



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TECNOLÓGICO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E ELETRÔNICA  
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

Vinícius José Martin Nascimento

**Implementação de um sistema de imposição de faltas progressivas em um gerador síncrono.**

Florianópolis  
2025

Vinícius José Martin Nascimento

**Implementação de um sistema de imposição de faltas progressivas em um gerador síncrono.**

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

Orientador: Prof. Nelson Jhoe Batistela, Dr.  
Coorientador: Eng. Cristian Franzoi Mazzola, M. Sc.

Florianópolis

2025

Nascimento, Vinícius José Martin

Implementação de um sistema de imposição de faltas progressivas em um gerador síncrono. / Vinícius José Martin Nascimento ; orientador, Nelson Jhoe Batistela, coorientador, Cristian Franzoi Mazzola, 2025.

69 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Graduação em Engenharia Elétrica, Florianópolis, 2025.

Inclui referências.

1. Engenharia Elétrica. 2. faltas incipientes. 3. gerador síncrono. 4. ensaios em geradores. I. Batistela, Nelson Jhoe. II. Mazzola, Cristian Franzoi. III. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia Elétrica. IV. Título.

Vinícius José Martin Nascimento

**Implementação de um sistema de imposição de faltas progressivas em um gerador síncrono.**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de bacharel em Engenharia Elétrica e aprovado em sua forma final pelo Curso de Engenharia Elétrica.

Florianópolis, 04 de fevereiro de 2025.

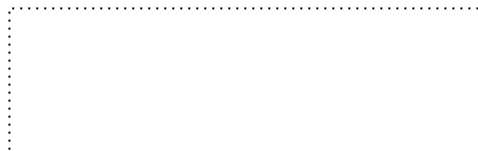


Prof. Miguel Moreto, Dr.  
Coordenação do Curso

**Banca examinadora**



Prof. Nelson Jhoe Batistela, Dr.  
Orientador(a)



Prof. Walter Pereira Carpes Júnior, Dr.  
Universidade Federal de Santa Catarina



Eng. Luis Otavio Steffenmunsberg Grillo, Dr  
Universidade Federal de Santa Catarina

Florianópolis, 2025.

Dedico este trabalho a todos os meus colegas e familiares que me acompanharam ao longo de toda a minha jornada acadêmica.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente aos meus pais, que sempre me apoiaram ao longo da minha vida, e aos meus irmãos, que estiveram ao meu lado, auxiliando em tudo que foi possível.

Ao meu orientador, professor Nelson Jhoe Batistela, que me acolheu e orientou não apenas neste TCC, mas ao longo de toda a minha graduação, e também ao meu coorientador, Cristian Franzoi Mazzola, que me acompanhou durante toda a graduação, especialmente neste trabalho.

Aos meus amigos e colegas, que foram um grande apoio em momentos importantes e difíceis da minha vida, