutância. Na aplicação desses sensores com filtros analógicos, os seus parâmetros parasitas tornam-se fatores limitantes quando se deseja realizar a medição de sinais de alta frequência. Outra opção seria aumentar a área, todavia a elevação exacerbada deste parâmetro pode fazer com que o sensor não seja mais pontual em relação à fonte do campo magnético. Nota-se também que este transdutor naturalmente amplifica componentes de alta frequência, já que depende da derivada temporal do campo magnético.

### 3.2 CONFECÇÃO E CALIBRAÇÃO DOS SENSORES POR INDUÇÃO

Um estudo sobre os aspectos construtivos dos sensores de campo magnético por indução foi realizado para avaliar o impacto da geometria na tensão induzida e nos parâmetros parasitas do sensor. Produziram-se sensores variando parâmetros construtivos de formato, área, número de espiras, número de camadas e altura do sensor, buscando manter constante o valor da tensão induzida para um mesmo valor de campo magnético. O estudo realizado é detalhado a seguir.

#### 3.2.1 Confecção de Amostras

Foram produzidos seis sensores com seção quadrada e circular com diferentes áreas e número de espiras. A fim de manter a mesma tensão de saída, o produto  $NS$  dos sensores é

nominalmente constante. Esta tensão pode ser afetada pelos parâmetros parasitas e fatores construtivos que alteram a homogeneidade do comportamento eletromagnético. A altura dos sensores foi definida de forma a manter quatro camadas de fio. A Tabela I apresenta os valores de parâmetros construtivos dos sensores por indução utilizados nesta investigação experimental, tomando como referência um sensor utilizado em trabalhos anteriores. Os sensores do Tipo I têm aproximadamente o dobro da área do sensor de referência, enquanto para os do Tipo II a relação é de aproximadamente quatro vezes. Para os três tipos, há sensores de seção quadrada e circular.

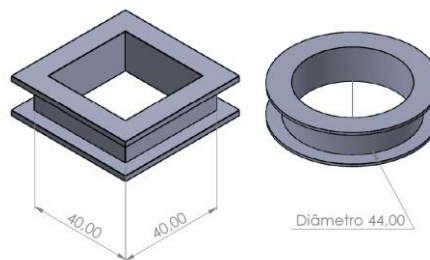
Tabela I – Parâmetros construtivos dos sensores.

Sensor	Área (cm <sup>2</sup> )	Número de Espiras	Altura (cm)
Referência	7,66	500	2,26
Tipo I	15,90	241	1,09
Tipo II	29,46	130	0,59

Fonte: Autor.

Os carretéis utilizados nesse estudo foram fabricados utilizando o software *SolidWorks*, uma impressora 3D *MakerBot Replicator® 2X*, e uma bobinadeira linear *RUFF LW 16*, buscando-se obter uma maior uniformidade. A Figura 7 mostra os modelos 3D dos Tipo I quadrado e circular e a Figura 8 após a confecção.

Figura 7 – Modelos 3D de sensores Tipo I com formatos quadrado e circular.



Fonte: Autor.

Figura 8 – Sensores Tipo I confeccionados com formatos quadrado e circular.



Fonte: Autor.

### 3.2.2 Estimativa dos Parâmetros Elétricos

O valor dos parâmetros parasitas, cuja importância foi indicada na seção 3.1, foram inicialmente estimados de forma analítica.

As resistências dos sensores de seção circular e quadrada (vide Figura 7 e Figura 8) podem ser estimadas por (3.3) e (3.4), respectivamente, em que  $a$  é o lado médio,  $R$  o raio médio e  $R_{fio}$  a resistência por metro do fio utilizado. Os subscritos SC e SQ referem-se respectivamente a seção circular e seção quadrada. Neste estudo, foi utilizado o fio AWG33 com resistência de  $0,6693 \Omega/m$ .

$$R_{SC} \cong 2\pi R N R_{fio} \quad (3.3)$$

$$R_{SQ} \cong 4a N R_{fio} \quad (3.4)$$

O cálculo analítico da indutância própria para os sensores deste estudo é difícil, pois há sobreposição de espiras, imperfeição na bobinagem e, naturalmente, a não homogeneidade do campo magnético em todo o sensor. Segundo (BASTOS, 2008), o campo magnético no centro de um solenoide pode ser calculado por (3.5), em que  $h$  é a altura da bobina. Utilizando-se a mesma metodologia, obtém-se (3.6) que fornece o campo magnético no centro de um prisma quadrangular.

$$H_{SC} = \frac{NI}{\sqrt{4R^2 + h^2}} \quad (3.5)$$

$$H_{SQ} = \frac{NIa^2}{2\pi h} \int_{-0,5h}^{0,5h} \frac{dx}{(0,25a^2 + x^2)\sqrt{0,5a^2 + x^2}} \quad (3.6)$$

Desconsiderando a sobreposição de espiras e a não homogeneidade das linhas de campo, (3.7) e (3.8) fornecem uma estimativa da indutância própria para estes dois formatos de sensores, circular e quadrado respectivamente.

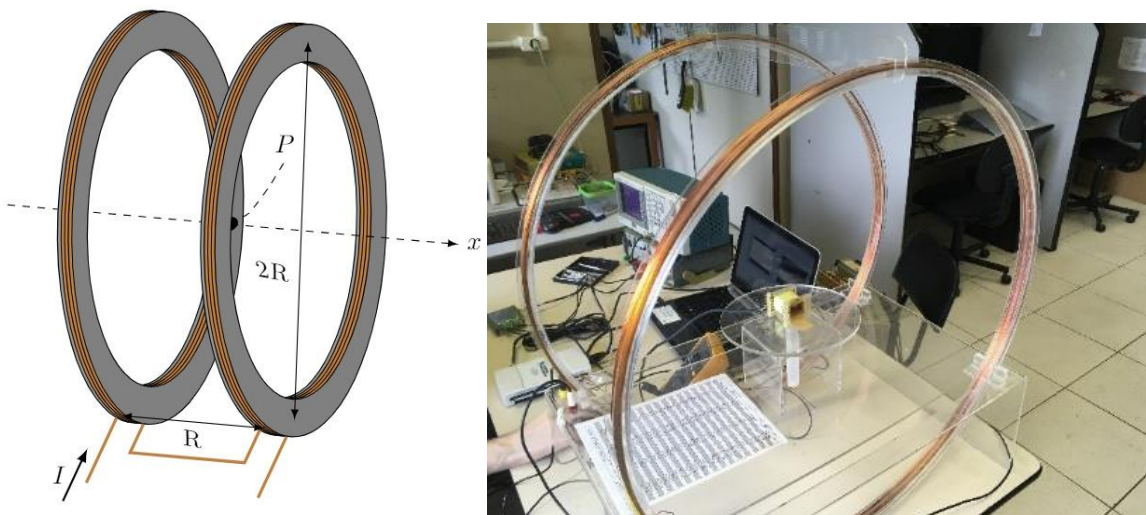
$$L_{SC} \cong \mu_0 \frac{N^2 \pi R^2}{\sqrt{4R^2 + h^2}} \quad (3.7)$$

$$L_{SQ} \cong \mu_0 \frac{N^2 a^4}{2\pi h} \int_{-0,5h}^{0,5h} \frac{dx}{(0,25a^2 + x^2)\sqrt{0,5a^2 + x^2}} \quad (3.8)$$

### 3.2.3 Aparato para Realização de Ensaio em Sensores Por Indução

A calibração desse tipo de sensor não é uma tarefa trivial, visto que é necessário a aplicação de um campo magnético uniforme e de módulo conhecido no seu interior. Para realizar essa tarefa é utilizado um dispositivo conhecido como Bobina de Helmholtz, a qual consiste de duas bobinas de raio  $R$  ligadas em série, separadas de uma distância  $R$  e alimentadas por uma corrente  $I$ . É possível mostrar que nas redondezas do ponto médio entre o centro das duas bobinas há a criação de um campo magnético uniforme e de módulo conhecido, o qual é função dos aspectos construtivos das bobinas e da corrente aplicada (ROBERT, 2003). A Figura 9 mostra um esquema do dispositivo, bem como um disponível no Laboratório de Acionamentos Elétricos Especiais (LAESP) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC).

Figura 9 – Bobina de Helmholtz, esquema e dispositivo real.



Fonte: Autor.

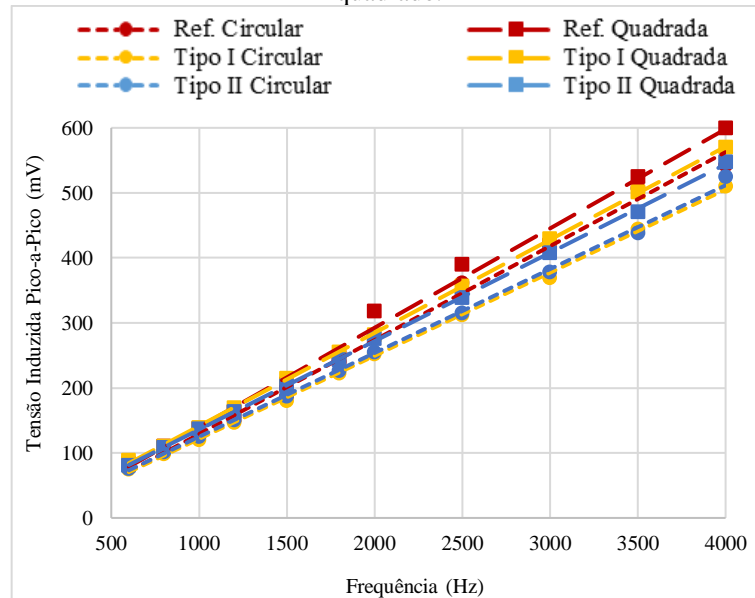
Os sensores por indução foram então submetidos a ensaios de medição de tensão induzida sob campos produzidos pela bobina de Helmholtz com amplitude constante e frequência variável. O campo magnético foi mantido senoidal e com amplitude fixa.

### 3.2.4 Ensaio de Comparação de Formatos

A Figura 10, construída com o *Microsoft Excel*, mostra o valor da tensão induzida em cada um dos sensores em função da frequência, comparando os três tipos com formatos circular e quadrado. Idealmente, para uma mesma frequência e mesmo campo magnético, a tensão

deveria ter a mesma amplitude em todos os sensores, pois todos possuem o mesmo produto número de espiras e área da seção transversal.

Figura 10 – Tensão induzida em função da frequência nos três tipos de sensores com formato circular e quadrado.



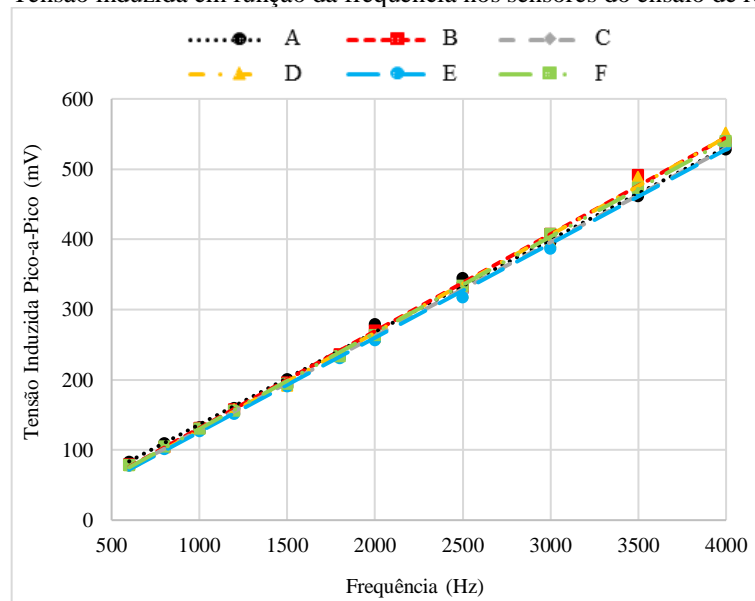
Fonte: Autor.

Comparando os resultados entre sensores de mesmo tipo, para os três tipos, os valores de tensão induzida dos sensores de seção quadrada são maiores do que os valores das seções circulares. A diferença é mais acentuada entre sensores do Tipo I. Visualmente, observam-se também não linearidades no sensor quadrado do tipo referência pelos valores medidos.

### 3.2.5 Ensaios de Repetibilidade

Para certificar que as diferenças entre as tensões induzidas da Figura 10, para um mesmo tipo de sensor, devem-se ao formato e não a fatores aleatórios, e também para avaliar a repetibilidade do processo de confecção empregado, foram confeccionados seis carretéis circulares de mesma seção e altura, bobinados com mesmo número de espiras e número de camadas. Manteve-se a mesma seção e número de espiras do sensor de referência, porém com metade da altura, dobrando assim o número de camadas. A Figura 11, também construída com o *Microsoft Excel* e na mesma escala que a Figura 10, apresenta os resultados do ensaio de tensão induzida com estes sensores, doravante denominados tipo Rep. (A, B, C, D, E e F).

Figura 11 – Tensão induzida em função da frequência nos sensores do ensaio de repetibilidade.



Fonte: Autor.

De maneira visual, observa-se a existência de pouca diferença entre as linhas de tendência dos seis sensores. Para validar quantitativamente os resultados da seção 3.2.4, calculou-se, a partir das curvas de tendência das Figura 10 e Figura 11, para cada frequência de ensaio, o desvio padrão amostral  $S_n$  entre os valores de tensão induzida, dado por (3.9), onde  $n$  é o número de amostras (sensores) e  $X$  é a variável aleatória (tensão induzida). O desvio padrão fornece uma determinação numérica de dispersão dos valores com relação à média deles em sua própria unidade. Então, para se ter uma relação percentual e comparar desvios em diferentes ordens de amplitude, divide-se  $S_n$  pela média, conforme (3.10), onde  $M$  corresponde ao valor percentual do desvio padrão amostral com relação à média.

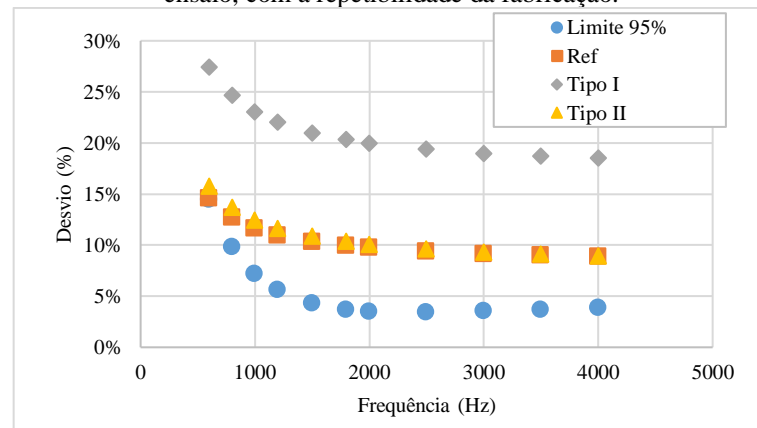
$$S_n = \sqrt{\left(\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X}_n)^2\right)} \quad (3.9)$$

$$M = S_n / \bar{X}_n \quad (3.10)$$

Os valores de  $M$  dos sensores “Rep.” para cada frequência foram multiplicados pelo valor  $t$  de *Student* para abrangência de 95 % com cinco graus de liberdade, igual a 2,571. Resumidamente, o valor resultante estima o limite dentro do qual são abrangidos 95 % das ocorrências aleatórias. A Figura 12 mostra a comparação deste limite com as diferenças

percentuais entre a tensão induzida nos sensores quadrados e circulares de cada tipo, tomando os sensores circulares como referência.

Figura 12 – Comparação entre os desvios das linhas de tendência de tensão induzida, em cada frequência de ensaio, com a repetibilidade da fabricação.



Fonte: Autor.

A Figura 12 indica que o limite estimado de repetibilidade dos sensores estabiliza em 4 % a partir de 2 kHz. Os valores mais elevados em frequências mais baixas podem ser devidos à maior imprecisão na medição da tensão induzida nesta faixa. Observa-se que as diferenças na tensão induzida de um sensor quadrado para o circular de mesmo tipo são ao menos duas vezes o limite estimado de repetibilidade. Os resultados obtidos indicam que a diferença entre as curvas de tendência do ensaio de comparação de formatos é também devido ao formato e não apenas à repetibilidade e a outros fatores aleatórios.

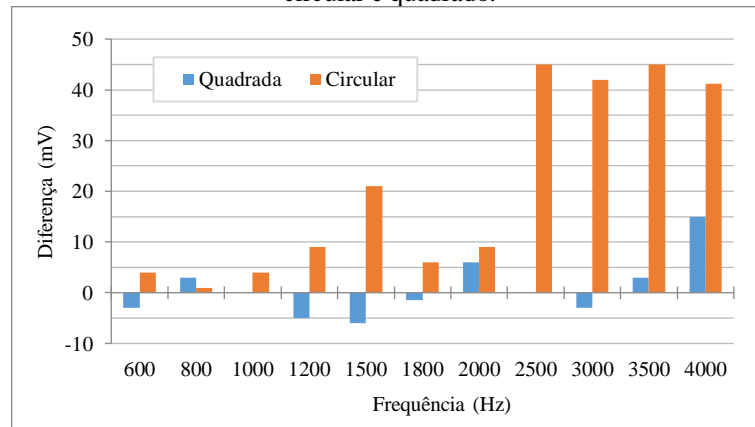
### 3.2.6 Ensaio de Sobreposição de Espiras

Para verificar o impacto da sobreposição de camadas de espiras na tensão induzida, foram produzidos mais dois sensores, um quadrado com mesma área e número de espiras do Tipo I, porém com seis vezes sua altura, e um circular com mesma área e número de espiras do Tipo II, todavia com altura aproximadamente quatro vezes maior. A altura foi definida de forma a não haver sobreposição de camadas de espiras. A Figura 13 mostra a diferença verificada nos valores de tensão induzida nos novos sensores, para comparar os resultados da sobreposição de quatro camadas de espiras com os resultados da inexistência de sobreposição.

Os sensores de seção quadrada apresentam diferenças relativamente pequenas na tensão induzida, aparentemente aleatórias, com máximo de 15 mV, indicando o aparente baixo impacto causado pela sobreposição de camadas de espiras. Já para os sensores circulares, o sensor sem sobreposição chega a apresentar tensão induzida 45 mV maior do que seu par com

sobreposição, e a diferença observada é consistentemente positiva. Para os sensores de seção circular estudados aqui, portanto, a sobreposição gera uma redução na tensão induzida.

Figura 13 – Diferença entre tensão induzida em sensores sem e com sobreposição de espiras, para formato circular e quadrado.



Fonte: Autor.

### 3.2.7 Medição da Indutância e Resistência

Utilizando uma ponte LCR da *BK Precision 889B*, mediu-se, na frequência de 1 kHz, a indutância e a resistência de todos os sensores construídos. A Tabela II apresenta valores calculados por (3.3), (3.4), (3.7) e (3.8), medidos e os desvios relativos ao valor teórico, de resistência e indutância.

Tabela II – Resistências e indutâncias calculadas e medidas. As siglas C e Q se referem a seção circular e quadrada, respectivamente. Sobrep se refere aos sensores sem camadas sobrepostas do ensaio de sobreposição.

Sensor	Resistência ( $\Omega$ )			Indutância (mH)		
	Calculado	Medido	Desvio (%)	Calculado	Medido	Desvio (%)
Ref. C	32,83	38,38	16,91	6,241	6,490	3,99
Ref. Q	36,08	37,42	3,71	6,286	6,990	11,12
Tipo I Q	25,27	25,96	2,73	2,542	4,190	64,83
Tipo II Q	18,61	19,20	3,17	1,033	2,160	109,1
Tipo I C	22,80	23,00	0,88	2,507	3,770	50,38
Tipo II C	16,74	17,34	3,58	1,017	2,020	98,62
Sobrep. C	16,40	17,39	6,04	0,937	1,320	40,88
Sobrep. Q	24,97	25,65	2,72	1,464	1,762	20,36
A	34,12	39,64	16,18	7,561	8,925	18,04
B	34,12	34,14	0,06	7,561	8,868	17,29
C	34,12	34,38	0,76	7,561	8,814	16,57
D	34,12	33,86	0,76	7,561	8,809	16,51
E	34,12	33,62	1,47	7,561	8,823	16,69
F	34,12	33,51	1,79	7,561	8,602	13,77

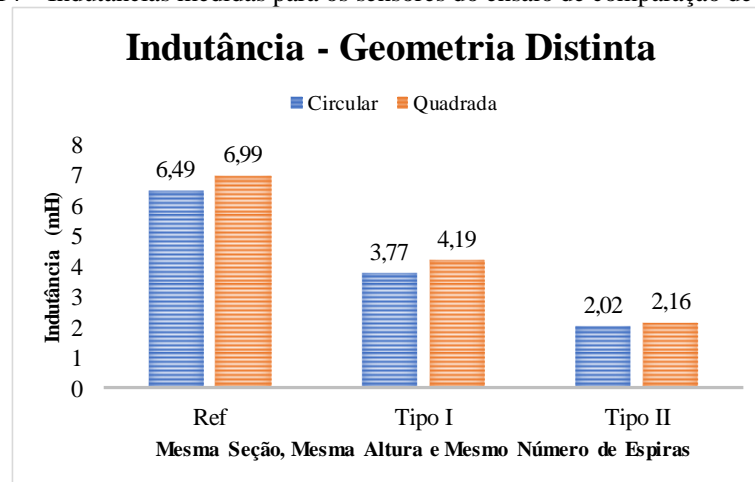
Fonte: Autor.

Os valores de resistência obtidos foram próximos dos teóricos para todos os sensores, com exceção dos sensores “Ref. C” e “A”, por um provável mal posicionamento dos sensores

na bobinadeira. Este desvio não se refletiu em diferença significativa na tensão induzida dos sensores (3.2.5).

No quesito indutância, percebe-se que o desvio aumenta à medida que a altura do sensor é menor, visto que as considerações de um campo magnético uniforme em seu interior tornam-se cada vez menos realísticas com o menor comprimento da bobina. Com os valores das indutâncias medidos para os sensores do ensaio de comparação de formatos, construiu-se o gráfico de barras da Figura 14, o qual indica que a indutância dos sensores de seção quadrada é maior do que os de seção circular, mesmo com todos os outros parâmetros mantidos idealmente constantes.

Figura 14 – Indutâncias medidas para os sensores do ensaio de comparação de formatos.



Fonte: Autor.

A sobreposição de camadas de espiras impacta de forma significativa a indutância dos sensores. A ausência de sobreposição produziu uma redução de 4,190 mH para 1,762 mH no sensor de seção quadrada e de 2,020 mH para 1,320 mH no de formato circular.

### 3.2.8 Conclusão do Estudo de Aspectos Construtivos de Sensores por Indução

Os resultados obtidos neste trabalho experimental investigativo apontam que sensores de formato quadrado possuem valores de tensão induzida e indutância maiores do que os de formato circular, mesmo mantido nominalmente constante o produto  $NS$ , a altura e o número de camadas de espiras. O estudo da influência do formato do sensor foi validado através do estudo de repetibilidade, que mostrou homogeneidade adequada no processo de confecção dos sensores.

O ensaio com os seis sensores semelhantes verificou que o grau de repetibilidade do processo de construção e bobinagem dos sensores, gera uma variação esperada de apenas 5,5 % na sensibilidade do sensor. Resultados semelhantes são observados nos valores de indutância.

Foi observado que a sobreposição de camadas de espiras impacta de maneira significativa a tensão induzida dos sensores de seção circular, o que não ocorre para os sensores de formato quadrado. Em ambos os formatos se notou grande modificação dos valores de indutância própria, que são menores quando não há sobreposição de espiras.

Neste estudo utilizou-se o sensor circular “Ref.” e mais dois outros sensores circulares, os quais possuem um quarto da altura, metade da área e mesmo número de espiras que o sensor “Ref.”, sendo, então, mais pontuais.

Este trabalho também contribuiu para a publicação de um artigo no MOMAG 2020, intitulado de “Estudo de Aspectos Construtivos de Sensores de Campo Magnético por Indução”.

### 3.3 EXPLORATRIZES

As máquinas síncronas da bancada de ensaios utilizada neste trabalho, descrita em detalhes na seção 5.1, contêm em seu interior bobinas exploratrizes para a medição do fluxo magnético em determinados pontos da máquina. Estas exploratrizes são muito semelhantes aos sensores instalados no entreferro em sistemas de monitoramento como os descritos na seção 2.2.

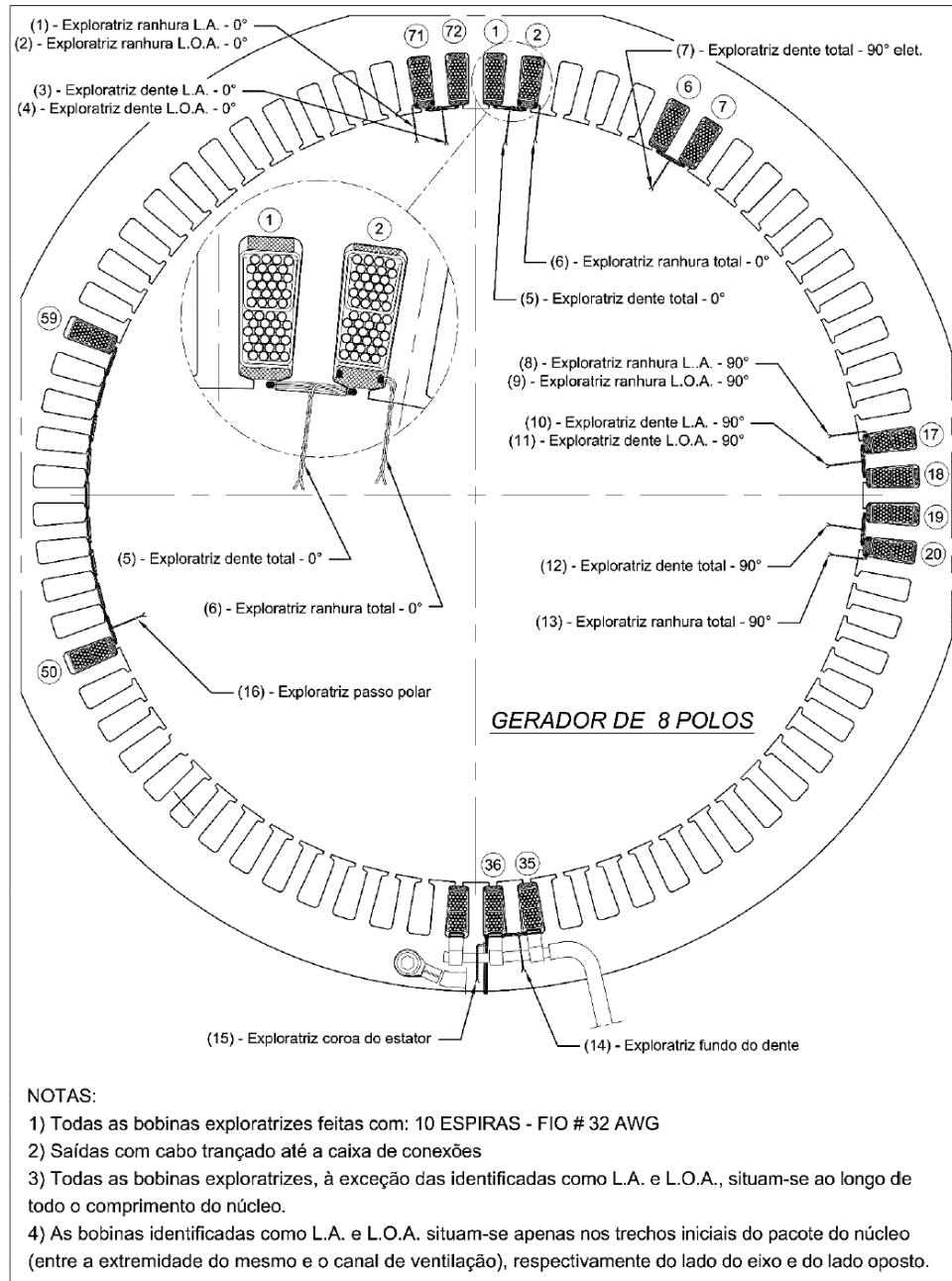
A relação entre a tensão nos terminais das exploratrizes e do campo magnético medido é a mesma do sensor por indução abordado anteriormente (3.2). Todavia, neste caso o núcleo é feito de material ferromagnético. Então espera-se que as exploratrizes forneçam uma tensão induzida de magnitude superior se comparadas aos sensores com núcleo de ar. Além disso, vale ressaltar que as exploratrizes estão posicionadas no interior do gerador e os sensores por indução na carcaça da máquina, esse é outro motivo que se espera maior tensão induzida nas exploratrizes.

A máquina utilizada nos experimentos deste trabalho possui um total de 16 exploratrizes, as quais são mostradas na Figura 15. É possível notar a presença de exploratrizes com diferentes propósitos de medição, por exemplo, tem-se a medição do campo magnético nas ranhuras, nos dentes, em um polo, no fundo do dente e na coroa do estator.

Como explicitado na Figura 15, todas as exploratrizes, salvo as identificadas como L.A e L.O.A, situam-se ao longo de todo o comprimento do núcleo do estator. Identifica-se

também que esses sensores são compostos de apenas 10 espiras, contudo por possuírem um grande comprimento, sua seção é consideravelmente maior do que os sensores alocados externamente.

Figura 15 – Exploratrizes gerador de 8 polos.

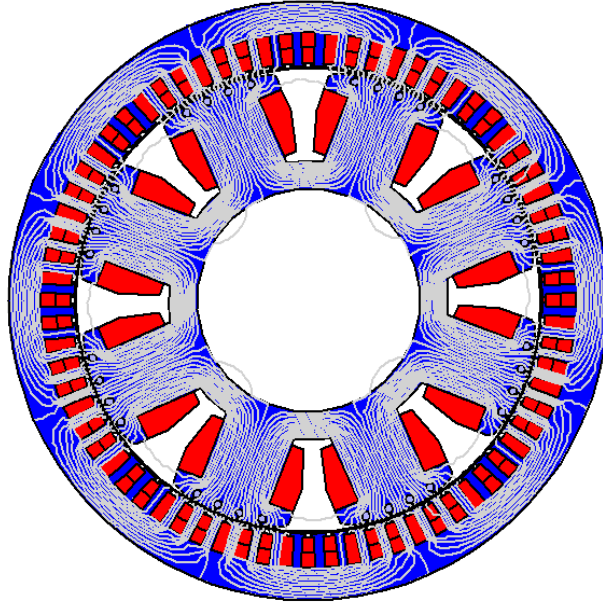


Fonte: (EQUACIONAL, 2014).

O Grupo de Concepção e Análise de Dispositivos Eletromagnéticos (GRUCAD) realizou um cálculo em elementos finitos para determinar a forma que as linhas de campo magnético se distribuem no interior da máquina na condição de tensão nominal (380 V),

frequência de 50 Hz e carregamento nulo, ou seja, máquina à vazio. O resultado é mostrado na Figura 16.

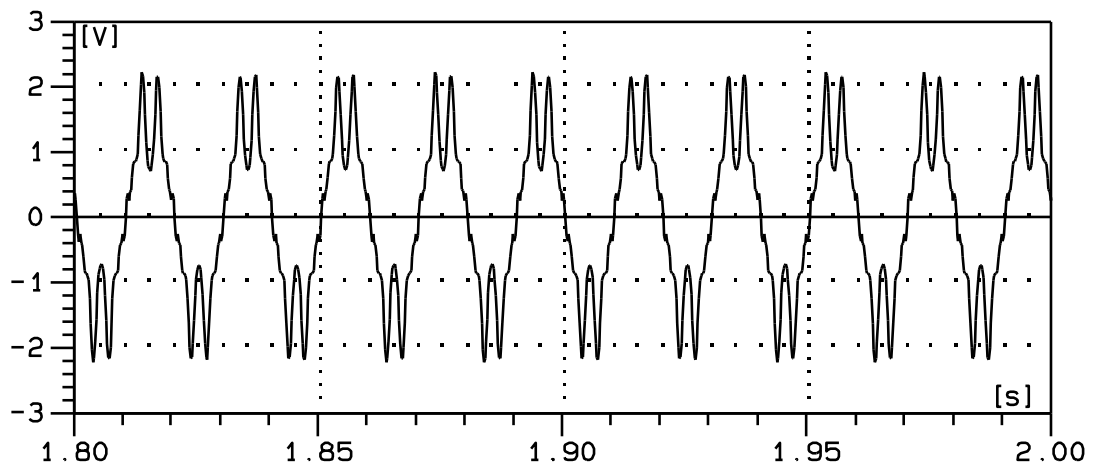
Figura 16 – Simulação em elementos finitos do gerador de 8 polos.



Fonte: (DOS SANTOS, 2017).

Com essa simulação é possível também calcular numericamente a forma esperada dos sinais de tensão nos terminais das exploratrizes de dente e de ranhura. Esse resultado é mostrado na Figura 17.

Figura 17 – Forma de onda esperada dos sinais nas exploratrizes.



Fonte: GRUCAD, 2015.

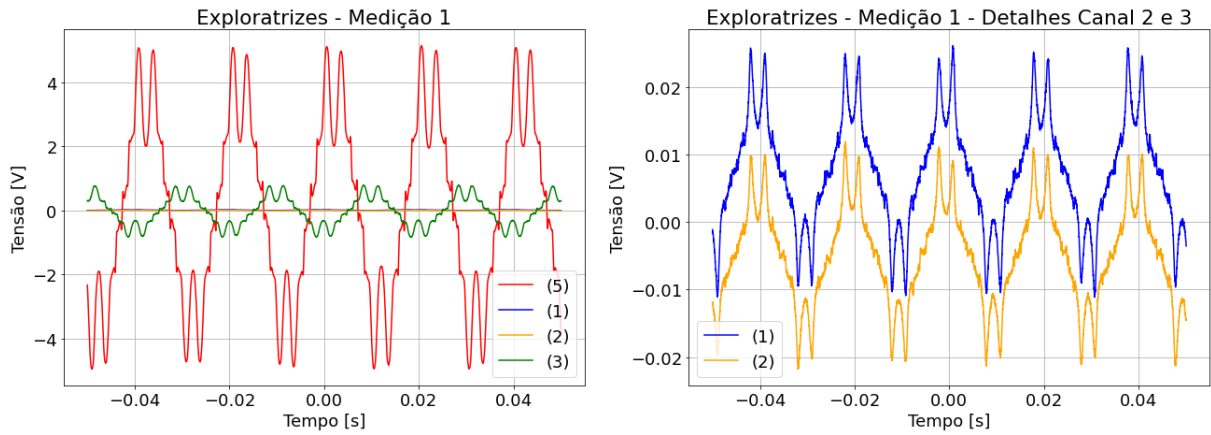
Como esperado, os valores de tensão induzida são consideravelmente elevados se comparados aos sensores com núcleo de ar, os quais estão na faixa das dezenas de milivolts.

### 3.4 CONFECÇÃO E CALIBRAÇÃO DAS EXPLORATRIZES

Os aspectos construtivos conhecidos das exploratrizes foram expostos anteriormente na Figura 15. Em relação à calibração, utilizou-se um osciloscópio de 4 canais para medir a tensão nos terminais das exploratrizes quando o gerador de 8 polos estava operando a 380V, frequência de 50Hz e à vazio. Tomou-se a exploratriz (5), vide Figura 15, como referência para todas as aquisições. As Figuras 18, 19, 20, 21 e 22 fornecem os resultados obtidos com o osciloscópio. Por conveniência, a numeração das exploratrizes é repetida abaixo:

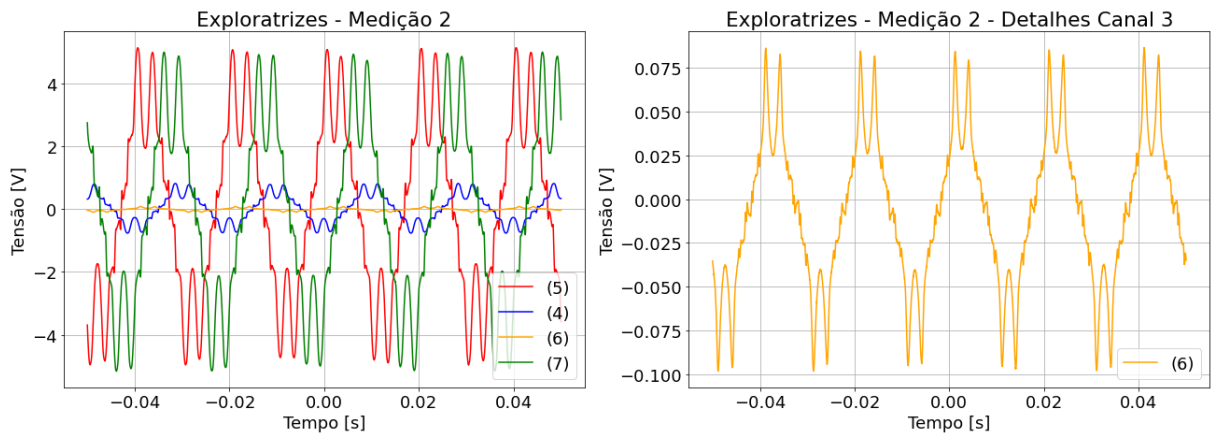
- (1) Exploratriz de ranhura L.A.  $0^\circ$
- (2) Exploratriz de ranhura L.O.A.  $0^\circ$
- (3) Exploratriz dente L.A.  $0^\circ$
- (4) Exploratriz dente L.O.A.  $0^\circ$
- (5) Exploratriz dente total  $0^\circ$
- (6) Exploratriz ranhura total  $0^\circ$
- (7) Exploratriz dente total  $90^\circ$  elétricos
- (8) Exploratriz ranhura L.A.  $90^\circ$
- (9) Exploratriz ranhura L.O.A.  $90^\circ$
- (10) Exploratriz dente L.A.  $90^\circ$
- (11) Exploratriz dente L.O.A.  $90^\circ$
- (12) Exploratriz dente total  $90^\circ$
- (13) Exploratriz ranhura total  $90^\circ$
- (14) Exploratriz fundo do dente
- (15) Exploratriz coroa do estator
- (16) Exploratriz passo polar

Figura 18 – Aquisição 1, exploratrizes (1), (2), (3) e (5).



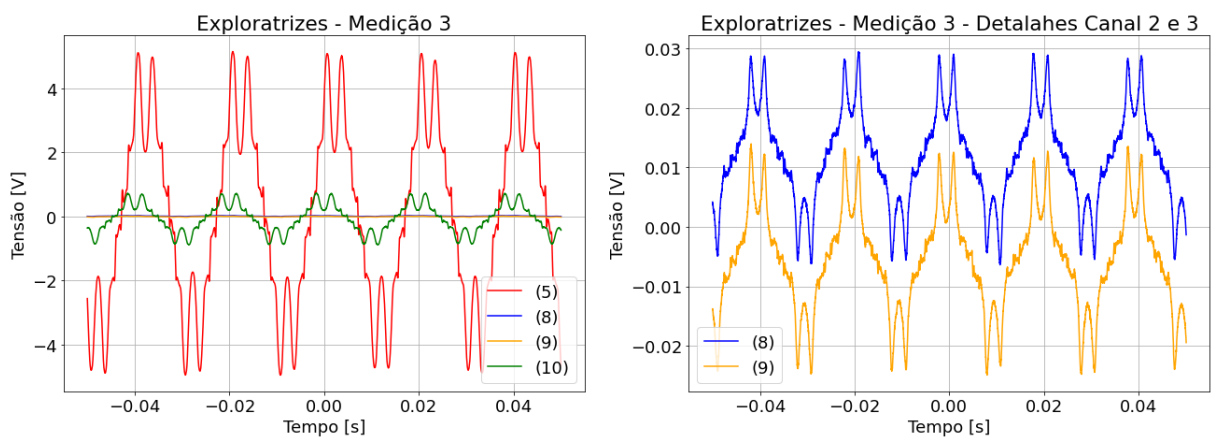
Fonte: Autor.

Figura 19 – Aquisição 2, exploratrizes (4), (5), (6) e (7).



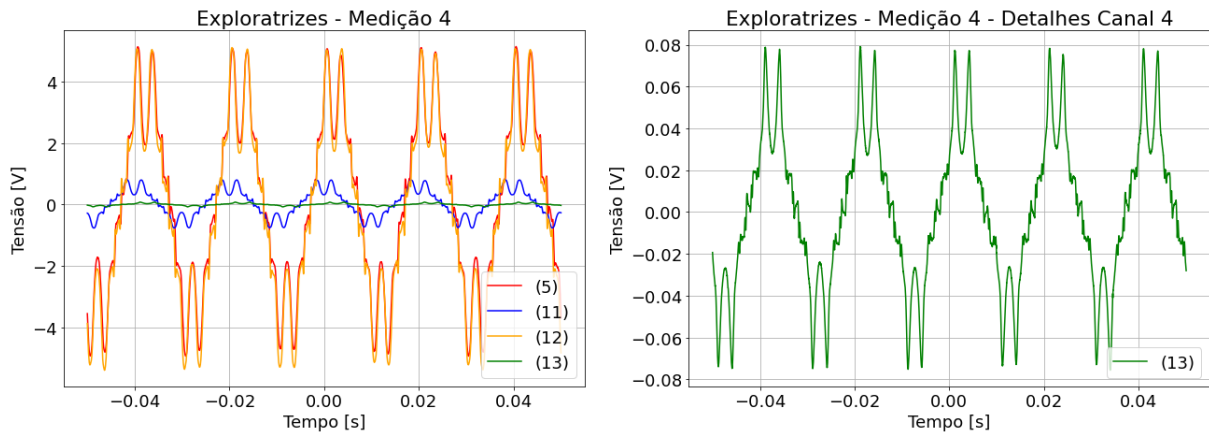
Fonte: Autor.

Figura 20 – Aquisição 3, exploratrizes (5), (8), (9) e (10).



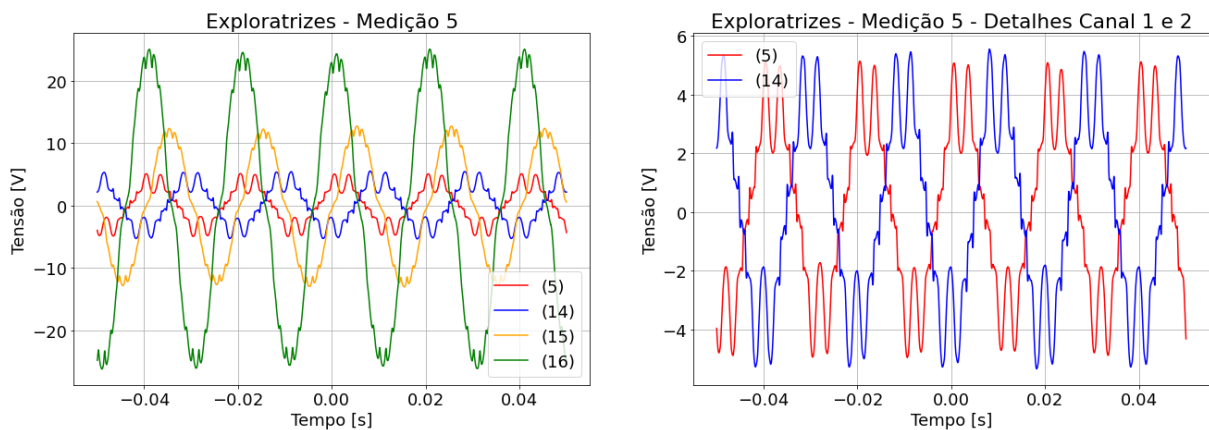
Fonte: Autor.

Figura 21 – Aquisição 4, exploratrizes (5), (11), (12) e (13).



Fonte: Autor.

Figura 22 – Aquisição 5, exploratrizes (5), (14), (15) e (16).



Fonte: Autor.

Em primeira instância, é muito interessante notar que os resultados obtidos condizem muito bem com o resultado de simulação via elementos finitos apresentado na Figura 17, já que o formato adquirido é o mesmo.

Da primeira aquisição, em relação ao valor das amplitudes, (1) e (2) possuem valor relativamente baixo por englobarem apenas uma parcela de uma ranhura, (3) possui uma magnitude um pouco maior por envolver um pedaço do dente, e por fim (5) tem a maior amplitude por compor um dente inteiro. Os resultados da terceira aquisição são similares.

Da segunda aquisição observa-se que (5) e (7) estão defasados de aproximadamente  $90^\circ$  graus, resultado esperado pois ambos os sinais são de dente total, porém (5) em  $0^\circ$  e (7) em  $90^\circ$  elétricos.

Da quarta aquisição é interessante notar que (5) e (12) são quase iguais, sendo ambos sinais de dente total, com (5) em  $0^\circ$  e (12) em  $90^\circ$  mecânicos, todavia como o gerador tem 8

polos um ciclo mecânico é equivalente à quatro ciclos elétricos, ou seja, em  $90^\circ$  mecânicos têm-se o  $0^\circ$  do segundo ciclo elétrico.

Da quinta aquisição têm-se o sinal da exploratriz (16) que é o maior de todos, visto que o mesmo é composto de vários dentes. É interessante notar também que (5) e (14) tem amplitudes similares, porém uma defasagem de pouco mais de  $90^\circ$ .

## 4 TÉCNICAS DE ANÁLISE

Neste tópico são abordadas algumas técnicas de análise, as quais se utilizam de indicadores no domínio do tempo e no domínio da frequência, para detecção de faltas incipientes em geradores síncronos.

### 4.1 INDICADORES NO DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA

Na área de monitoramento de campo magnético externo, a análise do espectro em frequência dos sinais adquiridos pelos sensores de campo foi bastante explorada nos trabalhos de (DOS SANTOS, 2016) e (RIGONI, 2014). Normalmente realiza-se a Transformada Rápida de Fourier (FFT, do inglês *Fast Fourier Transformation*) diretamente no sinal adquirido pelos transdutores, já que por (3.2) o sensor é um amplificador natural de componentes de alta frequência. Essa característica torna a integração do sinal uma desvantagem, pois a grande maioria das componentes que se deseja analisar estão acima da frequência fundamental elétrica, a qual naturalmente apresenta maior amplitude e, normalmente, não carrega informação relevante para detecção de faltas incipientes.

Nesta técnica de análise monitoram-se constantemente as componentes harmônicas da frequência de rotação (frequência fundamental mecânica), criando assim um histórico que forma a assinatura magnética da máquina. Dada alguma alteração nesta assinatura, pode-se inferir algum problema interno na máquina ou uma possível mudança em seu ponto de operação.

Métodos para realizar o rastreamento dessas frequências foram muito estudados no trabalho de (DOS SANTOS, 2016), que mostra a dificuldade de procurar a frequência mecânica fundamental devido à resolução da FFT, sua baixa amplitude e o fato de a frequência da máquina se alterar levemente ao longo do dia. Esse mesmo trabalho mostra uma boa solução para o problema, o qual consiste de encontrar as componentes harmônicas da fundamental mecânica nas redondezas da fundamental elétrica, e assim inferir a frequência mecânica da máquina. Os critérios para interpretação da assinatura magnética da máquina ainda estão em desenvolvimento em trabalhos do GRUCAD.

### 4.2 INDICADORES NO DOMÍNIO DO TEMPO

Análises do campo magnético externo no domínio do tempo não foram exploradas nos trabalhos de (DOS SANTOS, 2016) e (RIGONI, 2014). Contudo viu-se que os sistemas de

monitoramento do fluxo magnético através de sensores de entreferro utilizam o valor real do fluxo para determinar a possível localização de faltas no rotor (IRIS POWER, 2021) e (VIBROSYSTEM, 2021). O presente trabalho apresenta dois indicadores que podem auxiliar no monitoramento da máquina elétrica, são eles: o valor eficaz do campo magnético ao longo do tempo e o fluxo por polo. Ambos os indicadores serão abordados a seguir.

#### 4.2.1 Valor Eficaz do Campo Magnético

O valor eficaz, ou valor RMS (*Root Mean Square*), de um sinal de tensão ou corrente alternadas equivale a grandeza em corrente contínua capaz de transferir a mesma potência a uma carga. Em forma quantitativa o valor do campo magnético RMS pode ser calculado conforme (4.1).

$$H_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T H(t)^2 dt} \quad (4.1)$$

A partir de (3.2) é possível descrever a forma de onda do campo magnético no tempo através do sinal adquirido nos terminais do sensor por indução. Determina-se assim (4.2), que mostra uma relação integral entre as duas grandezas.

$$H(t) = -\frac{1}{NS\mu_0} \int v(t) dt \quad (4.2)$$

Juntando (4.1) e (4.2), tem-se (4.3) que descreve a relação direta entre o valor eficaz do campo magnético e a tensão induzida nos terminais do sensor por indução.

$$H_{RMS} = \frac{1}{NS\mu_0} \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \left( \int v(t) dt \right)^2 dt} \quad (4.3)$$

Ainda que o resultado obtido em (4.3) seja simples, a integração de sinais sinusoidais em tempo real oferece alguns empecilhos, como a variação do valor médio, ou *offset*, ao longo do tempo, o qual se for integrado fornece um sinal em rampa somado ao sinal sinusoidal encontrado. Além disso, não se pode realizar uma aquisição de centenas de ciclos e filtrar seu valor médio, pois como sua variação é consideravelmente alta haverá discrepâncias entre intervalos de tempo distintos.

A solução mais adequada que foi encontrada para a solução do problema citado foi realizar uma estimação da frequência fundamental do sinal e assim realizar a filtragem do valor CC (corrente contínua) e a integração de poucos ciclos, geralmente 3 ou 5, por vez. Apesar de custosa, essa técnica fornece não só o valor eficaz do campo magnético, mas também a forma de onda do campo magnético ao longo do tempo.

Outra forma de realizar o cálculo do valor RMS é através do espectro em frequência do sinal de tensão. Viu-se que a FFT do sinal obtido do transdutor é composta de diversas harmônicas da frequência fundamental mecânica e da elétrica, o que permite a realização de detecção de faltas incipientes pela análise do campo externo. O valor RMS do sinal do sensor pode ser calculado através da combinação dos valores eficazes de todas as componentes do sinal, ou seja, pode ser obtido através de (4.4), sendo  $V_{RMSfi}$  o valor eficaz da harmônica de frequência  $f_i$ .

$$V_{RMS} = \sqrt{\sum_{i=0}^{\infty} V_{RMSfi}^2} \quad (4.4)$$

Utilizando as equivalências (4.5) e (4.6) da Transformada de Fourier que relaciona sinais sinusoidais no domínio do tempo com suas representações no domínio espectral, bem como a relação de integração entre esses 2 domínios, escreve-se (4.7) que relaciona o valor do campo magnético RMS com o valor das componentes harmônicas do espectro em frequência do sinal adquirido nos terminais do transdutor.

$$V_p \cos(2\pi ft) \leftrightarrow \frac{V_p}{2} \delta(\omega - 2\pi f) + \frac{V_p}{2} \delta(\omega + 2\pi f) \quad (4.5)$$

$$\int v(t) dt \leftrightarrow \frac{v(\omega)}{j\omega} \quad (4.6)$$

$$H_{RMS} = \frac{1}{NS\mu_0} \sqrt{\sum_{i=0}^{\infty} \left( \frac{V_{RMSfi}}{2\pi f_i} \right)^2} \quad (4.7)$$

O problema atrelado a este método de cálculo é a necessidade de realizar um truncamento do somatório, já que na prática é possível apenas somar um número  $n$  de

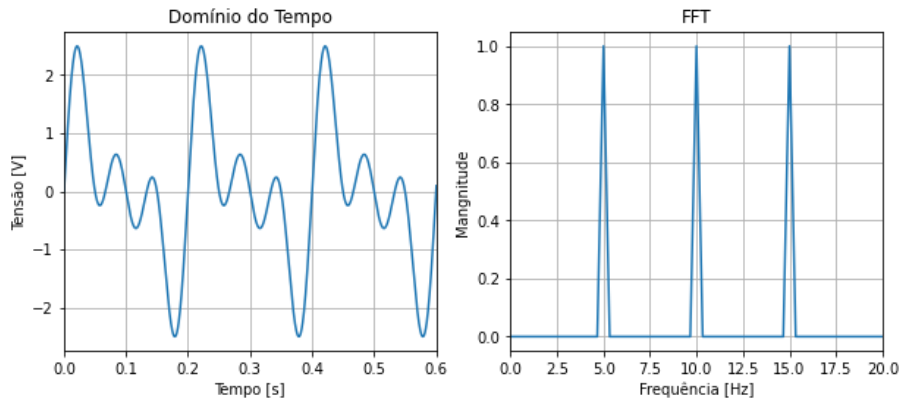
componentes. Além disso, é necessário realizar o rastreamento de todas essas componentes dentro do espectro em frequência do sinal, assim como feito no tópico anterior.

Para exemplificar o método descrito nesta seção, utiliza-se o sinal dado por (4.8).

$$v(t) = \text{sen}(2\pi \cdot 5 \cdot t) + \text{sen}(2\pi \cdot 10 \cdot t) + \text{sen}(2\pi \cdot 15 \cdot t) \quad (4.8)$$

O sinal no domínio do tempo e sua FFT são mostrados na Figura 23, que exibe apenas a parcela de frequências positivas, por isso multiplicou-se as por 2 para manter a relação (4.5) diretamente ligada com o valor de pico do sinal do domínio do tempo. O sinal é composto por 6000 amostras com frequência de amostragem de 2 kHz. Para título de ilustração, considera-se também que o produto  $NS\mu_0$  é unitário.

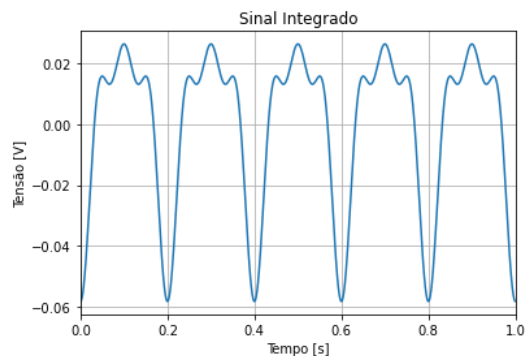
Figura 23 – Sinal exemplo.



Fonte: Autor.

No cálculo pela integração retira-se então o valor médio e realiza-se a integral. Após isso, retira-se novamente o valor médio para adquirir a primitiva. Por fim, obtêm-se o sinal da Figura 24.

Figura 24 – Integral do sinal exemplo.



Fonte: Autor.

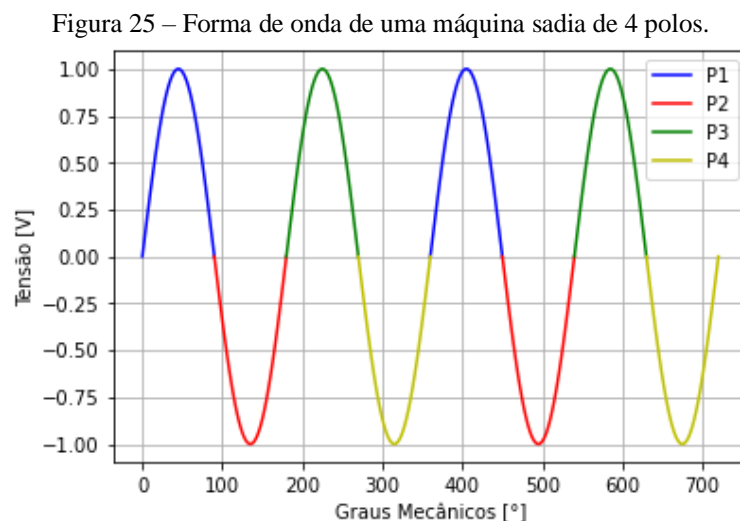
Aplicando (4.3) calcula-se um valor de campo magnético de 0,02626 A/m, e por (4.7) tem-se 0,02626 A/m. Os resultados são idênticos, assim como esperado.

É importante pontuar que efeitos como janelamento e vazamento espectral podem deteriorar o resultado obtido via FFT. Porém, essa medição permite também calcular o valor RMS do campo para cada frequência de interesse, algo que não é possível com a medição via integração. O número de amostras do sinal e a frequência de amostragem são importantes para o bom desempenho de ambos os métodos.

O acompanhamento do valor eficaz do campo magnético pode auxiliar na detecção de falhas por mostrar um possível aumento das componentes harmônicas que reflete diretamente na magnitude do valor eficaz. Ainda que essas alterações sejam leves, este parâmetro pode ajudar a verificar se houve alteração do ponto de operação, pois haverá um grande aumento da fundamental elétrica da máquina. Para os sensores no entreferro é, muitas vezes, interessante analisar a indução magnética, a qual pode ser obtida pela relação constitutiva  $\mathbf{B}(t) = \mu\mathbf{H}(t)$ .

#### 4.2.2 Fluxo por Polo

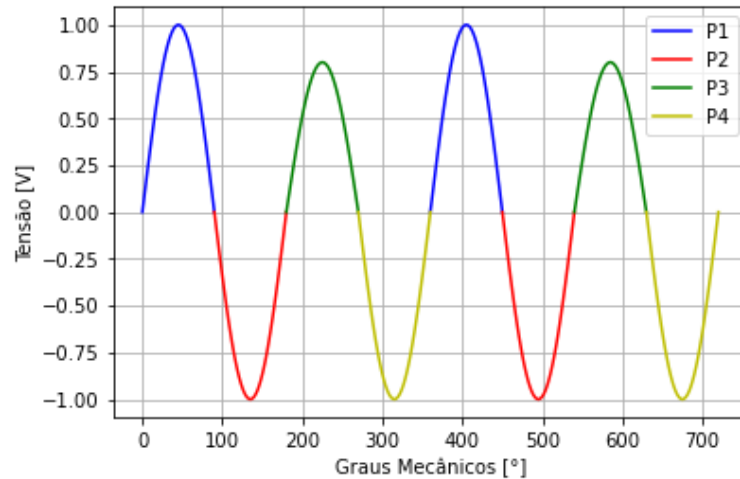
Como visto na seção 2.1, quanto maior o número de polos menor será a velocidade mecânica no eixo da máquina e por conseguinte menor será o valor da frequência fundamental mecânica. A Figura 25 mostra, de forma simplificada, a tensão induzida esperada em um sensor posicionado na carcaça de uma máquina sadia com 4 polos.



Fonte: Autor.

Observa-se então o exposto por (2.1), que em um giro mecânico há a presença de dois ciclos elétricos. Suponha-se agora que há um problema no terceiro polo do rotor que leva à diminuição da tensão captada pelo sensor, resultando assim na Figura 26.

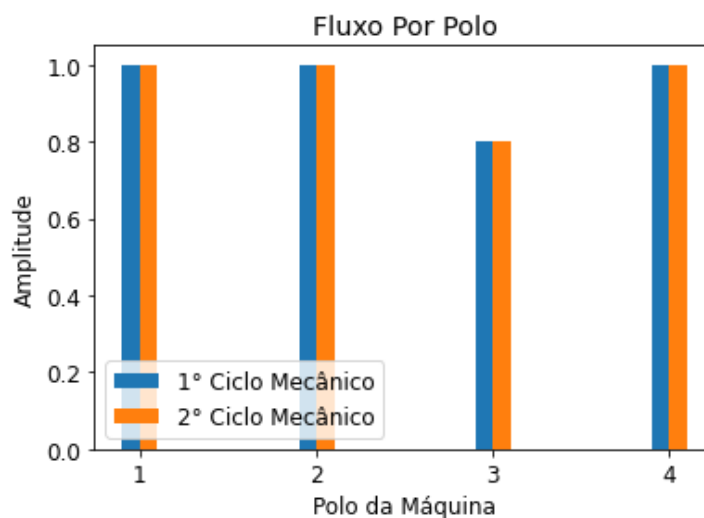
Figura 26 – Forma de onda de uma máquina defeituosa de 4 polos.



Fonte: Autor.

É possível verificar que há alteração no comportamento da máquina de duas formas. Primeiro nota-se que a forma de onda se torna periódica com metade da frequência do caso sadio, ou seja, com período igual à da fundamental mecânica da máquina. Outra forma de aferir o problema é comparar o valor máximo em cada polo da máquina para cada ciclo mecânico monitorado, conforme exposto na Figura 27, a qual mostra um gráfico de barras das amplitudes máximas em módulo em função do polo.

Figura 27 – Fluxo por polo da máquina.



Fonte: Autor.

Nota-se que através desse gráfico de barras é fácil verificar que existe variação no terceiro polo da máquina. Além disso, trata-se de um algoritmo bastante simples que apenas determina os valores máximos e mínimos da tensão induzida dentro de um período elétrico, o qual é imposto na máquina pela rede elétrica quando essa encontra-se sincronizada.

Este método pode ser especificamente aplicado para detecção de faltas em polos do rotor, as quais podem gerar discrepâncias entre seus valores de pico. Além disso, pode funcionar para faltas mecânicas, como desbalanceamento de eixo ou desalinhamento, pois à medida que o rotor girar haverá diferença no tamanho do entreferro, portanto a relutância magnética será diferente.

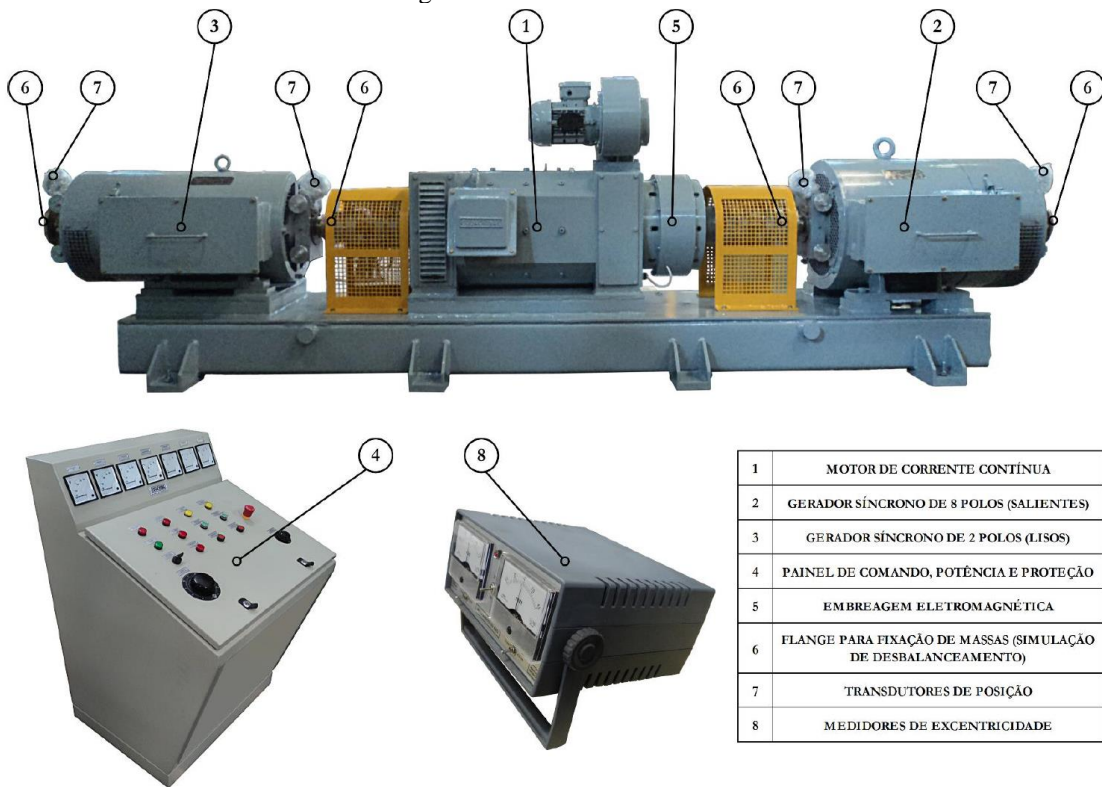
## 5 SISTEMA DE ENSAIOS

Neste capítulo é abordado o funcionamento da bancada de testes instalada no Laboratório de Máquinas e Acionamentos Elétricos (LABMAQ) do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), além do circuito de condicionamento e aquisição de dados para os sensores instalados no Gerador Síncrono (GS) que realizam a medição do seu campo magnético externo.

### 5.1 BANCADA DE TESTES

A bancada mostrada na Figura 28, fabricada pela empresa Equacional Elétrica e Mecânica Ltda e instalada no LABMAQ, é utilizada para realização dos ensaios experimentais. A bancada consiste de três máquinas de eixo horizontal acopladas entre si em uma mesma base. À esquerda, tem-se um gerador síncrono de 2 polos lisos, no meio um motor de corrente contínua, que opera como máquina primária para o sistema, e à direita, um gerador de 8 polos salientes. Os parâmetros destas máquinas podem ser vistos na Tabela III.

Figura 28 – Bancada de testes.



Fonte: (EQUACIONAL, 2014).

Tabela III – Parâmetros das máquinas elétricas da bancada de testes.

Descrição	Motor de Corrente Contínua Aberto com Ventilação Forçada	Gerador Síncrono de Polos Lisos Aberto Autoventilado	Gerador Síncrono de Polos Salientes Aberto Autoventilado
Modelo	EMC1 – 180 LQ	EGT1 – 180 M	EGT1 – 225 M ESP
Fabricante	EQUACIONAL	EQUACIONAL	EQUACIONAL
Potência	10 kW (5 + 5)	10 kVA	10 kVA
Rotação	700 (SER) / 4000 (PAR) RPM	3000 / 3600 RPM	750 / 900 RPM
Tensão de Armadura (Ligação)	220 V (SÉRIE/PARALELO)	380 V (Y + N)	380 V (Y + N)
Corrente de Armadura	56 A	15,2 A	15,2 A
Frequência	CC	50 / 60 Hz	50 / 60 Hz
Tensão de Campo	220 V	220 V	220 V
Corrente de Campo	5,5 / 1,6 A	2,1 A	3,5 A
Fator de Potência	-	0,8 indutivo	0,8 indutivo
Classe de Isolamento	155°C (F)	155°C (F)	155°C (F)
Tipo de Resfriamento	Ventilação Forçada	Autoventilado	Autoventilado

Fonte: (EQUACIONAL, 2014).

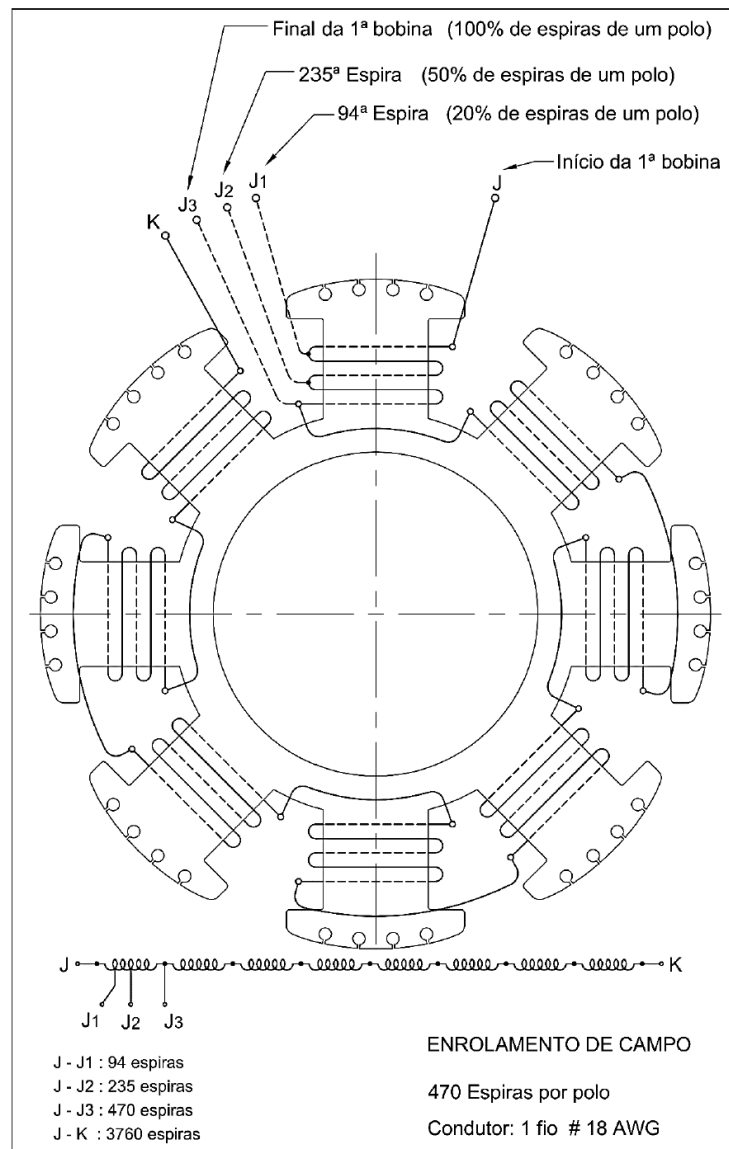
Essa bancada de testes permite a imposição, de forma controlada, de diversos tipos de faltas, tanto de natureza elétrica quanto mecânica, em ambos estator e rotor dos dois geradores síncronos. As faltas possíveis de serem simuladas atualmente são:

- Curto de espiras de um polo do rotor;
- Retirada de espiras de um polo do rotor;
- Curto de espiras de um polo do estator;
- Retirada de espiras de um polo do estator;
- Curto circuito entre lâminas do núcleo do estator;
- Deslocamento de eixo;
- Desbalanceamento do rotor.

Este trabalho foca em ensaios no gerador síncrono de 8 polos salientes, pois graças ao trabalho de (HESSMANN, 2018), é possível realizar a imposição de algumas faltas incipientes de forma *online*, ou seja, sem a necessidade de sua parada. Isso é extremamente importante, pois mantém-se o mesmo ponto de operação da máquina quando sadia ou quando sob falta.

O esquema para as faltas no rotor, ou seja, no enrolamento de campo do gerador é mostrado na Figura 29.

Figura 29 – Esquema para realização de faltas elétricas no rotor.



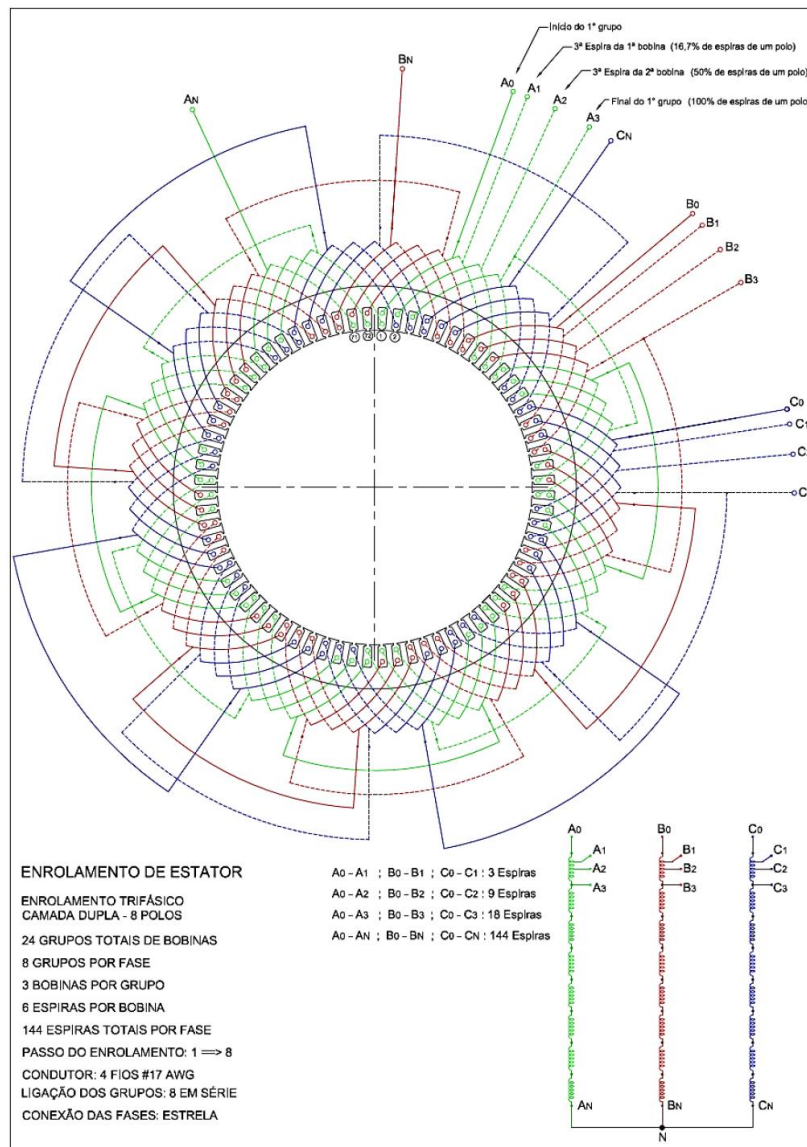
Fonte: (EQUACIONAL, 2014).

Em condição normal de operação, o enrolamento de campo é alimentado através dos terminais J e K. A simulação de retirada de espiras de um polo do rotor é realizada através de contadoras que fazem o chaveamento do terminal de alimentação do enrolamento de campo J

para J1, ou J2, ou J3, correspondendo J1 ao nível mais brando deste tipo de falta (retirada de 20% das espiras de um polo) e J3 o mais severo, onde há a retirada de todas as espiras do polo. O processo para curto de espiras no polo do rotor é análogo ao de retirada, todavia neste caso o terminal J é curto-circuitado com os terminais J1, ou J2, ou J3.

O esquema para as faltas no estator, ou seja, no enrolamento de armadura do gerador, é mostrado na Figura 30.

Figura 30 – Esquema para realização de faltas elétricas no estator.

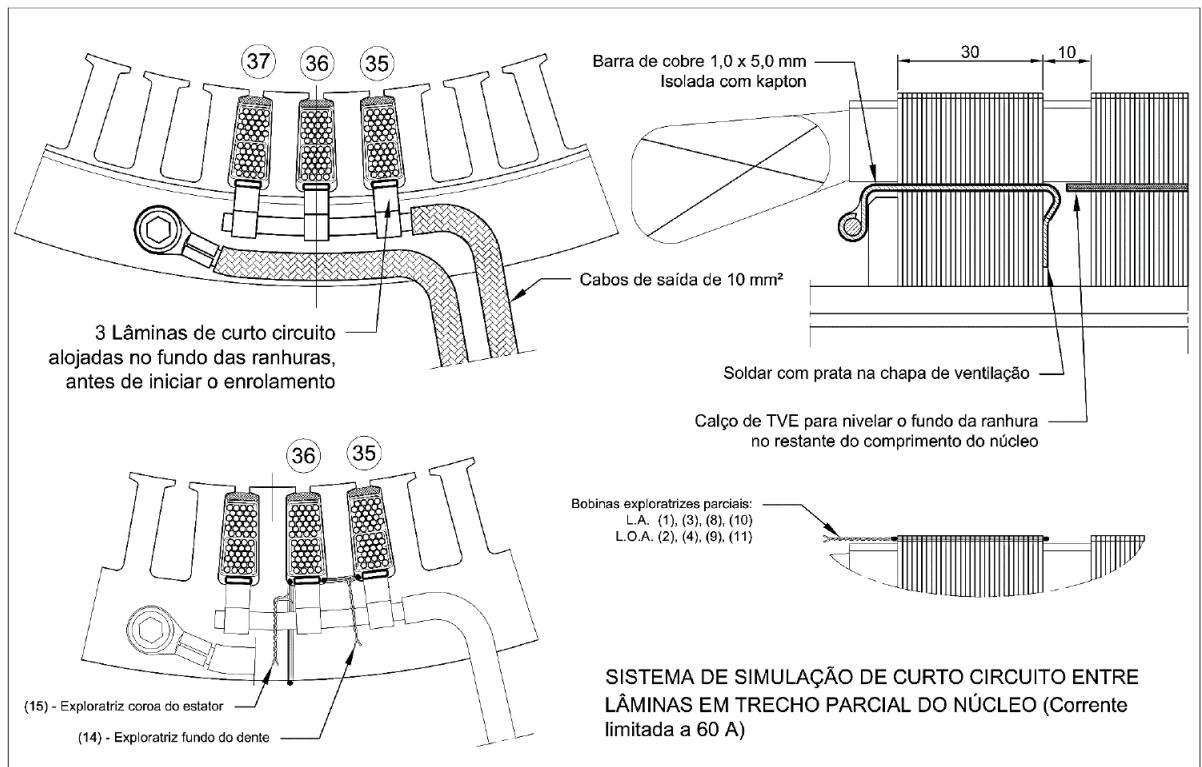


Fonte: (EQUACIONAL, 2014).

Assim como no rotor, as faltas no enrolamento de armadura são realizadas através de *taps*. Neste caso é possível realizar a retirada e o curto de espiras em qualquer uma das três fases. O funcionamento é completamente análogo ao caso do enrolamento de campo.

Em seguida, a Figura 31 mostra o esquema de imposição de falta de curto entre lâminas do núcleo do estator. Nesta falta as lâminas do núcleo são curto-circuitadas através de barras de curto circuito posicionadas no fundo das ranhuras.

Figura 31 – Esquema para realização de falta no núcleo do estator.



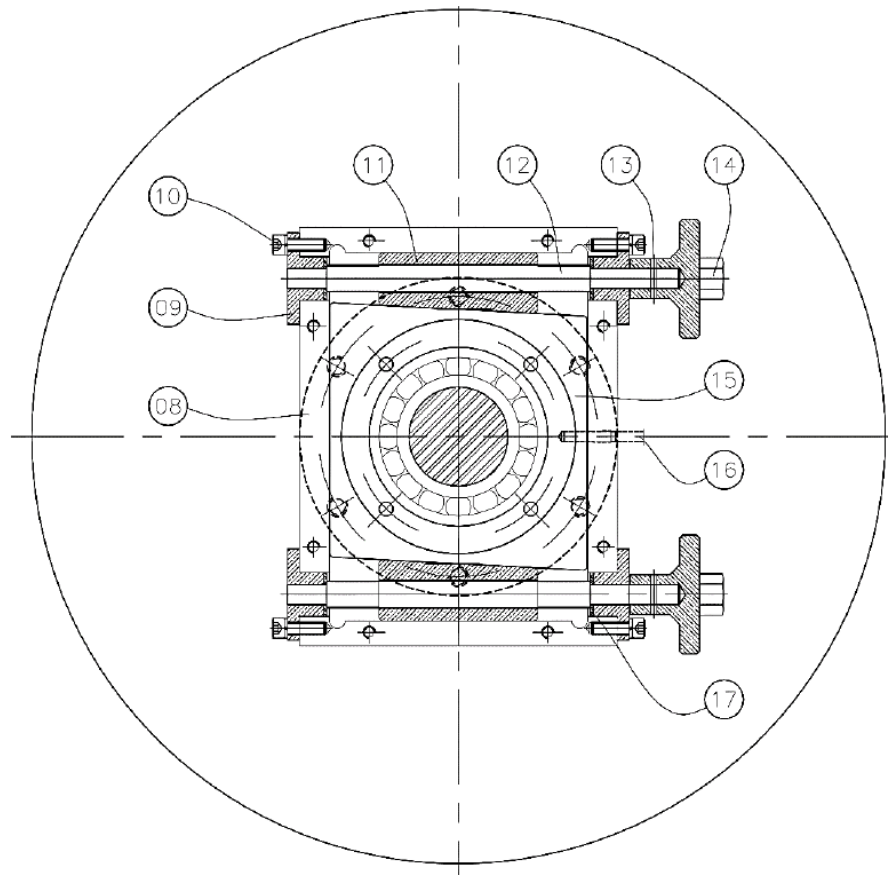
Fonte: (EQUACIONAL, 2014).

Com isso, tem-se a descrição de todas as faltas elétricas, as quais podem ser impostas de maneira *online*. As faltas mecânicas, que consistem no desbalanceamento do rotor e no deslocamento de eixo, não podem ser feitas com a máquina operando, pois há alta probabilidade de danificar o gerador.

O desbalanceamento do rotor é feito através de pesos que são acoplados em um disco de balanceamento. Esses pesos podem ser colocados tanto no Lado Acoplado (LA) quanto no Lado Não-Acoplado (LNA), ou seja, no lado em que o gerador é acoplado à máquina primária (motor CC) ou no lado oposto.

O deslocamento de eixo, ou excentricidade, é realizado através de 2 manípulos que permitem o deslocamento de um mancal deslizante. O nível de deslocamento é medido através de transdutores de posição com auxílio de um medidor de excentricidade (vide Figura 28). O esquema do mancal deslizante é mostrado na Figura 32.

Figura 32 – Esquema para realização de falta de deslocamento de eixo.



Fonte: (EQUACIONAL, 2014).

Na Figura 32, o mancal deslizante (15) é travado através dos manípulos inferior e superior (14), através dos quais é possível movimentar o mancal deslizante de forma a causar um deslocamento positivo (para cima) ou um deslocamento negativo (para baixo) no eixo do gerador. É possível realizar essa manobra tanto no LA quanto no LNA, ou seja, pode-se colocar diferentes níveis de deslocamento nos dois lados da máquina.

## 5.2 SISTEMAS DE CONDICIONAMENTO E AQUISIÇÃO DE SINAIS

Neste tópico serão descritos os sistemas de condicionamento e de aquisição de sinais para os sensores de campo externo e para as exploratrizes

### 5.2.1 Sistema para Sensores de Campo Externo

Como citado anteriormente neste trabalho, os sensores com núcleo de ar utilizados possuem a vantagem de não apresentar saturação, ou seja, não há perda de sensibilidade ou linearidade. Contudo, um dos grandes problemas atrelados à essa característica é o baixo nível

de tensão induzida gerado nos terminais destes transdutores. Para solucionar este problema são utilizados circuitos de condicionamento de sinais, os quais são responsáveis por amplificar os sinais provindos dos transdutores com a maior Relação Sinal Ruído (SNR, do inglês *Signal Noise Ratio*) possível.

O *hardware* utilizado para realizar o condicionamento e aquisição dos sinais dos sensores de campo externo foi desenvolvido por (DOS SANTOS, 2016) e encontra-se dentro da maleta preta mostrada na Figura 33.

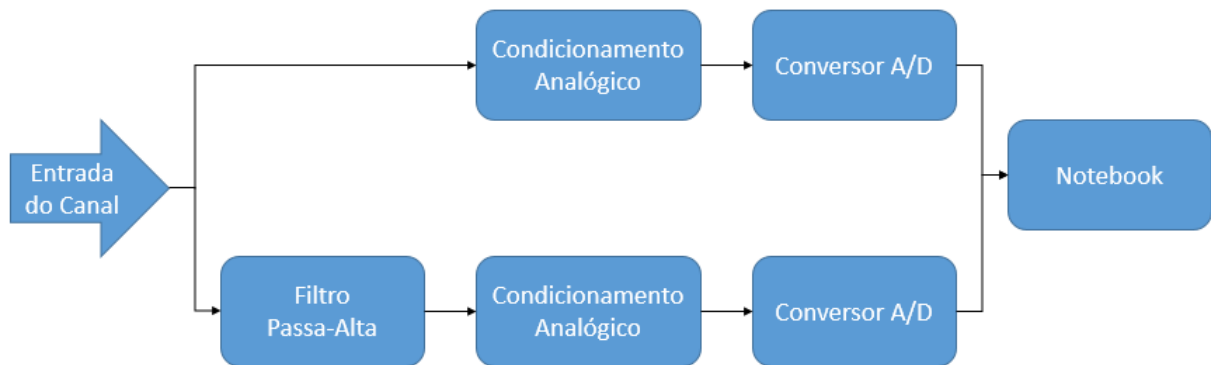
Figura 33 – Maleta contendo circuito de condicionamento e de aquisição.



Fonte: Autor.

Atualmente o sistema permite realizar a aquisição simultânea de 4 sinais provindos de sensores por indução. Além disso, desde o trabalho de (DOS SANTOS, 2016) foram realizadas alterações para melhorar o desempenho do sistema, dentre as quais pode-se citar a adição de um ramo com filtro passa-alta, o qual tem o intuito de melhorar a resolução do espectro de alta frequência, e a retirada da rede de controle de ganho variado, que deixou de ser necessário após o conhecimento das amplitudes máximas e mínimas que os sinais captados poderiam assumir. A Figura 34 mostra a topologia de um canal da maleta.

Figura 34 – Topologia de um canal da maleta.



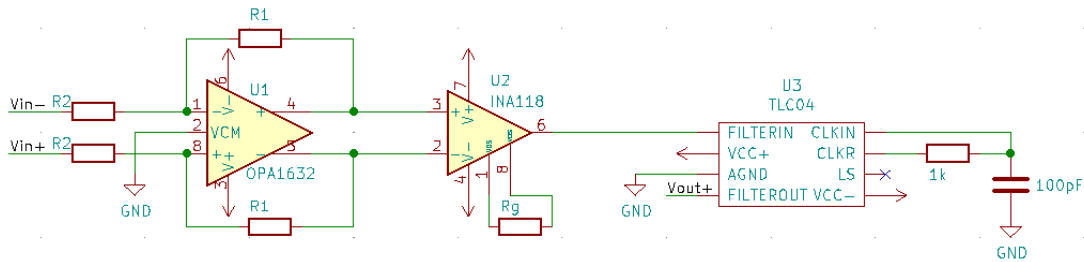
Fonte: Autor.

Será mostrado apenas o caminho “direto” (sem o filtro passa-alta), pois utilizou-se apenas este ramo nos testes experimentais.

A Figura 35 mostra o esquemático do circuito de condicionamento analógico desse ramo. Primeiramente, tem-se um pré-amplificador composto por um OPA1632 na topologia de um amplificador totalmente diferencial. Este Circuito Integrado (CI) possui baixo ruído inerente e injeta baixíssima distorção no sinal, quando comparado com outros circuitos mais comuns. Após isso, há um amplificador de instrumentação INA118, o qual é responsável por fornecer grandes amplificações no sinal de entrada. Além disso, esse CI possui alta impedância de entrada e Alta Taxa de Rejeição de Modo Comum (CMRR, do inglês *Common Mode Rejection Ratio*). O ganho total do circuito (pré-amplificador + amplificador de instrumentação) está fixado em 1875 atualmente. Por fim, tem-se o CI TLC04 que tem como função atuar como um filtro passa-baixa *anti-aliasing*. A frequência de corte deste filtro encontra-se em aproximadamente 4,7 kHz. Essa frequência de corte foi escolhida em concordância com a taxa de amostragem do conversor analógico/digital, o qual realiza a amostragem a 10 kHz, que pelo Teorema de Nyquist permite a reconstrução teórica de sinais com até 5 kHz. Além do exposto, há a presença do circuito de alimentação que realiza a conversão de uma fonte chaveada de 12 V para  $\pm 5$  V.

A aquisição dos sinais é realizada através de uma placa da National Instruments (NI) 6259 conectada via USB a um computador ou *laptop*. Como mencionado, a placa realiza aquisições a uma taxa de 10 kS/s com um conversor A/D de 16 bits de resolução. O processamento dos dados adquiridos é realizado através do *software LabVIEW* (acrônimo para *Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench*) da NI.

Figura 35 – Esquemático do ramo direto da maleta.



Fonte: Autor.

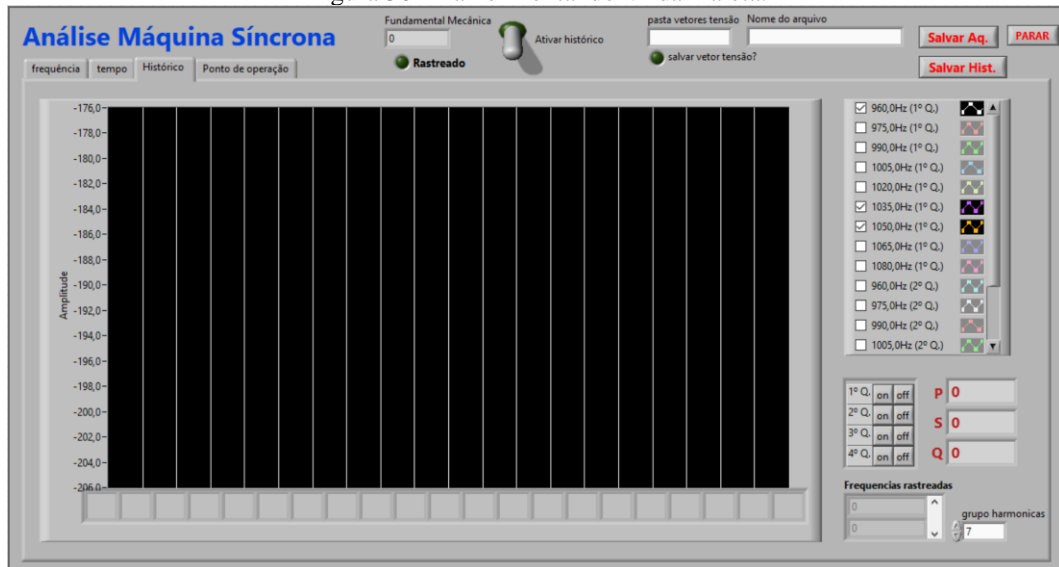
O *LabVIEW* trata-se de uma linguagem de programação gráfica, ou seja, consiste da interligação de diferentes blocos, que executam funções pré-definidas, através de fios que guiam o fluxo de dados. A principal vantagem deste tipo de linguagem é a dispensa de um código propriamente escrito pelo usuário, característica essa que facilita a programação para pessoas que não tem experiência nesta área. Uma desvantagem atrelada a essa dispensa de um código escrito é a dificuldade de implementação de tarefas mais complexas, visto a disponibilidade apenas de blocos com funções pré-definidas. Contudo, graças a uma comunidade bastante ativa em fóruns essa desvantagem é muitas vezes contornada.

Os programas em *LabVIEW* são comumente chamados de instrumentos virtuais (VIs, do inglês Virtual Instruments) pela sua similaridade com instrumentos de medição reais. Esses VIs são compostos pelo painel frontal, o qual contém o sistema de interface com o operador, e o diagrama de blocos, local onde é executada a programação gráfica em si.

Sem dúvidas a grande aplicação dessa linguagem de programação está atrelada a aquisição e automação, já que permite uma integração facilitada entre computador, placa de aquisição de dados e instrumentos de medição. Um exemplo disso é o trabalho de (BRESCOVITT, 2020) que desenvolveu um VI que integra diversos instrumentos de medição de uma bancada de testes de motores de indução com um *laptop*, facilitando e agilizando assim a realização de ensaios.

Neste contexto, a Figura 36 mostra o painel frontal do VI utilizado para realizar o processamento em tempo real dos dados adquiridos pelo *hardware* da maleta.

Figura 36 – Painel frontal do VI da maleta.



Fonte: Autor.

Na tela mostrada, o operador pode visualizar o histórico de amplitudes das componentes harmônicas de cada um dos 4 canais da maleta. Cada ponto desse histórico é construído a partir de uma aquisição de 10 segundos com frequência de aquisição de 10 kS/s. Realiza-se a FFT do sinal adquirido neste intervalo de tempo e salva-se a amplitude de cada componente, mostrando assim um histórico gráfico na tela do VI. As outras abas permitem visualizar o espectro em frequência e o sinal no tempo da última aquisição de 10 segundos. É possível verificar também o ponto de operação do gerador, o qual é mostrado dentro da curva de capacidade da máquina, através do recebimento de dados de um analisador de energia.

Ao fim do ensaio, o usuário pode salvar o histórico de amplitudes, bem como os valores medidos pelos sensores durante todo ensaio. Isso permite que se possa realizar um pós-processamento nos dados, se assim for de interesse ao usuário.

### 5.2.2 Sistema para Exploratrizes

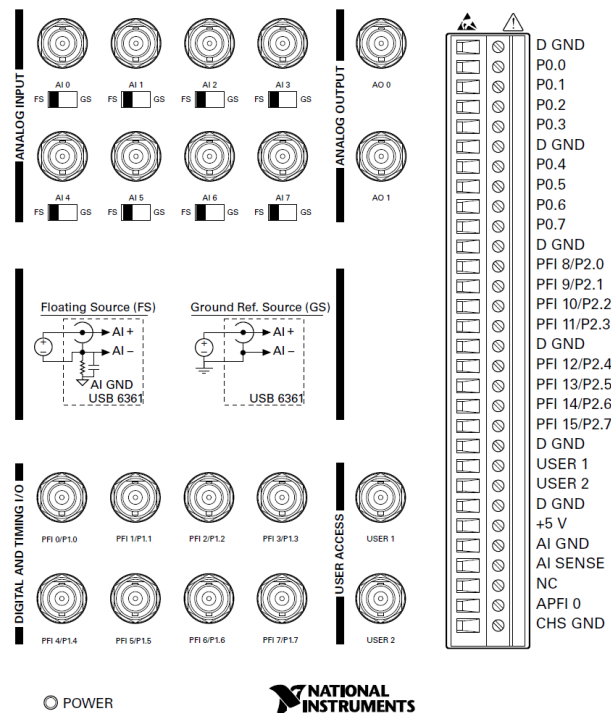
Neste trabalho optou-se por monitorar as seguintes exploratrizes (vide Figura 15):

- Exploratriz Dente Total 0° (0°)
- Exploratriz Dente Total 90° Elétricos (90°E)
- Exploratriz Dente Total 90° Mecânicos (90°M)
- Exploratriz Coroa do Estator (CE)

Escolheram-se as exploratrizes  $0^\circ$ ,  $90^\circ\text{E}$  e  $90^\circ\text{M}$  para monitorar o campo magnético em diferentes ângulos da máquina. A exploratriz CE foi monitorada por ser a mais próxima da carcaça do gerador síncrono.

Como visto na seção 3.4, o nível de tensão dos sinais providos dessas exploratrizes é da ordem de unidades de Volts, sendo então desnecessário um circuito de amplificação. Para realizar a aquisição desses sinais utilizou-se uma placa NI USB-6361 BNC, cujo o painel frontal e a pinagem são mostrados na Figura 37.

Figura 37 – Painel frontal e pinagem da placa NI USB-6361 BNC.



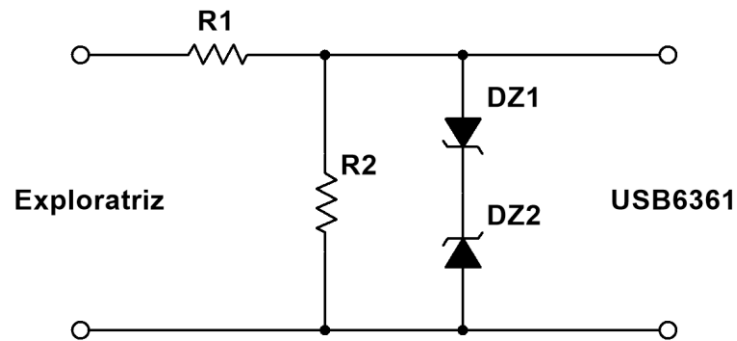
Fonte: (NATIONAL INSTRUMENTS, 2021).

A placa realiza a amostragem a uma taxa de 10 kS/s com aquisições de 10 segundos com um conversor A/D de 16 bits. As exploratrizes, que são isoladas, foram referenciadas ao pino AI GND da placa, e os canais foram configurados como *Floating Source* (FS).

Visto que a tensão máxima da placa NI USB-6361 BNC é  $\pm 10$  V, projetou-se o circuito de proteção ilustrado na Figura 38 para limitar a tensão na entrada de cada canal.

A Tabela IV fornece os valores dos componentes do circuito da Figura 38 e o ganho do sistema para cada uma das exploratrizes. É importante observar que a exploratriz CE na seção 3.4 apresentou uma tensão maior do que 10 V, por isso necessita de uma maior atenuação para não causar danos à placa de aquisição.

Figura 38 – Circuito de proteção para NI USB-6361 BNC.



Fonte: Autor.

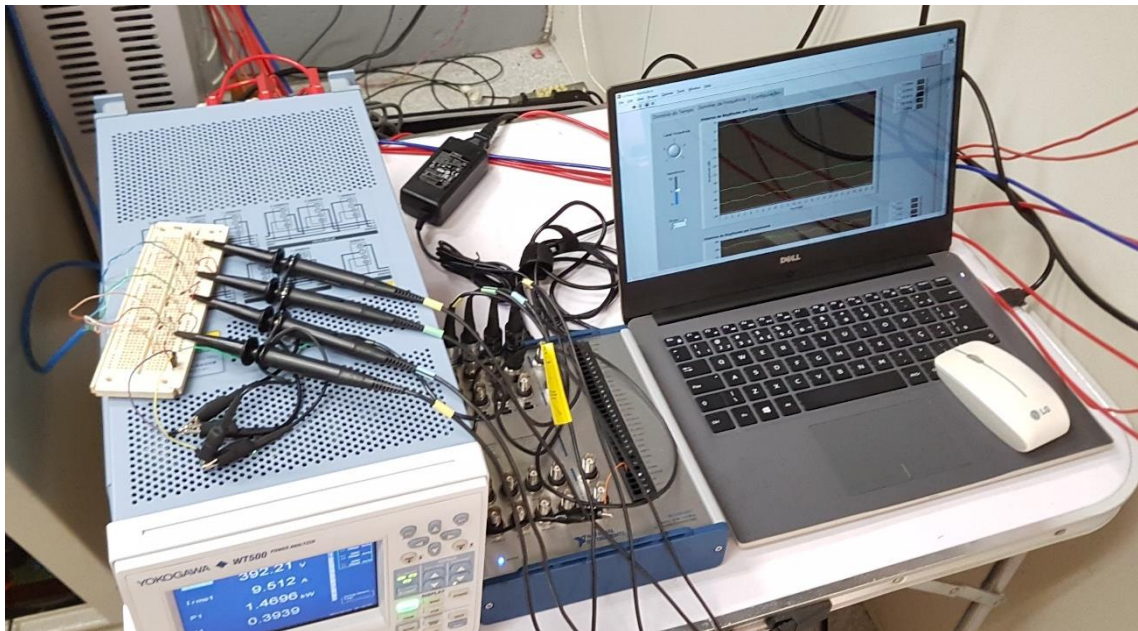
Tabela IV – Parâmetros dos circuitos de proteção para NI USB-6361 BNC.

Exploratriz	R1	R2	DZ1/DZ2	Ganho
0°	1,2k $\Omega$	1,2k $\Omega$	9,1V	0,5
90° Elétricos	1,2k $\Omega$	1,2k $\Omega$	9,1V	0,5
90° Mecânicos	1,2k $\Omega$	1,2k $\Omega$	9,1V	0,5
Coroa do Estator	12k $\Omega$	1,2k $\Omega$	9,1V	0,09

Fonte: Autor.

Para processar os dados utiliza-se novamente o *software LabVIEW*. A Figura 39 mostra, na prática, o aparato completo para medição das exploratrizes.

Figura 39 – Aparato completo para medição das exploratrizes.

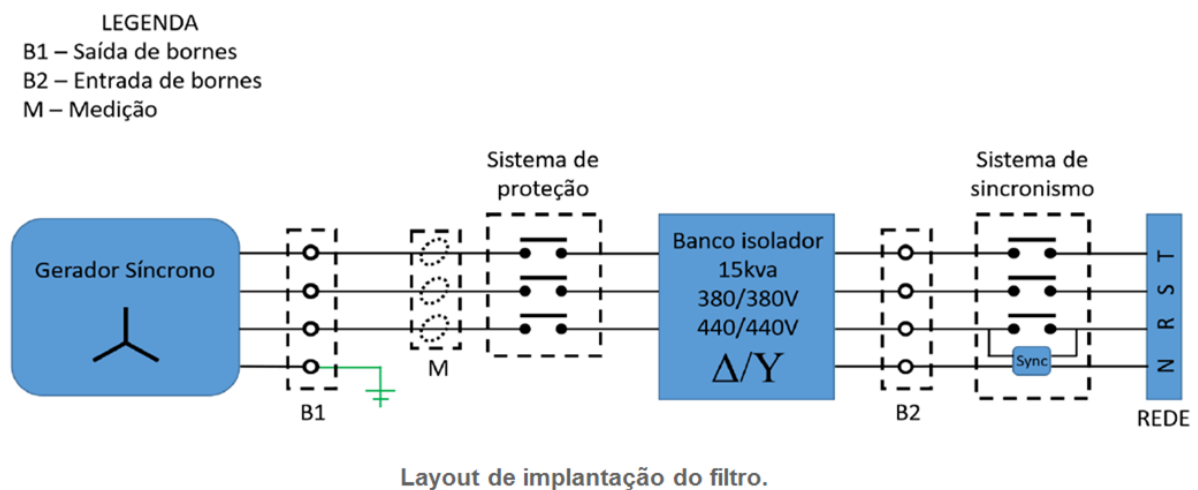


Fonte: Autor.

### 5.3 CONEXÃO COM A REDE ELÉTRICA

Além da capacidade de imposição de faltas de forma *online*, uma das principais características da bancada de testes instalada no LABMAQ é a operação dos geradores em sincronismo com a rede elétrica. Contudo, viu-se na prática que a operação da máquina de 8 polos salientes sincronizada com a rede elétrica possuía correntes de linha altamente distorcidas, mesmo com a máquina sadia. Para resolver este problema foi conectado um filtro composto de um banco de transformadores, como mostra o esquema da Figura 40.

Figura 40 – Esquemático do filtro para gerador em sincronismo.



Fonte: Autor.

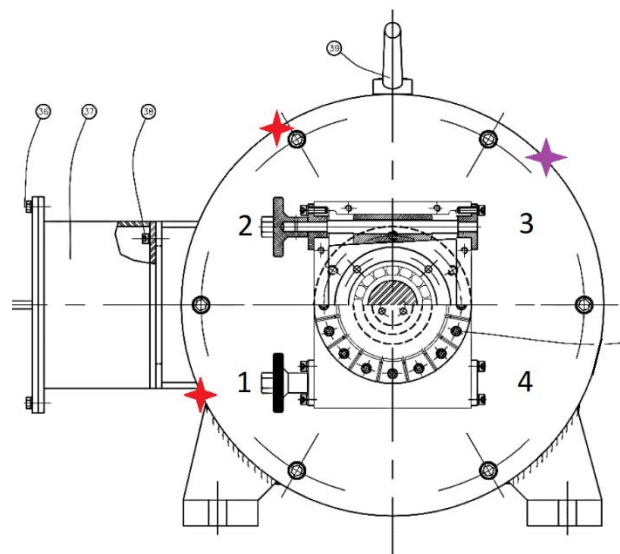
Projetado pelos integrantes do LABMAQ, esse banco realiza a filtragem, principalmente, da componente de 3ª harmônica e de suas múltiplas, por tratar-se de um banco de transformadores monofásicos na topologia  $\Delta$ -Y. A causa deste problema foi atrelada a magnetização do transformador da subestação, que absorve uma corrente de magnetização maior que a nominal do gerador.

## 6 ENSAIOS NA BANCADA DE TESTES

Os ensaios em bancada foram realizados no gerador síncrono de 8 polos salientes com tensão nominal de 380V, sincronizado com a rede elétrica de 60 Hz e ponto de operação constante de 6 kVA com fator de potência 0,8 indutivo. O carregamento do gerador foi mantido sempre constante, para assim analisar apenas as variações causadas pelas faltas impostas e não pelo ponto de operação. Uma carga de lâmpadas local foi conectada ao gerador para evitar a sua possível motorização caso algum problema com a rede elétrica viesse a ocorrer.

Distribuíram-se 3 sensores de campo magnético por indução na carcaça da máquina, conforme mostrado na Figura 41. O sensor em roxo trata-se do sensor de referência do estudo sobre aspectos construtivos de sensores magnéticos por indução. Os dois sensores vermelhos são menores e mais pontuais em relação à máquina do que o sensor roxo.

Figura 41 – Distribuição dos sensores por indução na carcaça do gerador.



Fonte: Autor.

Os sinais das exploratrizes são obtidos diretamente da caixa de ligação da máquina, sendo necessário apenas a conexão com o circuito de proteção e com a placa da NI. As aquisições dos sinais dos sensores externos e das exploratrizes são realizadas ao mesmo tempo, porém não de maneira síncrona, pois cada *laptop* possui um tempo de processamento diferente. A Figura 42 mostra uma foto da máquina e do sistema de aquisição durante a realização dos ensaios na bancada de testes.

Figura 42 – Ensaio na bancada de testes.



Fonte: Autor.

Foram realizados ensaios de retirada de espiras de um polo do rotor, retirada de espiras de um polo do estator, curto entre lâminas do núcleo do estator e deslocamento de eixo. Os resultados obtidos são mostrados a seguir.

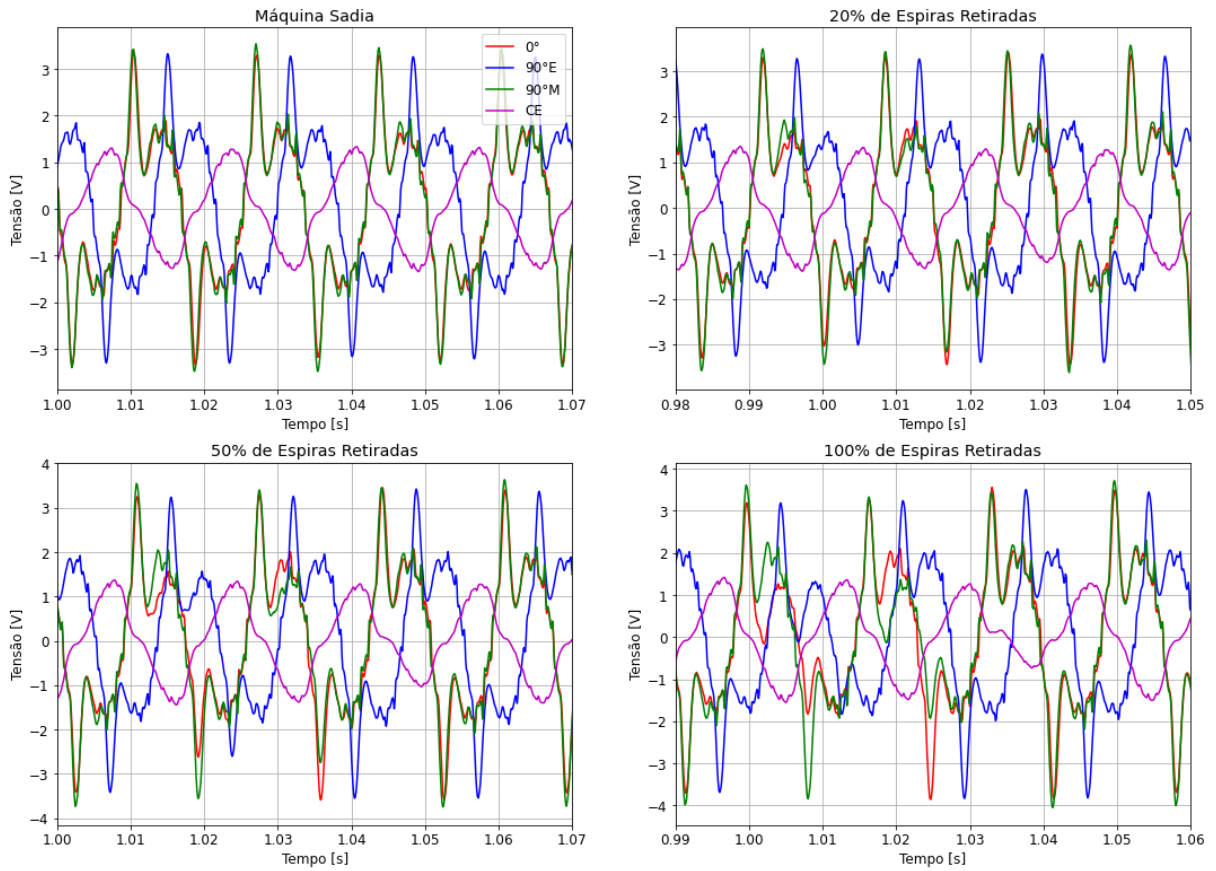
### 6.1 ENSAIO 1 - RETIRADA DE ESPIRAS DE UM POLO DO ROTOR

Neste ensaio o gerador foi deixado operando de forma sadia por um determinado tempo, em seguida retirou-se 20% das espiras de um polo do rotor. Após isso, retirou-se mais 30% de espiras, totalizando assim 50%. Colocou-se então o nível mais severo da falta, retirando todas as espiras do polo. Por fim, todas as espiras foram reconectadas e a máquina foi deixada operando de forma sadia por mais um período de tempo.

#### 6.1.1 Ensaio 1 – Exploratrizes

Os sinais medidos das exploratrizes em um período mecânico, ou quatro períodos elétricos, em cada uma das quatro condições da máquina são mostrados na Figura 43. À medida que a falta se torna mais severa, observa-se que o segundo pico negativo da tensão induzida na exploratriz de  $0^\circ$  diminui. No final, quando todas as espiras do polo são retiradas, a indução fornecida por esse polo cessa por completo, e por consequência, o nível de tensão da exploratriz nesse pico cai drasticamente.

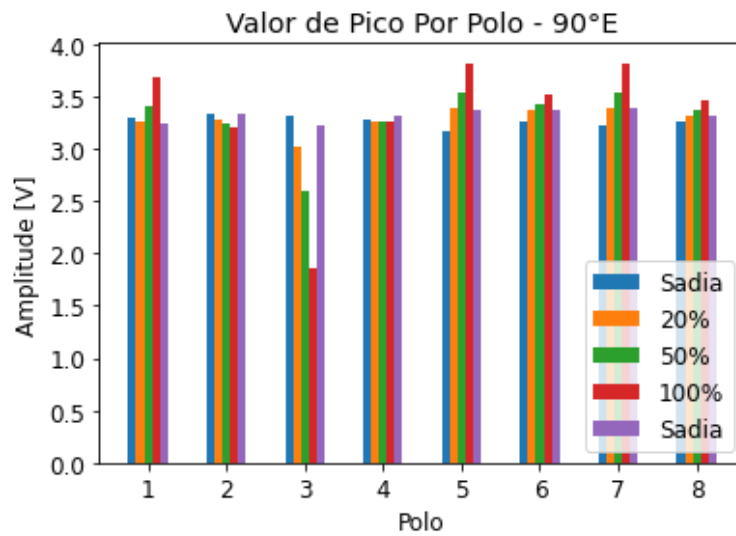
Figura 43 – Ensaio 1, sinais das exploratrizes.



Fonte: Autor.

Com os valores máximos em cada polo de um período mecânico da exploratriz 90°E, para os três graus de falta, montou-se o gráfico de barras da Figura 44.

Figura 44 – Ensaio 1, valores de pico da exploratriz 90°E.

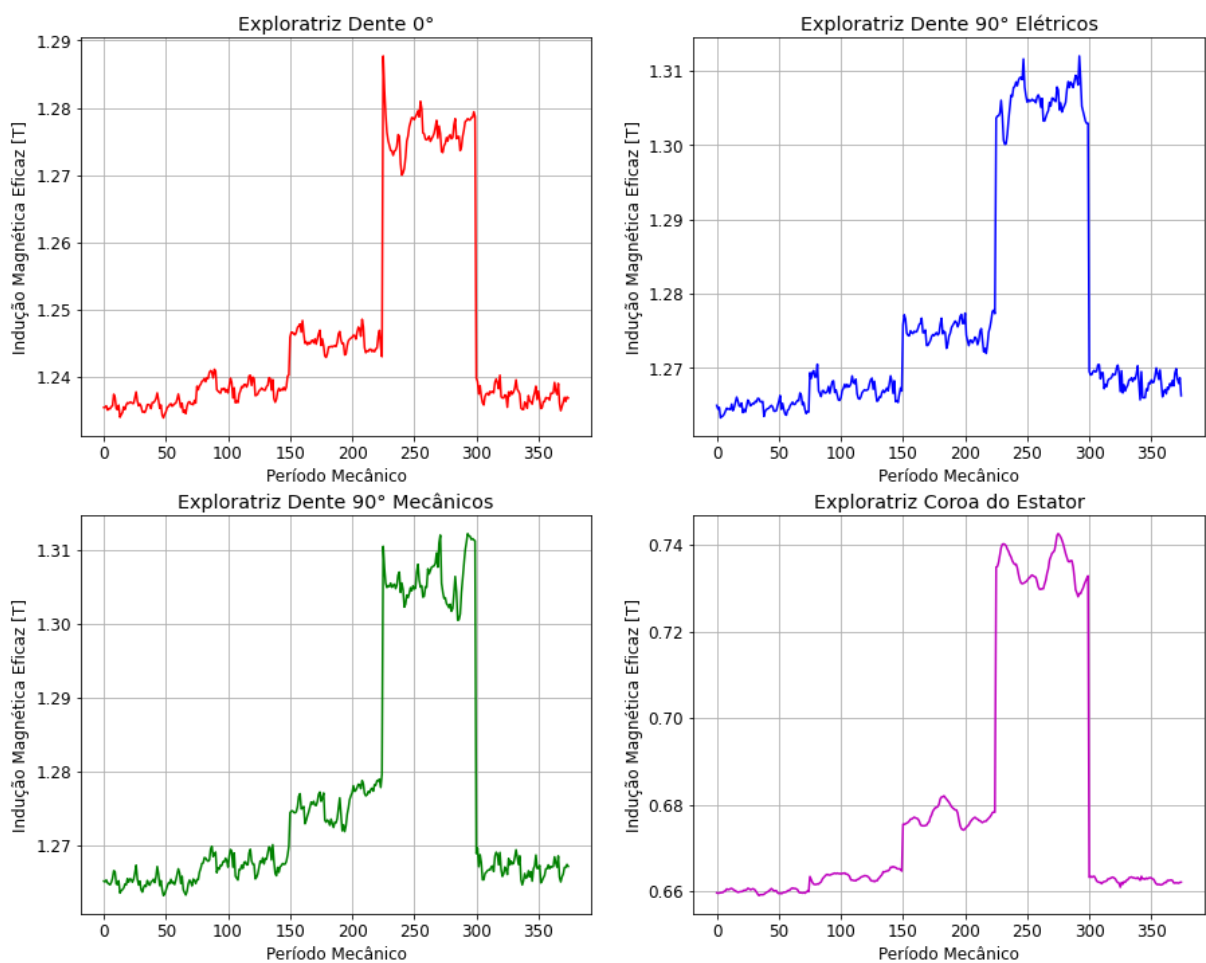


Fonte: Autor.

Percebe-se que a tensão no polo 3 varia bastante se comparado aos polos 2 e 4, adjacentes, indicando que há algum problema com o seu fluxo magnético. Isso mostra que o valor de pico por polo é um bom indicador para detectar falta de retirada de espiras do rotor. O mesmo resultado repete-se para os sinais das outras exploratrizes.

Em seguida, traçou-se o valor estimado da indução magnética RMS para as quatro exploratrizes, com 75 períodos mecânicos para cada um dos 5 estados (sadia, 20% de espiras retiradas, 50% de espiras retiradas, 100% de espiras retiradas e sadia). O resultado é mostrado na Figura 45.

Figura 45 – Ensaio 1, valores da indução magnética RMS para as exploratrizes.

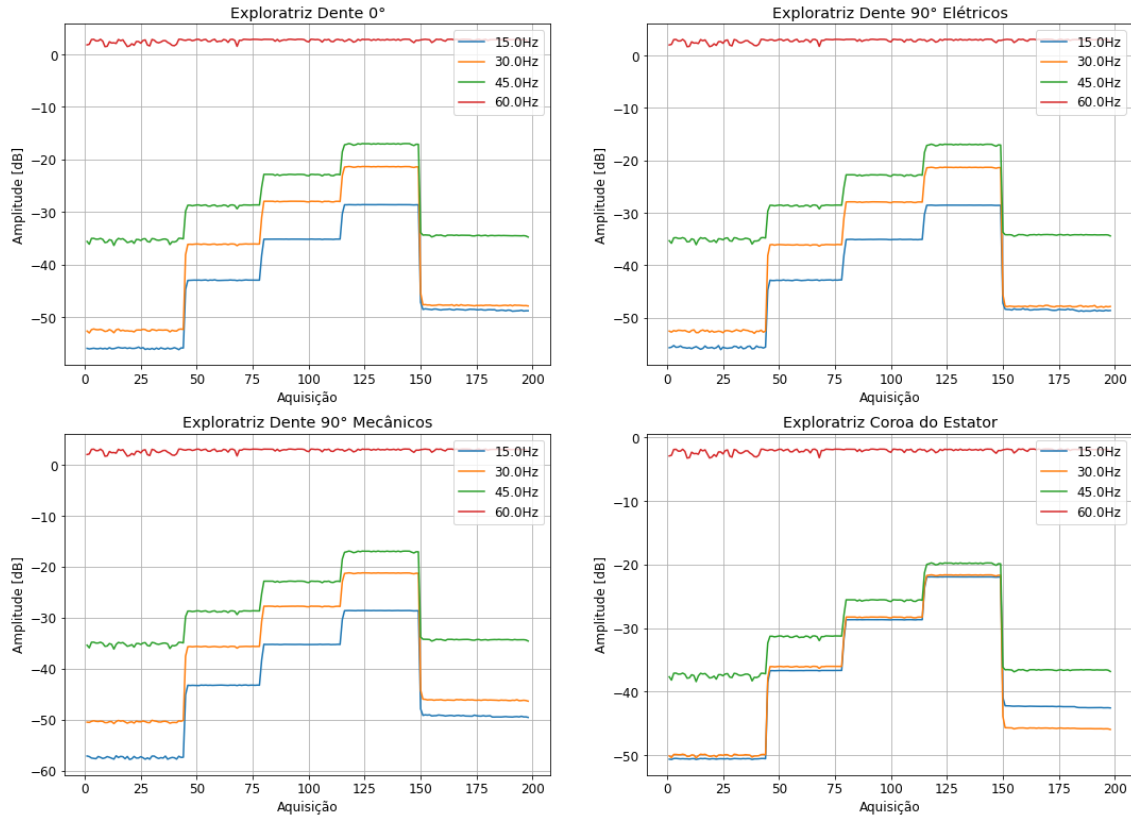


Fonte: Autor.

Observa-se que a transição de patamar da máquina sadia para 20% de espiras retiradas, nesse indicador, é muito sutil, sendo difícil a diferenciação. Para 50% e 100% de espiras retiradas a mudança de patamar torna-se evidente.

Traçou-se também o histórico de amplitudes, de todo o ensaio, das componentes de 15 Hz (fundamental mecânica), 30 Hz, 45 Hz e 60 Hz (fundamental elétrica) para cada uma das exploratrizes. Esse histórico pode ser visto na Figura 46.

Figura 46 – Ensaio 1, histórico de amplitudes das exploratrizes.



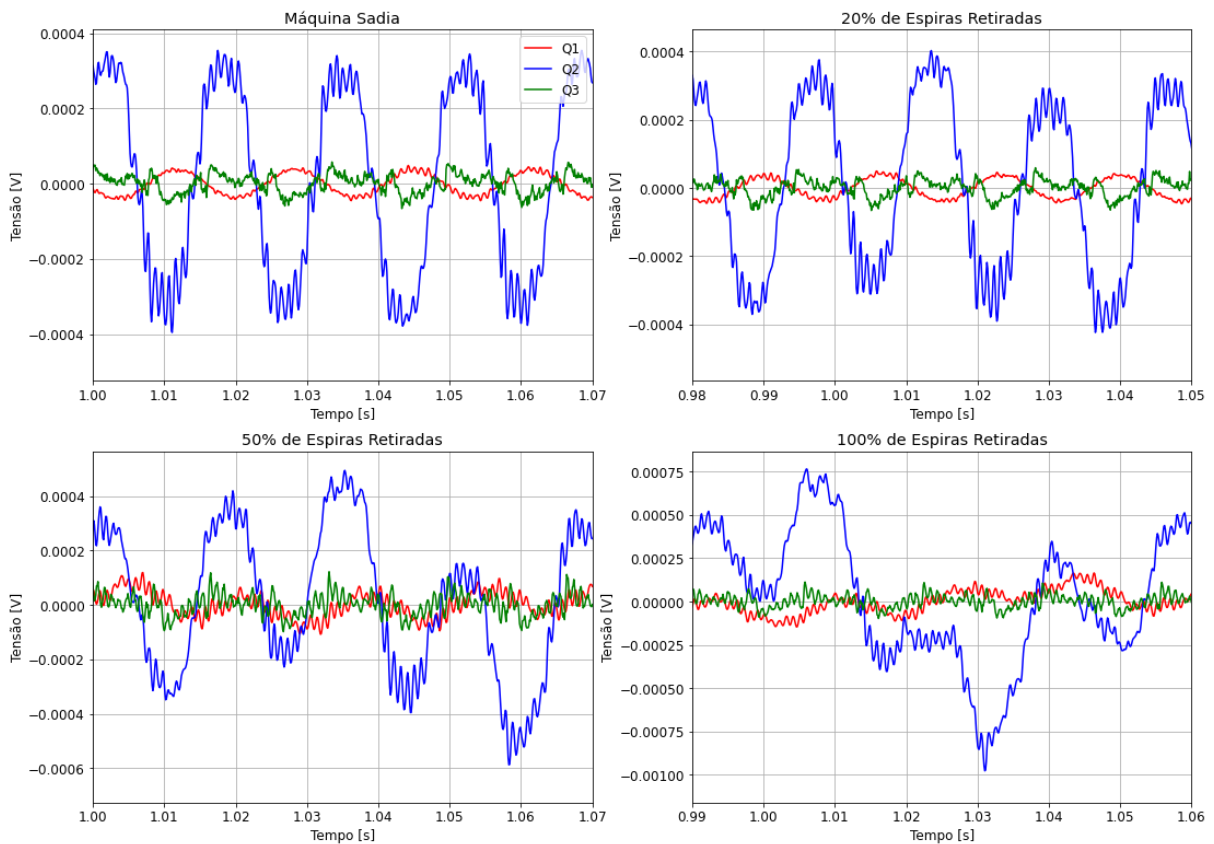
Fonte: Autor.

Percebe-se que não há nenhuma alteração da componente de 60 Hz, porém nas componentes harmônicas da fundamental mecânica existe significativas alterações de valores. Na exploratriz coroa do estator a componente de 15 Hz chega a variar, aproximadamente, 12 dB do estado sadio para o estado de falta leve (20% espiras retiradas). Além disso, em todas as exploratrizes, as três primeiras harmônicas da fundamental mecânica apresentaram um nível de variação significativa, o qual permite localizar o momento de inserção dos três níveis de falta. É muito interessante observar também que as componentes de 15 Hz e 30 Hz não voltaram para o mesmo patamar quando a falta foi retirada. Inferiu-se que a causa disso está na condição térmica da máquina, a qual não teria atingido ainda o regime permanente térmico quando as primeiras aquisições foram realizadas.

### 6.1.2 Ensaio 1 – Sensores por Indução

Em seguida são analisados os mesmos indicadores, porém para os sensores por indução instalados na carcaça do gerador. Primeiramente, na Figura 47, tem-se os sinais medidos pelos três sensores por indução em cada um dos quadrantes do gerador (vide Figura 41) em um período mecânico, ou quatro períodos elétricos, em cada uma das quatro condições da máquina.

Figura 47 – Ensaio 1, sinais dos sensores externos.

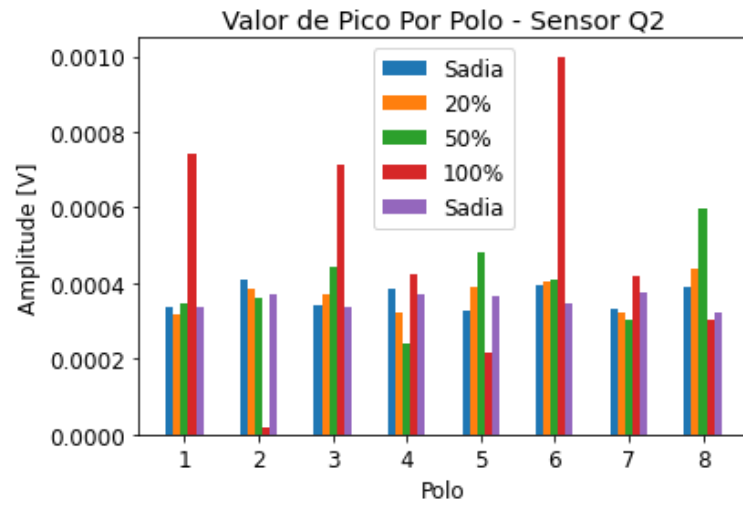


Fonte: Autor.

Observa-se que à medida que o grau de severidade da falta aumenta, a distorção das formas de onda dos sinais dos sensores de campo externo também aumenta.

Com os valores máximos de cada polo de um período mecânico do sensor de campo Q2, para os três graus de falta, montou-se o gráfico de barras da Figura 48 de maneira similar ao feito com a exploratriz 90°E, retirando-se o valor médio. Na condição de 100% de retirada de espiras, não há tensão induzida alguma no polo de número 2. A indicação do polo é meramente ilustrativa visto que as aquisições não são realizadas de maneira síncrona, por isso a Figura 44 e Figura 48 forneceram resultados diferentes.

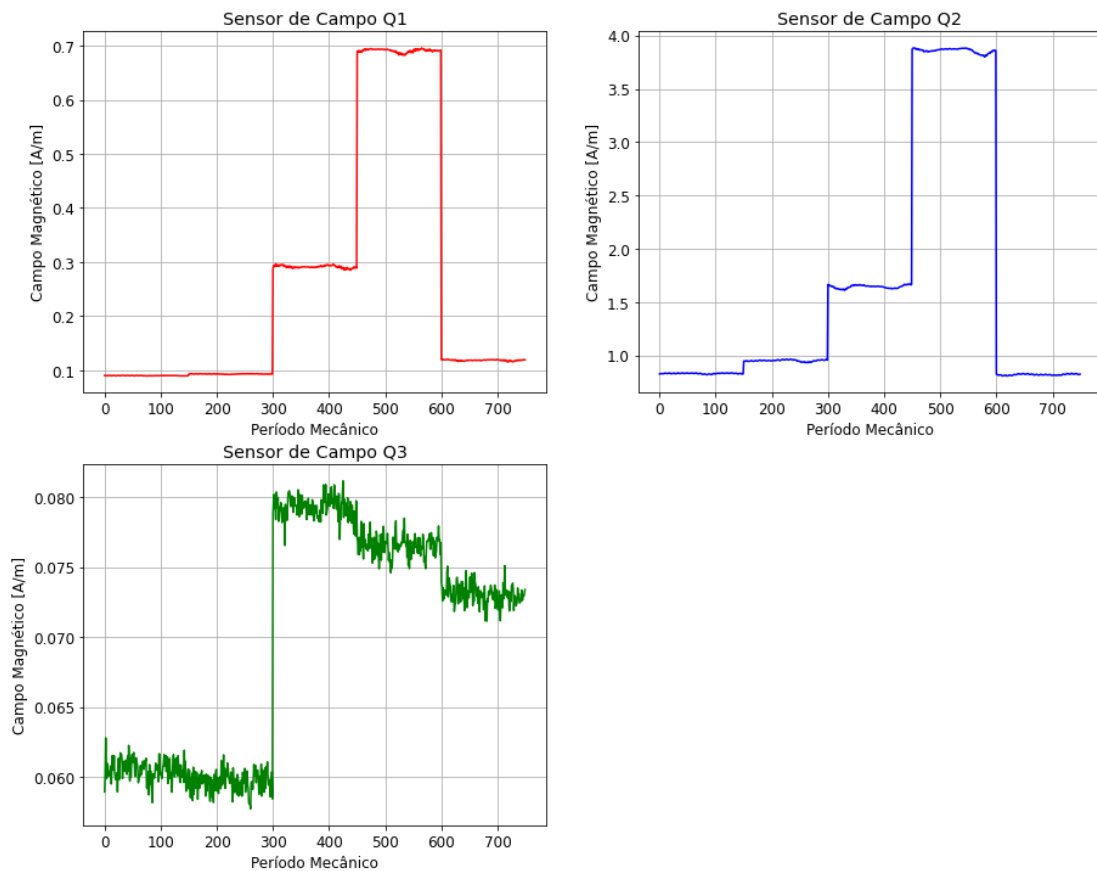
Figura 48 – Ensaio 1, valores de pico do sensor de campo Q2.



Fonte: Autor.

Traçou-se o valor estimado do campo magnético RMS para os três sensores de campo, com 75 períodos mecânicos para cada um dos 5 estados. O resultado é exibido na Figura 49.

Figura 49 – Ensaio 1, valores do campo magnético RMS para os sensores de campo.

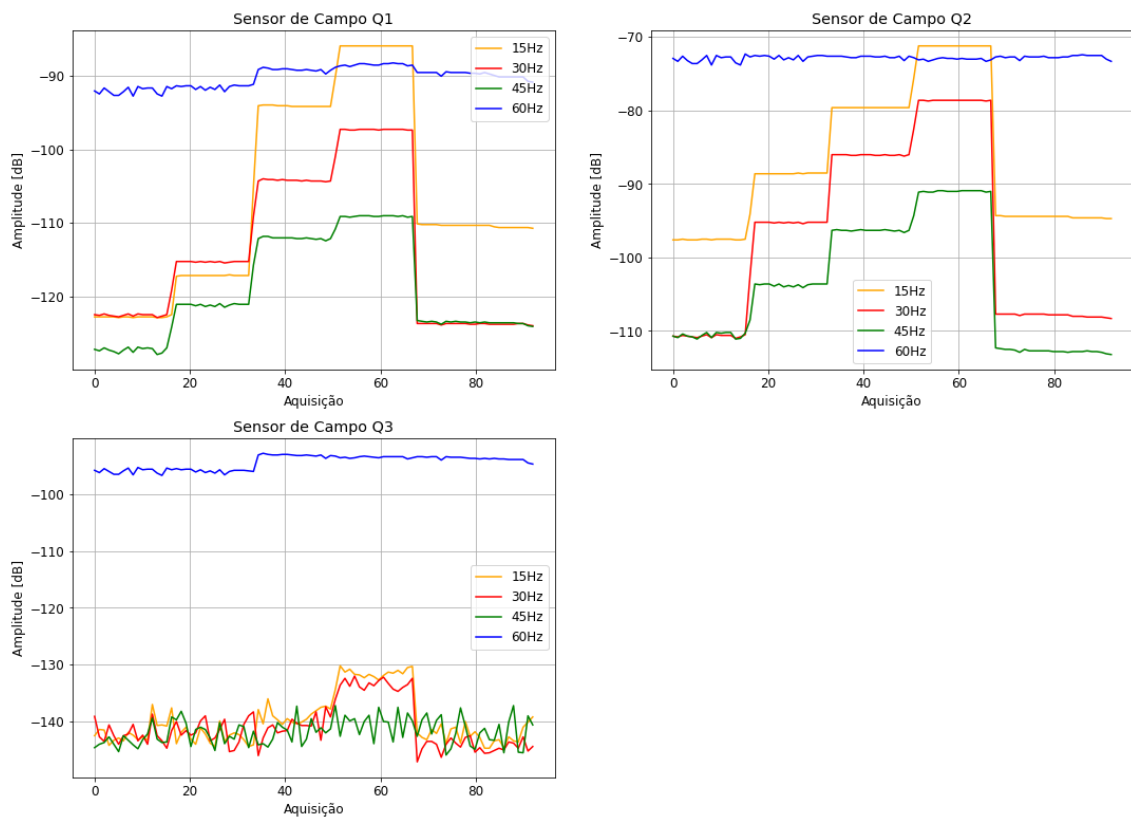


Fonte: Autor.

Para os sensores Q1 e Q2 o resultado foi muito próximo ao das exploratrizes, porém com um pouco menos de ruído. O sensor externo Q3 exibiu variação apenas na imposição de 50% de espiras retiradas. Observa-se também que os sensores Q1 e Q2 apresentaram um campo maior do que Q3, provavelmente atrelado a maior proximidade deles com a caixa de ligação da máquina (vide Figura 41).

Traçou-se também o histórico de amplitudes, de todo o ensaio, das componentes de 15 Hz (fundamental mecânica), 30 Hz, 45 Hz e 60 Hz (fundamental elétrica) para cada um dos sensores de campo. Esse histórico pode ser visto na Figura 50.

Figura 50 – Ensaio 1, histórico de amplitudes dos sensores de campo.



Fonte: Autor.

Se anteriormente a componente de 15 Hz da exploratriz CE variou 12 dB, a componente de 15 Hz do sensor de campo Q1 chegou a variar 20 dB do estado de falta leve para falta média. Além disso, para os sensores de campo Q1 e Q2, o valor da amplitude da frequência fundamental mecânica superou, no grau mais severo de falta, a da fundamental elétrica. Percebe-se bastante ruído nas componentes harmônicas do sensor de campo Q3. É possível delimitar também o momento de inserção dos três níveis de falta nos sensores de campo Q1 e Q2.

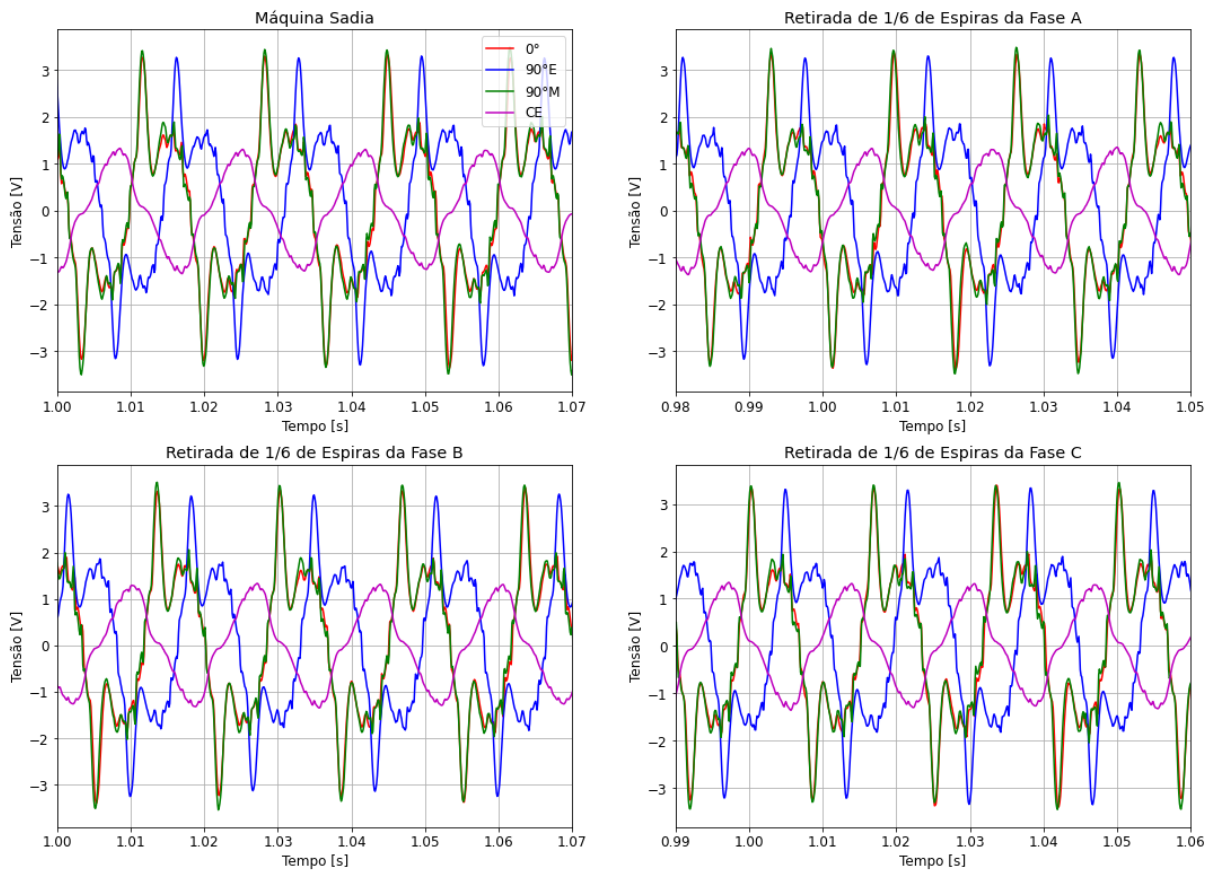
## 6.2 ENSAIO 2 – RETIRADA DE ESPIRAS DE UM POLO DO ESTATOR

No ensaio de número 2 realizaram-se aquisições com o gerador intercalando entre o estado sadio e a retirada de espiras em uma determinada fase do estator. A sequência de estados é: máquina sadia, retirada de 1/6 de espiras da fase A, máquina sadia, retirada de 1/6 de espiras da fase B, máquina sadia, retirada de 1/6 de espiras da fase C, máquina sadia. Analisaram-se os resultados para as exploratrizes e sensores de campo.

### 6.2.1 Ensaio 2 – Exploratrizes

Um período mecânico dos sinais das exploratrizes para os estados sadio, 1/6 de espiras retiradas da fase A, 1/6 de espiras retiradas da fase B e 1/6 de espiras retiradas da fase C são mostrados na Figura 51. Nota-se que, diferente da falta de rotor, não há diferença relevante nos sinais no domínio do tempo no estado sadio e sob falta.

Figura 51 – Ensaio 2, sinais das exploratrizes.

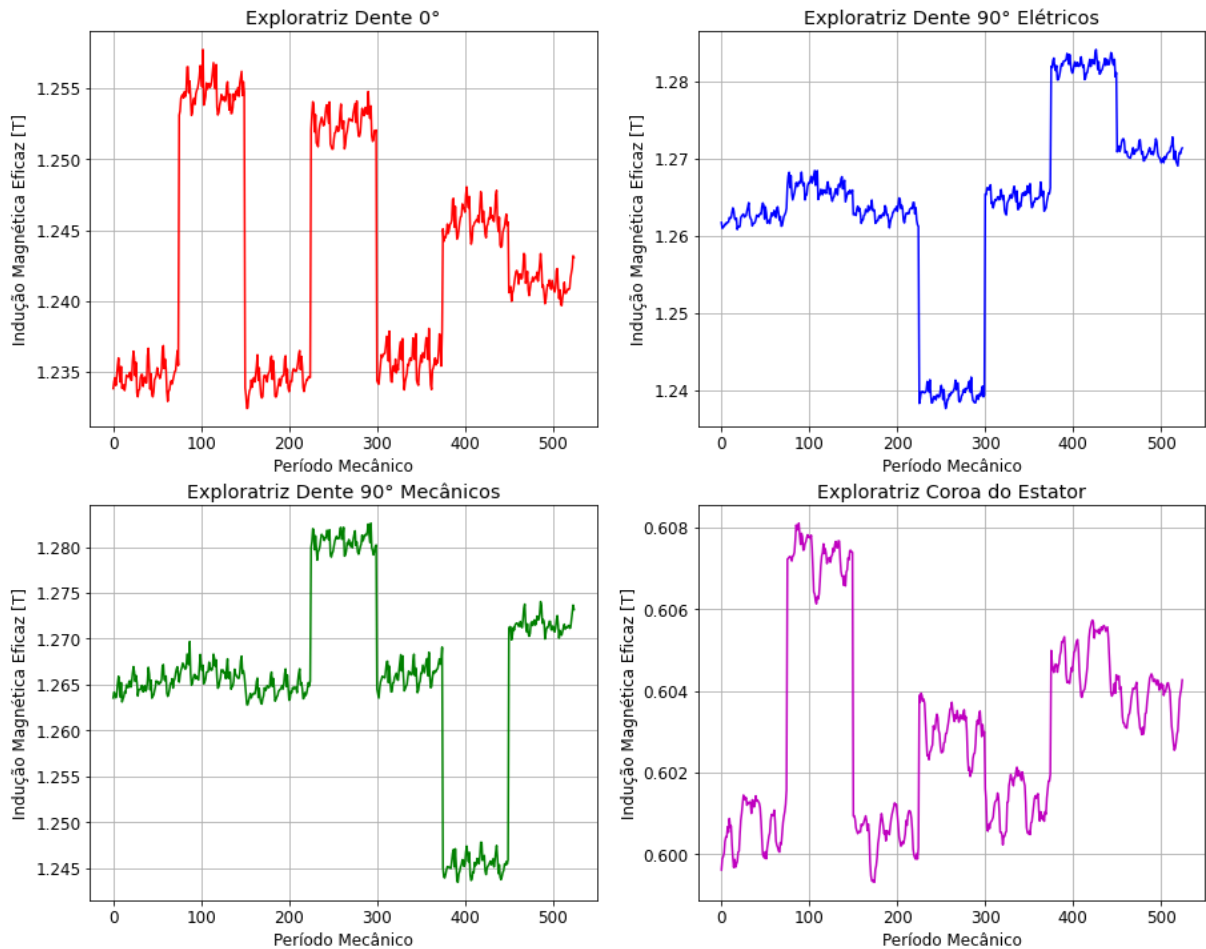


Fonte: Autor.

O valor de pico por polo não traz informação relevante para este tipo de falta, pois assim como comentado na seção 4.2.2, esse indicador é útil especialmente para detecção de faltas no rotor, justamente por evidenciar a indução do rotor sobre o estator da máquina.

Traçou-se o valor estimado da indução magnética RMS, para 75 períodos mecânicos, de cada estado da máquina. O resultado pode ser visualizado na Figura 52.

Figura 52 – Ensaio 2, valores da indução magnética RMS para as exploratrizes.

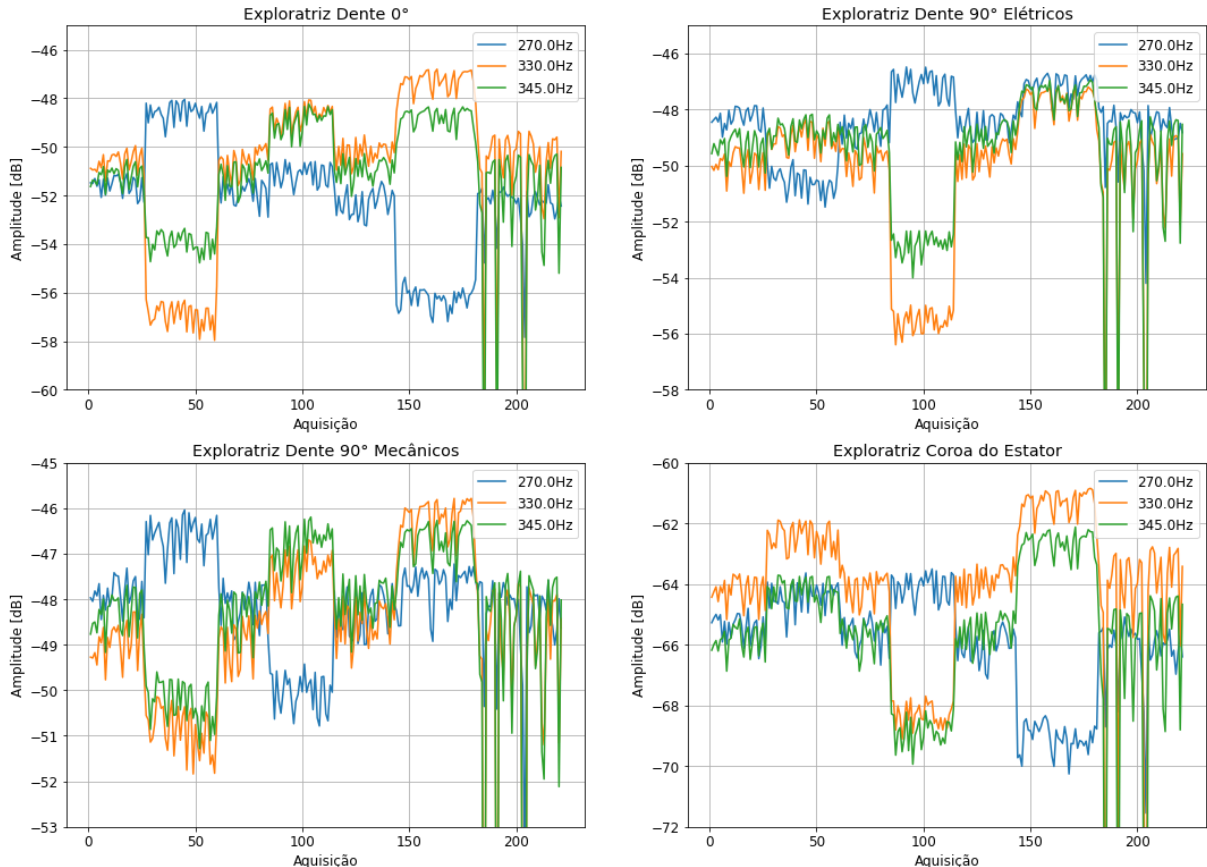


Fonte: Autor.

Dependendo da exploratriz e da fase sob falta, o valor eficaz da indução magnética aumenta, diminui ou não se altera, se comparado ao estado sadio. Em específico, as exploratrizes 90°E e 90°M apresentaram sinais muito similares, porém opostos. Esse comportamento está, provavelmente, atrelado ao posicionamento das exploratrizes em relação à posição dos enrolamentos sob falta. O resultado indica que a distribuição de vários sensores de entreferro pode auxiliar não só na detecção da falta, mas também na sua localização.

No histórico de amplitudes do domínio da frequência, observou-se alteração apenas nas componentes de 270 Hz, 330 Hz e 345 Hz. O histórico dessas três harmônicas, nas quatro exploratrizes, durante todo o ensaio é mostrado na Figura 53.

Figura 53 – Ensaio 2, histórico de amplitudes das exploratrizes.



Fonte: Autor.

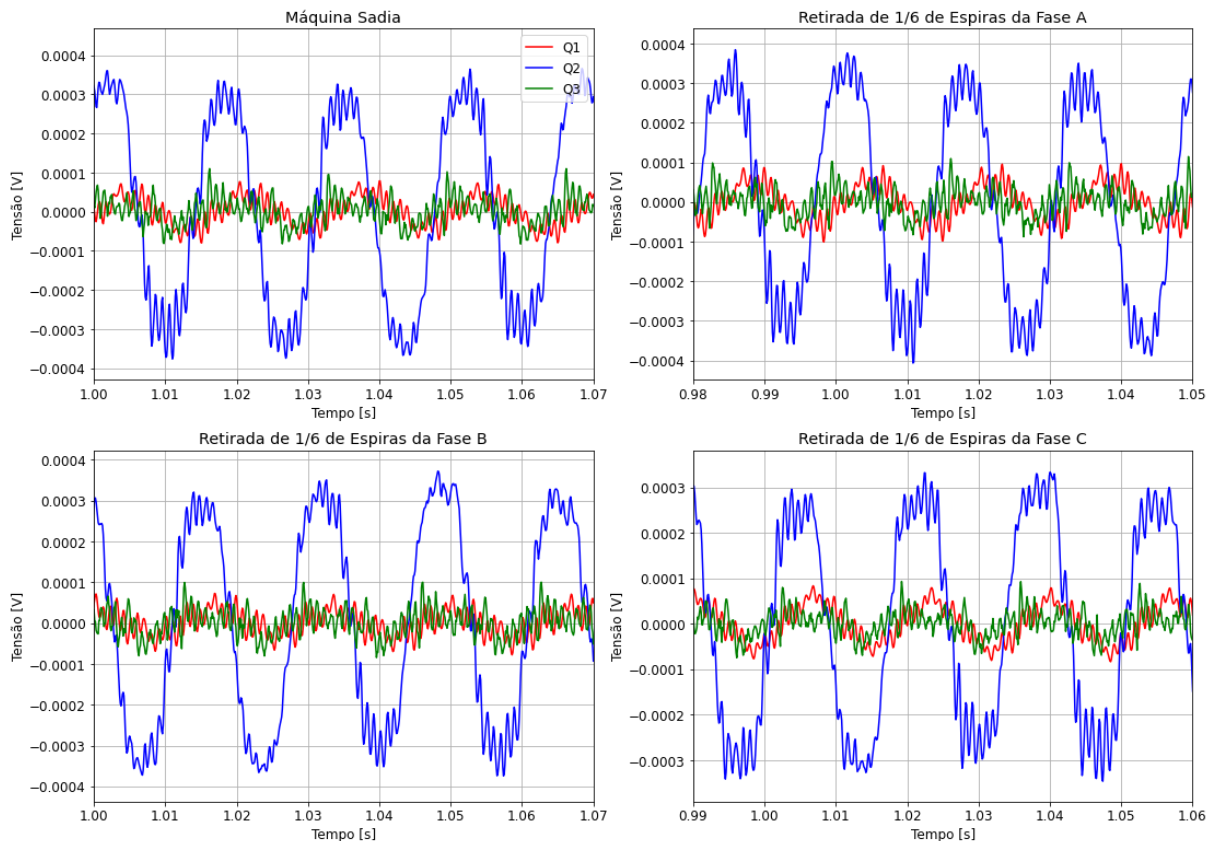
Assim como na indução magnética RMS, as componentes harmônicas apresentam comportamentos distintos dependendo da exploratriz e da fase sob falta. Além disso, a maior variação é cerca de 6 dB da componente 330 Hz da exploratriz 90°E, alteração essa muito menor se comparada a falta de rotor que apresentou alteração de 12 dB na componente de 15 Hz. É importante pontuar que essa falta não altera as componentes de baixa frequência, indicando que as faltas de rotor estão mais atreladas a porção de baixa frequência do espectro e as de estator a porção de alta frequência.

Juntado a informação provinda da indução magnética RMS e do histórico de amplitudes é possível visualizar as 6 transições de estado realizadas no gerador síncrono. Isso tudo mostra que é possível realizar a detecção, e talvez até a localização, dessa falta de estator através de sensores de entreferro.

## 6.2.2 Ensaio 2 – Sensores por Indução

Assim como feito anteriormente, a Figura 54 mostra um período mecânico dos sinais dos sensores de campo para a máquina sadia, sob falta na fase A, sob falta na fase B e sob falta na fase C.

Figura 54 – Ensaio 2, sinais dos sensores externos.



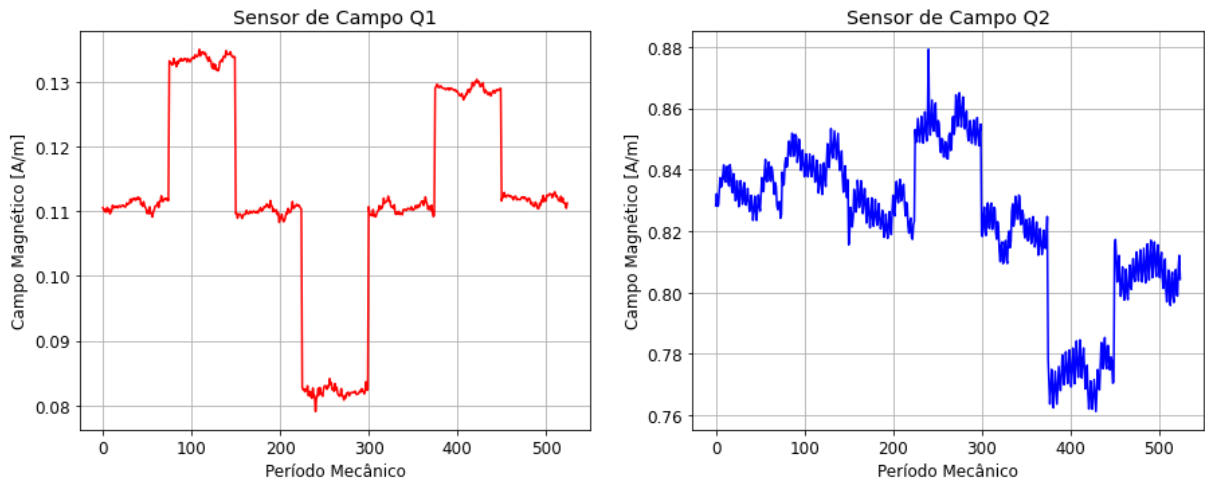
Fonte: Autor.

Visualmente não é possível notar diferença entre o estado sadio e sob falta, ainda mais pelo fato de que os sinais dos sensores externos possuem magnitude muito menor do que das exploratrizes, sendo mais suscetíveis a ruídos externos.

Traçou-se então o valor estimado do campo magnético eficaz para os sensores de campo Q1 e Q2, visto que o sensor de campo Q3 apresentava demasiado ruído, e o resultado pode ser visto na Figura 55.

Percebe-se um resultado similar ao das exploratrizes, ou seja, em diferentes sensores de campo sob falta em diferentes fases o valor RMS aumenta, diminui ou não se altera. Isso reforça mais uma vez que a distribuição de sensores na carcaça da máquina pode fornecer resultados tão bons quanto os dos sensores internos.

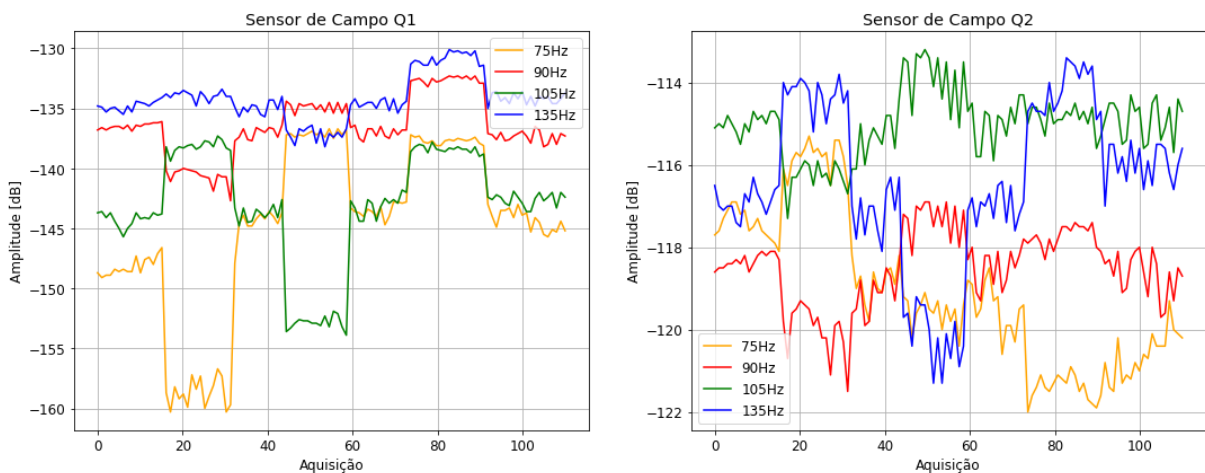
Figura 55 – Ensaio 2, valores do campo magnético RMS para os sensores de campo.



Fonte: Autor.

Diferentemente das exploratrizes, o histórico de amplitudes das componentes medidas pelos sensores de campo apresentou alteração significativa apenas nas frequências de 75 Hz, 90 Hz, 105 Hz e 135 Hz. O histórico dessas quatro componentes, para os sensores Q1 e Q2, é mostrado na Figura 56.

Figura 56 – Ensaio 2, histórico de amplitudes dos sensores de campo.



Fonte: Autor.

Observa-se que a componente de 75 Hz do sensor Q1 chega a variar quase 12 dB na ocorrência da falta sob a fase A, alteração essa muito maior do que qualquer outra obtida com exploratrizes. Contudo, o sensor de campo Q2 apresentou variações de aproximadamente 2 dB, o que indica que o posicionamento dos sensores externos é muito relevante para obtenção de bons resultados. Neste caso, percebeu-se que as componentes abaixo de 60 Hz não são sensibilizadas, e que as harmônicas alteradas nas exploratrizes não se alteraram neste caso.

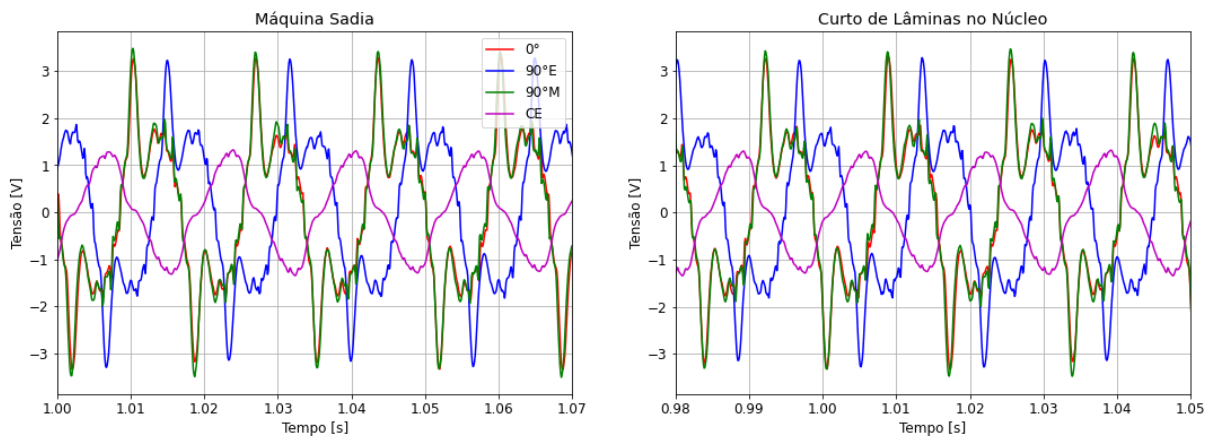
### 6.3 ENSAIO 3 – CURTO DE LÂMINAS NO NÚCLEO

Para o ensaio 3 o gerador foi deixado operando de forma sadia por um tempo e em seguida aplicou-se um curto em lâminas do núcleo do estator. Após um intervalo de tempo a falta foi retirada e a máquina foi deixada operando de forma sadia novamente.

#### 6.3.1 Ensaio 3 – Exploratrizes

A Figura 57 apresenta um período mecânico dos sinais medidos das exploratrizes com e sem a falta. Novamente não se percebe qualquer alteração visual do estado sadio para o estado sob falta.

Figura 57 – Ensaio 3, sinais das exploratrizes.

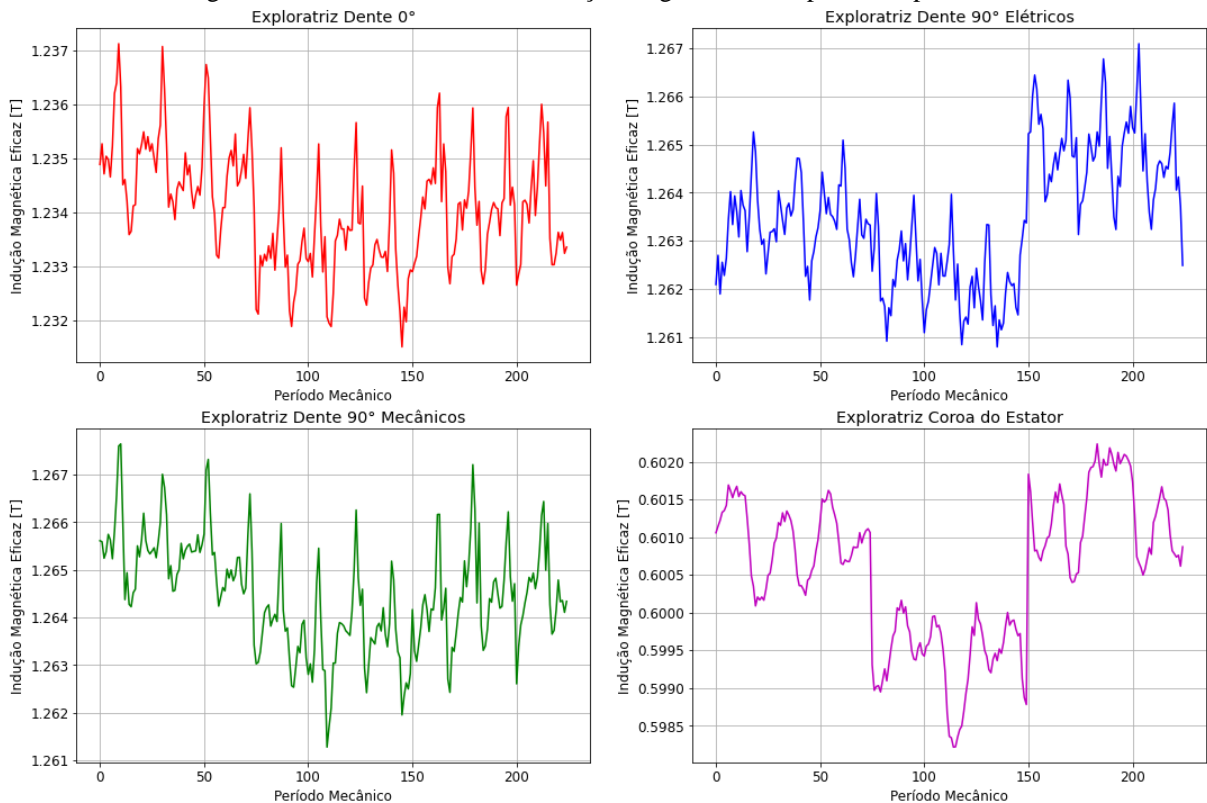


Fonte: Autor.

Para esse ensaio, traçaram-se os valores eficazes estimados da indução magnética e assim obteve-se a Figura 58, com 75 períodos mecânicos para cada um dos três estados da máquina (sadia, curto de lâminas, sadia).

Entre as 4 exploratrizes, a única que apresentou uma variação de patamar bem definido foi a Exploratriz Coroa do Estator, e ainda assim a alteração foi mínima. Analisando a Figura 31, a qual mostra o esquema de realização do curto de lâminas no núcleo, percebe-se que as lâminas curto-circuitadas situam-se na parte inferior da máquina, próximas da exploratriz CE. Esse é o provável motivo de essa exploratriz ser a mais sensibilizada.

Figura 58 – Ensaio 3, valores da indução magnética RMS para as exploratrizes.



Fonte: Autor.

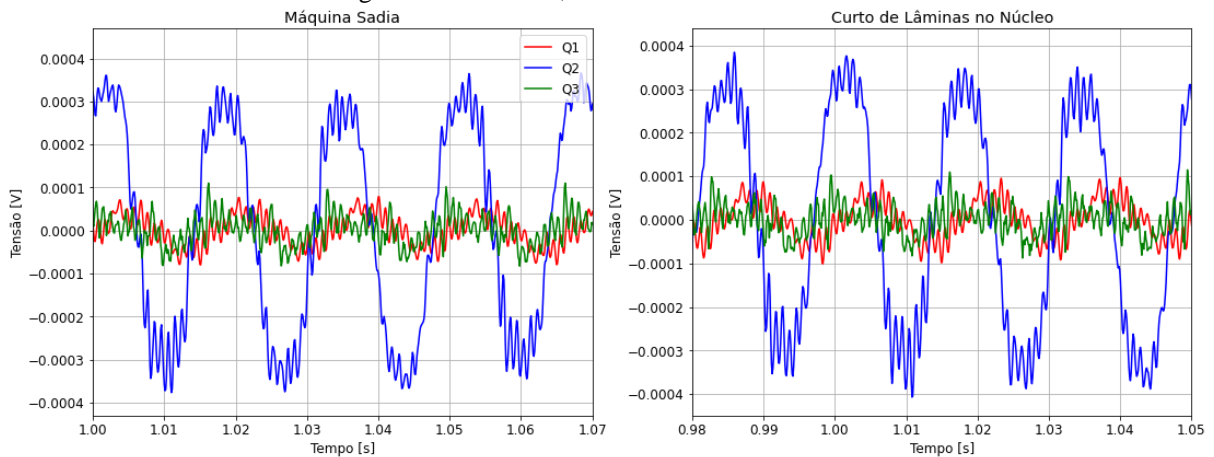
Analisou-se o histórico de amplitudes das exploratrizes até 2 kHz, e não se encontrou componente alguma que apresentasse uma alteração relacionada a inserção da falta. Os resultados obtidos mostram que a detecção deste tipo de falta é difícil para os sensores de entreferro escolhidos.

### 6.3.2 Ensaio 3 – Sensores por Indução

Um período mecânico dos sinais medidos pelos sensores de campo alojados na carcaça do gerador, para o estado com e sem falta, é apresentado na Figura 59. Assim como nas exploratrizes e para a outra falta de estator, não se percebe alteração alguma entre os picos do sinal no domínio do tempo, além do ruído aleatório.

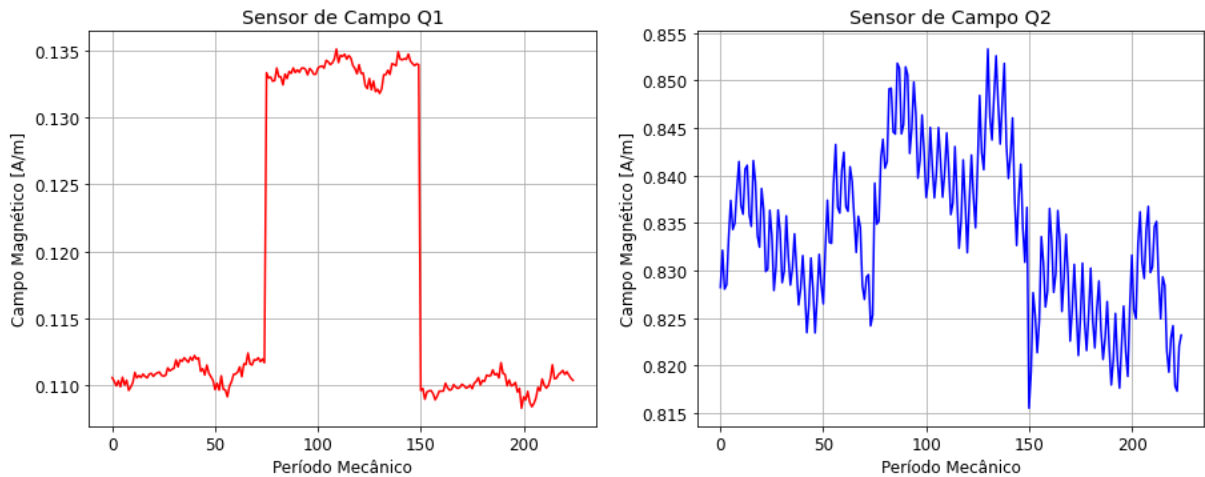
Traçaram-se também os valores estimados do campo magnético RMS para os sensores de campo Q1 e Q2. O resultado pode ser visualizado na Figura 60.

Figura 59 – Ensaio 3, sinais dos sensores externos.



Fonte: Autor.

Figura 60 – Ensaio 3, valores do campo magnético RMS para os sensores de campo.

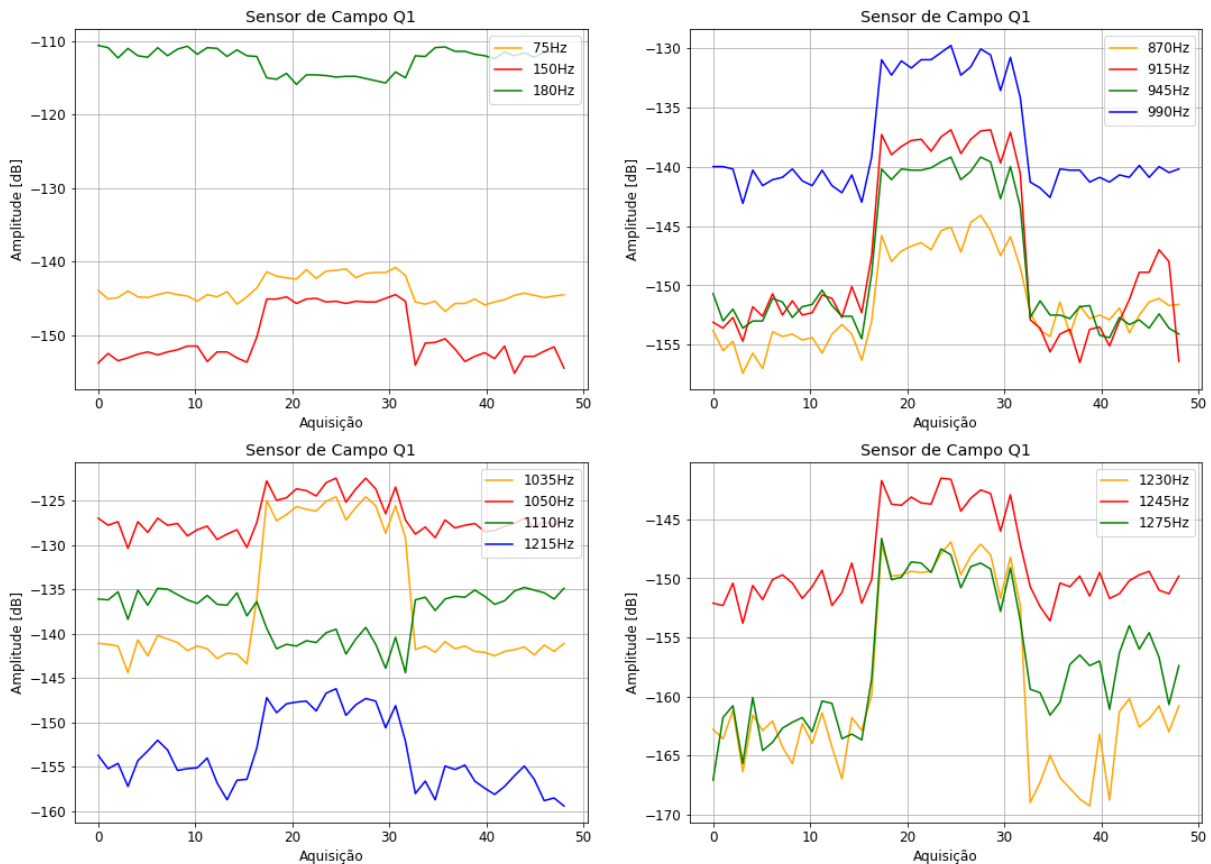


Fonte: Autor.

Neste caso, o sensor de campo Q1 mostrou um resultado extremamente positivo, pois é possível visualizar perfeitamente o momento de imposição e retirada da falta, algo que não foi possível, com facilidade, na exploratriz CE. Vê-se, contudo, que o sensor de campo Q2 não apresenta uma variação relacionada com a imposição da falta. Atribui-se essa maior variação ao sensor de campo Q1 ao fato de que o mesmo está mais próximo do local do curto, assim como a exploratriz CE.

Em relação ao histórico de amplitudes, apenas o sensor Q1 apresentou alterações. As componentes sensibilizadas situam-se, principalmente, entre 850 Hz e 1300 Hz. Há também pequenas alterações em algumas componentes localizadas na baixa frequência. A Figura 61 mostra algumas componentes sensibilizadas no sensor de campo Q1.

Figura 61 – Ensaio 3, histórico de amplitudes dos sensores de campo.



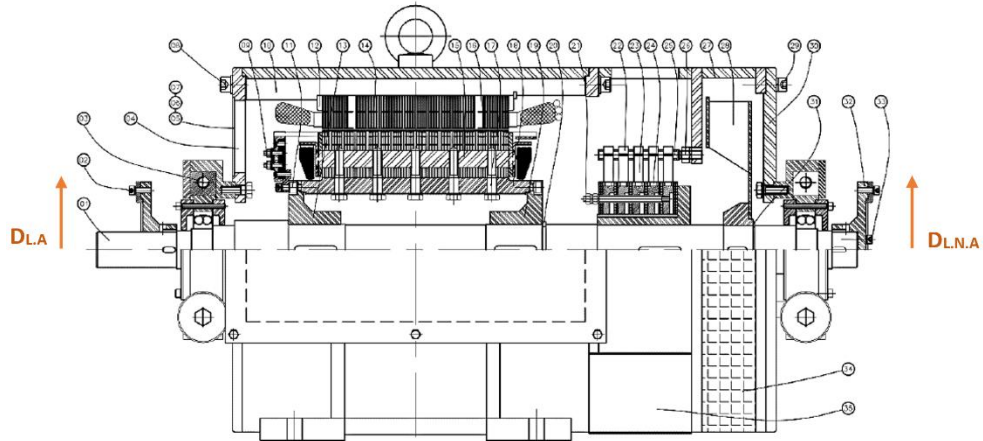
Fonte: Autor.

Se comparados aos sensores de entreferro, os sensores de campo externo obtiveram resultados aprimorados, tanto em indicadores no domínio do tempo quanto no domínio da frequência. Contudo, ressalta-se que o bom posicionamento desse tipo de sensor é essencial.

#### 6.4 ENSAIO 4 – DESLOCAMENTO DE EIXO

O deslocamento de eixo foi o único ensaio que necessitou da parada da máquina para realizar a sua imposição. O eixo pode ser deslocado tanto para baixo quanto para cima, isso para o lado acoplado e para o lado não acoplado. A Figura 62 mostra um esquema de referência para as distâncias de deslocamento. Neste caso, uma distância negativa implica que o mancal deslizante foi deslocado para baixo, já uma distância positiva, o deslocamento é para cima, o caso nulo implica na máquina alinhada. Neste ensaio foi aplicado um deslocamento de -0,5 mm no lado acoplado ( $D_{L.A}$ ) e -1 mm para o lado não acoplado ( $D_{L.N.A}$ ). Tentou-se colocar a máquina no mesmo ponto de operação de 6 kVA e fator de potência de 0,8 indutivo dos outros ensaios. Realizaram-se análises para as exploratrizes e para os sensores de campo externo.

Figura 62 – Esquema de referência para o deslocamento de eixo.

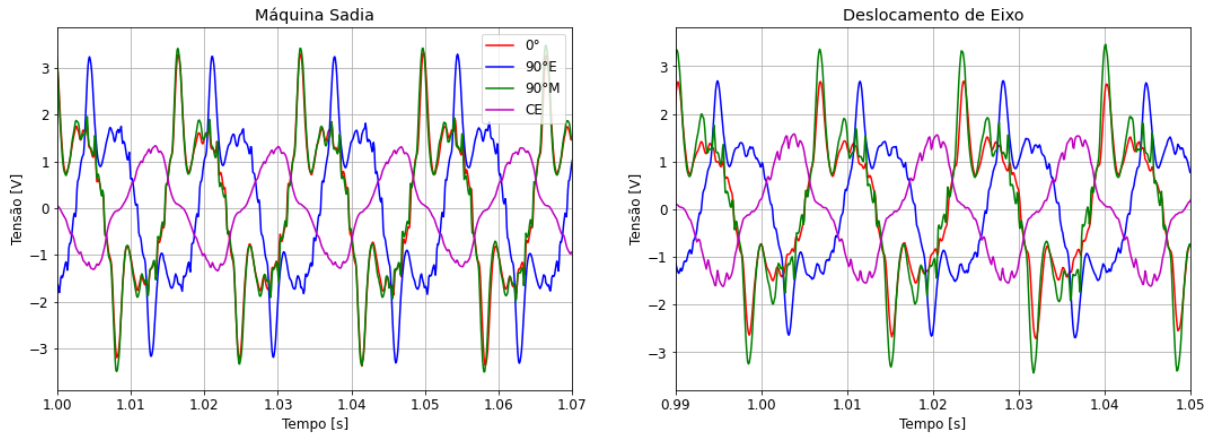


Fonte: Autor.

#### 6.4.1 Ensaio 4 – Exploratrizes

A Figura 63 mostra um período mecânico, antes e depois da falta, para as quatro exploratrizes. É possível observar que a tensão induzida nas exploratrizes  $0^\circ$  e  $90^\circ E$  é menor com o deslocamento de eixo, já que o entreferro visto por esses sensores é maior do que no caso sadio. Ocorre o contrário na exploratriz CE, já que o entreferro se torna menor.

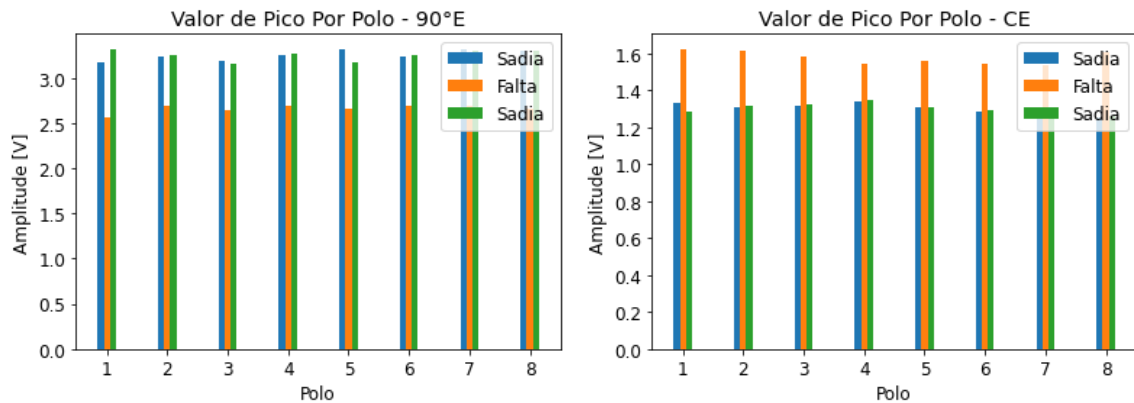
Figura 63 – Ensaio 4, sinais das exploratrizes.



Fonte: Autor.

Em seguida, montou-se o gráfico de barras do valor de pico por polo para as exploratrizes  $90^\circ E$  e CE, o qual é mostrado na Figura 64. Esse gráfico de barras confirma o exposto anteriormente, o sensor  $90^\circ E$  possui menos indução durante a falta, já o sensor CE tem maior indução nessa condição.

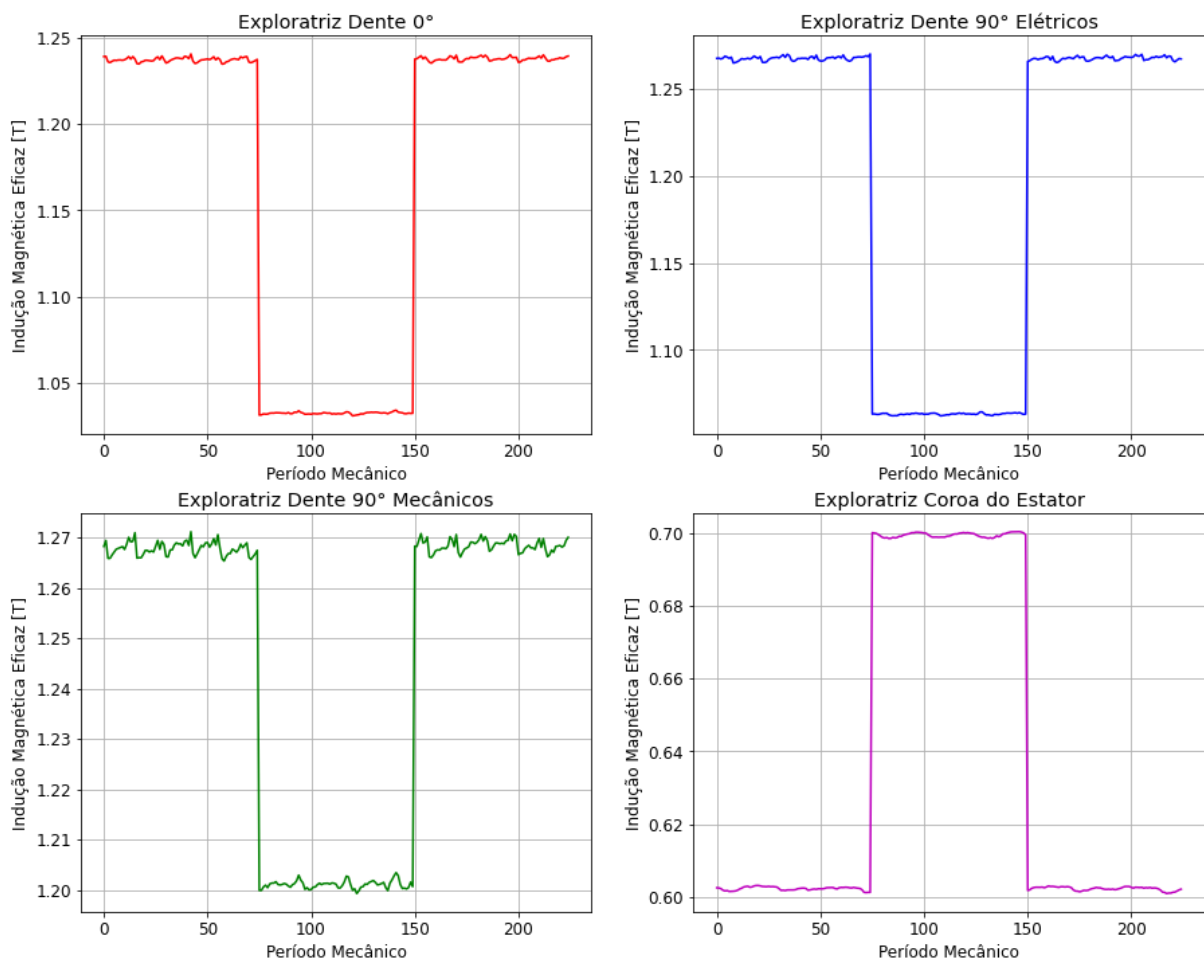
Figura 64 – Ensaio 4, valores de pico da exploratriz 90°E e CE.



Fonte: Autor.

Utilizando 75 períodos mecânicos em cada estado, traçou-se o valor da indução magnética eficaz para as quatro exploratrizes, o resultado pode ser visto na Figura 65.

Figura 65 – Ensaio 4, valores da indução magnética RMS para as exploratrizes.

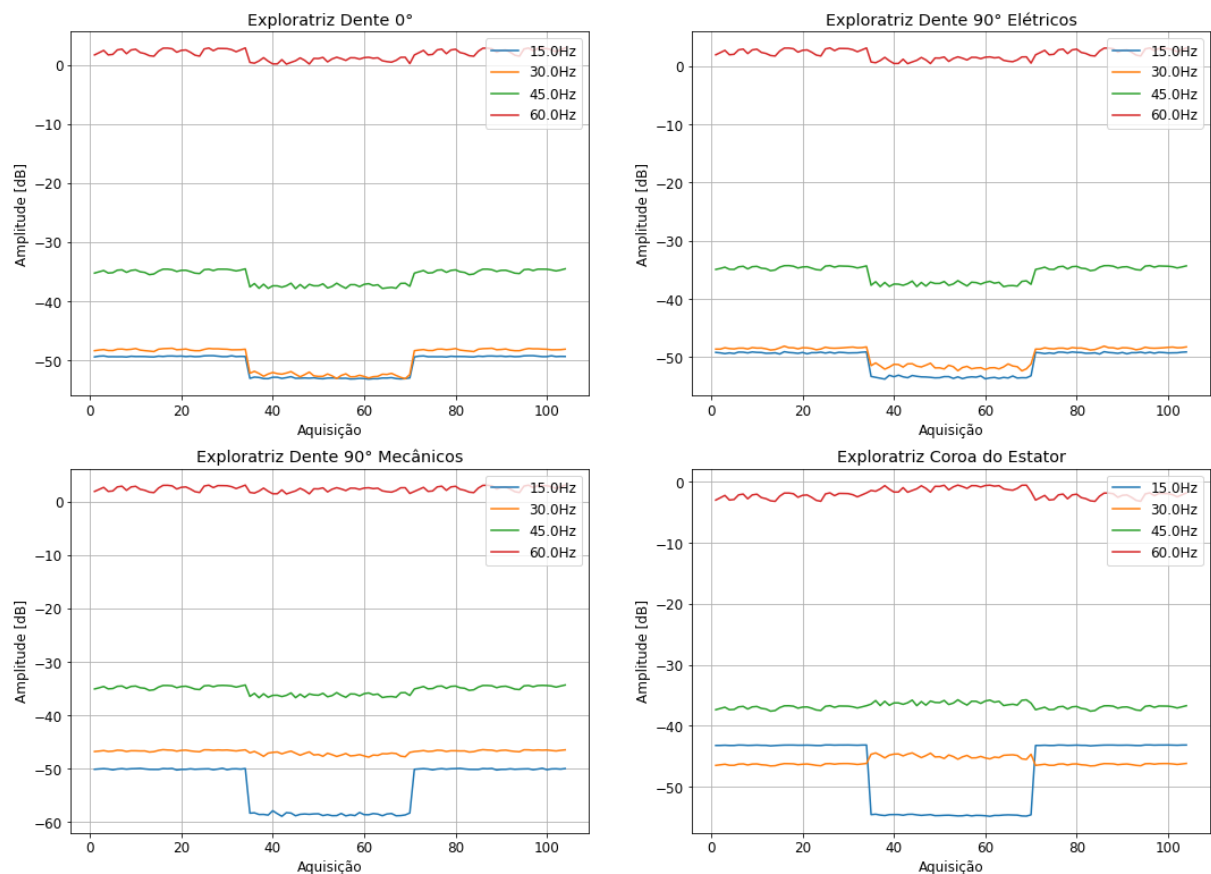


Fonte: Autor.

Nota-se que as exploratrizes  $0^\circ$ ,  $90^\circ\text{E}$  e  $90^\circ\text{M}$  tiveram redução da tensão induzida, fruto do maior entreferro, já a exploratriz CE teve aumento da sua tensão induzida, devido ao menor entreferro. No caso da exploratriz  $90^\circ\text{M}$  a redução foi menor, visto que está posicionada a  $90^\circ$  em relação ao eixo de deslocamento, sendo então menos afetada.

Em relação ao histórico de amplitudes, verificaram-se maiores variações nas redondezas da frequência fundamental mecânica, isso para todas as exploratrizes medidas. O histórico das componentes de 15 Hz, 30 Hz, 45 Hz e 60Hz é mostrado na Figura 66.

Figura 66 – Ensaio 4, histórico de amplitudes das exploratrizes.



Fonte: Autor.

Percebe-se que, ao contrário da falta de retirada de espiras de um polo do rotor, as componentes de 15 Hz, 30 Hz e 45 Hz diminuem sua amplitude durante a falta. Essa redução é maior do que 10 dB para a exploratriz CE. Além disso, a sensibilização ocorre principalmente nas frequências abaixo de 60 Hz, já para a falta de retirada de espiras do rotor viram-se alterações até 180 Hz.

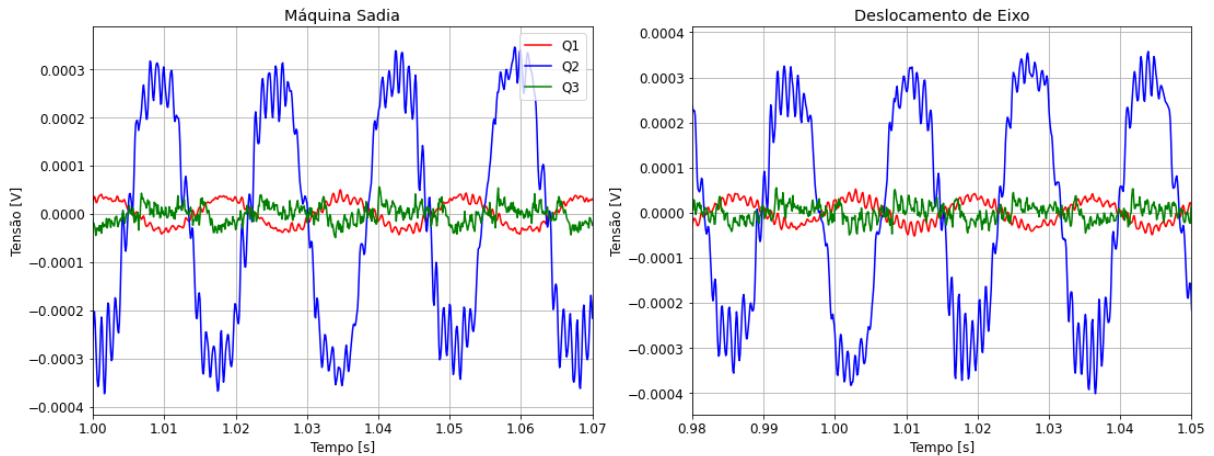
É possível diferenciar o deslocamento de eixo da retirada de espiras de um polo do rotor, principalmente, através do valor de pico por polo. No caso do deslocamento de eixo todos

os polos são afetados, já que há aumento, ou diminuição, do tamanho do entreferro. No caso da retirada de espiras de um polo, há somente um polo afetado, visto a baixa indução que esse polo exerce sobre os sensores.

#### 6.4.2 Ensaio 4 – Sensores por Indução

Um período mecânico, antes e depois da falta, para os três sensores de campo magnético por indução externos é mostrado na Figura 67. Neste caso, nota-se que visualmente não é possível ver diferença entre o estado sadio e o estado sob falta.

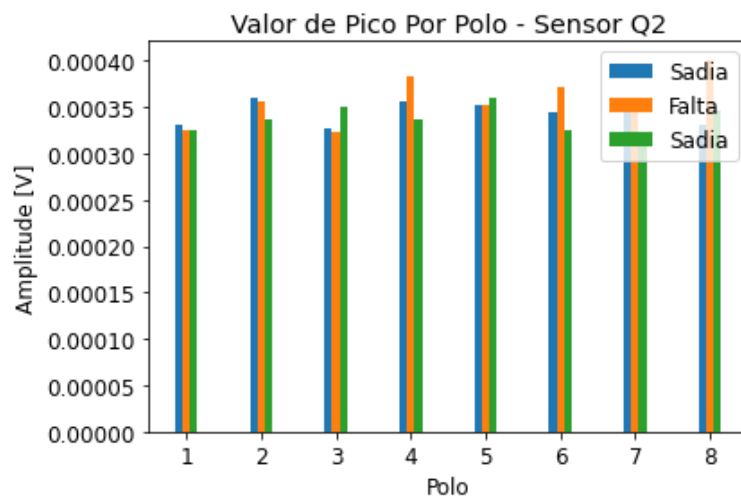
Figura 67 – Ensaio 4, sinais dos sensores externos.



Fonte: Autor.

O gráfico de barras do valor de pico por polo para o sensor Q2 é dado pela Figura 68.

Figura 68 – Ensaio 4, valores de pico do sensor de campo Q2.

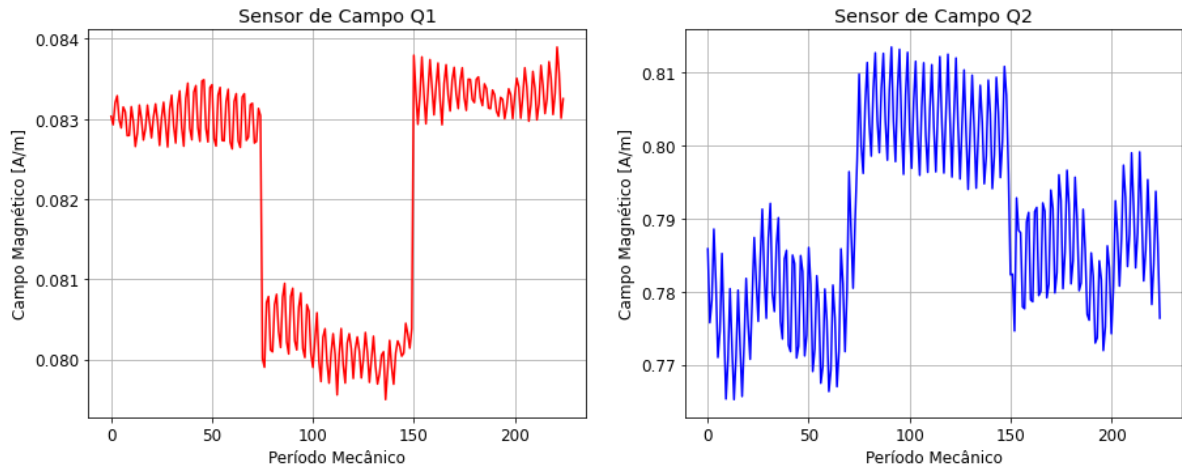


Fonte: Autor.

Não se vê diferença significativa entre o estado sem falta e com falta, para este indicador, com os sensores de campo externo. O resultado repete-se para o sensor de campo Q1.

Traçou-se também o valor eficaz do campo magnético externo com 75 períodos mecânicos para cada estado, o resultado é exposto na Figura 69.

Figura 69 – Ensaio 4, valores do campo magnético RMS para os sensores de campo.

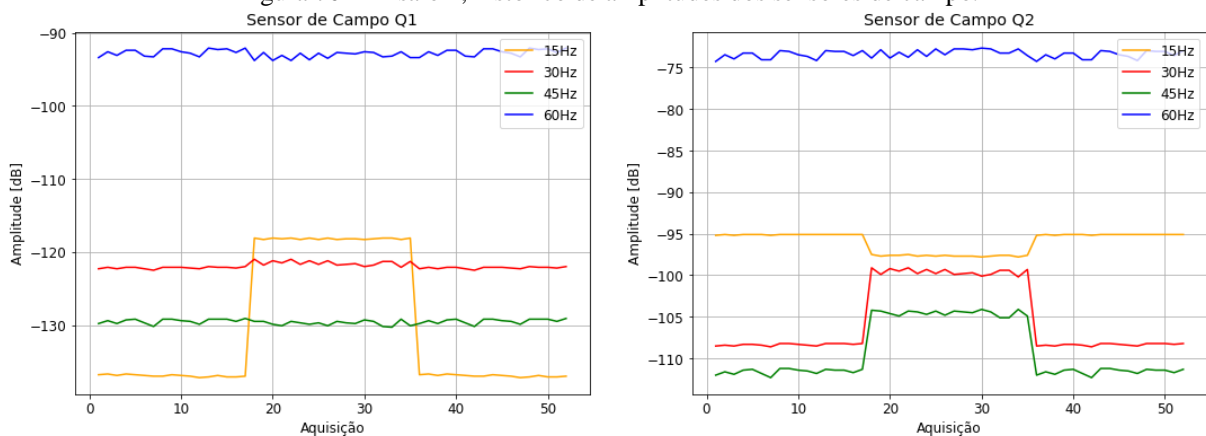


Fonte: Autor.

Nota-se que há redução do campo magnético eficaz no sensor de campo Q1 e aumento no sensor de campo Q2. Este resultado está provavelmente atrelado ao fato de que o entreferro se torna menor na região do sensor Q1, ou seja, o campo magnético tende a vazar menos pela carcaça do gerador. O resultado é completamente oposto no sensor Q2, já que nessa região o entreferro aumenta.

A Figura 70 fornece o histórico de amplitudes das componentes 15 Hz, 30 Hz, 45 Hz e 60 Hz para os sensores de campo Q1 e Q2.

Figura 70 – Ensaio 4, histórico de amplitudes dos sensores de campo.



Fonte: Autor.

Observa-se que no sensor de campo Q1 houve um grande aumento da componente de 15 Hz, todavia nenhuma outra componente apresentou alteração significativa. Já no sensor de campo Q2 houve uma pequena variação da harmônica de 15 Hz e, neste caso, as componentes de 30 Hz e 45 Hz foram sensibilizadas.

## 7 CONCLUSÃO

O principal objetivo deste trabalho foi realizar um estudo de desempenho entre sensores de entreferro e sensores de campo externo no contexto da detecção de faltas incipientes em geradores síncronos. Em todas as faltas testadas em bancada, ao menos um sensor externo foi capaz de detectar alterações na operação da máquina, seja através de indicadores no domínio do tempo ou no domínio da frequência.

Para faltas no rotor, isto é, de retirada de espiras de um polo e deslocamento de eixo, observou-se que as variações no espectro em frequência ocorrem, majoritariamente, nas redondezas da frequência fundamental mecânica do gerador. Os indicadores no domínio do tempo mostraram resultados aprimorados nos sensores de entreferro, principalmente o valor de pico por polo que permite diferenciar os dois tipos de falta. Esses indicadores, para os sensores de campo externo, permitem auxiliar na detecção de faltas pelo histórico de amplitudes e também na interpretação de suas naturezas.

Nas faltas de estator, com retirada de espiras e curto de lâminas, notou-se que a análise do espectro em frequência para os sensores de entreferro fornece resultados inferiores aos dos sensores de campo externo. Observou-se que nestes tipos de faltas o espectro em frequência é pouco sensibilizado na região de baixa frequência para ambos os tipos de sensores. Para a falta de curto de lâminas, o espectro do sinal dos sensores de campo foi sensibilizado entre 850 Hz e 1300 Hz. Já para a retirada de espiras de um polo do estator, a alteração ocorreu nas redondezas da segunda harmônica elétrica (120 Hz). No caso dos sensores de entreferro, a falta de retirada de espiras sensibilizou as componentes 270 Hz, 330 Hz e 345 Hz. A falta de curto de lâminas do núcleo não sensibilizou componente alguma analisada no caso dos sensores de entreferro. Notou-se também que a distribuição dos sensores é de suma importância para a detecção de faltas no estator, ainda mais caso se queira detectar a sua natureza. Os indicadores no tempo mostraram resultados inferiores para faltas no estator se comparados aos de rotor, contudo ainda podem auxiliar na detecção para ambos os tipos de sensores.

Com os resultados obtidos para diferentes faltas é possível a criação de uma metodologia para diferenciação das faltas detectadas. Por exemplo, se há alteração das componentes próximas da fundamental mecânica é bastante provável que a falta seja de rotor. Se aliado a isso o valor de pico por polo for alterado em todos os polos, é provável que esteja atrelado a um desbalanceamento ou deslocamento de eixo, caso contrário o problema pode estar atrelado a um curto de espiras ou outro problema em um polo. Se o espectro é alterado em mais

alta frequência, a probabilidade é maior que a falta esteja no estator e então é necessário avaliar os sensores distribuídos na máquina para estimar sua provável localização.

Ao fim do trabalho pontuou-se que os sensores de campo externo podem realizar a detecção de faltas incipientes em geradores síncronos tão bem quanto os sensores de entreferro. Esse aspecto é muito positivo, pois os sensores com medição de campo magnético externo não são invasivos, o que caracteriza uma vantagem muito grande em relação aos sensores de entreferro, os quais necessitam, muitas vezes, da desmontagem de partes do gerador para a sua instalação.

O presente trabalho desenvolveu soluções que constituem uma parcela do desenvolvimento do equipamento não invasivo do projeto regulamentado pela ANEEL e desenvolvido no contexto do programa de P&D da ENGIE Brasil Energia, o que evidencia a proximidade entre a academia e a indústria.

Para trabalhos futuros, sugere-se a realização de ensaios de repetibilidade para verificar se as componentes alteradas são sempre as mesmas, ou, pelo menos, próximas. Além disso, é preciso avaliar o impacto do ponto de operação da máquina na sua assinatura magnética, pois é esperado que os valores de campo magnético se alterem com o aumento, ou redução, da potência fornecida pelo gerador.

## REFERÊNCIAS

- RIGONI, M. **Desenvolvimento de um sistema de detecção e avaliação de faltas em geradores síncronos por meio do campo magnético externo.** Tese de doutorado, UFSC, 2014.
- NADARAJAN, S. et al. **Vibration signature analysis of stator winding fault diagnosis in brushless synchronous generators.** IEEE International Transportation Electrification Conference (ITEC), Chennai, 2015, pp. 1-6.
- YADAIHAH, N. et al. **A new protection algorithm for synchronous generators using artificial neural networks.** 11th International Conference on Hybrid Intelligent Systems (HIS), Melacca, 2011, pp. 625-629.
- THOMSON, W. **A review of on-line condition monitoring techniques for three-phase squirrel-cage induction motors-past, present and future.** vol. 99, 1999.
- CUNHA, C. C. M. **Modelagem, análise e detecção de assimetrias de rotor em máquinas de indução.** 2006.
- SPROOTEN, J. **Finite element and electrical circuit modelling of faulty induction machines - study of internal effects and fault detection techniques.** 2007.
- HENAO, H. et al. **Flux signature analysis: an alternative method for the fault diagnosis of induction machines.** 2005.
- DOS SANTOS, T. L. **Desenvolvimento de um sistema embarcado para medição de corrente.** Dissertação de mestrado UFSC, 2010.
- EQUACIONAL ELÉTRICA E MECÂNICA. **Manual geral de instruções: Grupo gerador especial,** 2014.
- ROBERT, R. **Bobina de Helmholtz.** Revista Brasileira de Ensino de Física volume 25 no.1 São Paulo, 2003.
- RIGONI, M. **Sensores de campo magnético por indução desenvolvimento e aplicações.** Dissertação de mestrado, UFSC, 2009.
- DOS SANTOS, H. F. **Desenvolvimento de um equipamento para monitoração de geradores síncronos através do campo magnético externo.** Dissertação de mestrado, UFSC, 2016.
- HESSMANN, G. P. **Sistema automatizado para imposição de faltas em uma máquina síncrona modificada.** Trabalho de conclusão de curso, UFSC, 2018.
- BRESCOVITT, A. H. **Desenvolvimento de software para integração de instrumentos e aquisição de dados em bancada de testes de motores de indução.** Trabalho de conclusão de curso, UFSC, 2020.

DOS SANTOS, H. F. et al. **Non-invasive monitoring system of synchronous generator using external field**. Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications, Vol. 16, No. 1, March 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/2179-10742017v16i1872>

FITZGERALD, A. E., KINGSLEY Jr., UMANS S. D. **Máquinas Elétricas**. Porto Alegre, Editora McGraw-Hill, 7ª edição, 2014.

IRIS POWER. **ROTOR FLUX MONITORING (SYNCHRONOUS MACHINES)**.

Disponível em: <https://irispower.com/monitoring/rotor-flux-monitoring/?assetId=73>

<https://irispower.com/monitoring/mechanical-vibration-monitoring/?assetId=73>

Acesso em: 04/05/2021

VIBROSYSTEM. **Complete Monitoring Solutions**.

Disponível em: <https://www.vibrosystem.com/en/industry/hydro/info>

Acesso em: 04/05/2021

BASTOS, J. P. A. **Eletromagnetismo para engenharia estática e quase estática**. 3a Edição. Editora UFSC, 2008.

NATIONAL INSTRUMENTS. **NI 6361 Device Specifications**.

Disponível em: <https://www.ni.com/pdf/manuals/374650c.pdf>

Acesso em: 05/05/2021

**Certificado de Conclusão**

Identificação de envelope: 00E2D422A52D41F5852139DF417C2F9F

Status: Concluído

Assunto: DocuSign: TCC - Luciano B. Antunes.pdf

Envelope fonte:

Documentar páginas: 86

Assinaturas: 1

Certificar páginas: 1

Rubrica: 0

Assinatura guiada: Desativado

Selo com Envelopeld (ID do envelope): Desativado

Fuso horário: (UTC-03:00) Brasília

Remetente do envelope:

Rubens Nascimento

Rua Paschoal Apóstolo Pitsica, 5064 - Agronômica

FLORIANOPOLIS, SC 88020010

rubens.nascimento@engie.com

Endereço IP: 186.222.35.102

**Rastreamento de registros**

Status: Original

Portador: Rubens Nascimento

Local: DocuSign

21/05/2021 18:34:04

rubens.nascimento@engie.com

**Eventos do signatário**

Rubens Nascimento

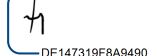
rubens.nascimento@engie.com

ENGIE BRASIL ENERGIA S.A

Nível de segurança: E-mail, Autenticação da conta (Nenhuma)

**Assinatura**

DocuSigned by:



DE147319F8A9490...

Adoção de assinatura: Desenhado no dispositivo

Usando endereço IP: 147.161.129.111

**Registro de hora e data**

Enviado: 21/05/2021 18:35:38

Visualizado: 21/05/2021 18:35:49

Assinado: 21/05/2021 18:39:54

Assinatura de forma livre

**Termos de Assinatura e Registro Eletrônico:**

Não disponível através da DocuSign

**Eventos do signatário presencial****Assinatura****Registro de hora e data****Eventos de entrega do editor****Status****Registro de hora e data****Evento de entrega do agente****Status****Registro de hora e data****Eventos de entrega intermediários****Status****Registro de hora e data****Eventos de entrega certificados****Status****Registro de hora e data****Eventos de cópia****Status****Registro de hora e data**

Luciano bortoloto antunes

**Copiado**

Enviado: 21/05/2021 18:39:58

lucianobantunes@gmail.com

Visualizado: 21/05/2021 18:41:42

Nível de segurança: E-mail, Autenticação da conta (Nenhuma)

**Termos de Assinatura e Registro Eletrônico:**

Não disponível através da DocuSign

**Eventos com testemunhas****Assinatura****Registro de hora e data****Eventos do tabelião****Assinatura****Registro de hora e data****Eventos de resumo do envelope****Status****Carimbo de data/hora**

Envelope enviado

Com hash/criptografado

21/05/2021 18:35:38

Entrega certificada

Segurança verificada

21/05/2021 18:35:49

Assinatura concluída

Segurança verificada

21/05/2021 18:39:54

Concluído

Segurança verificada

21/05/2021 18:39:58

**Eventos de pagamento****Status****Carimbo de data/hora**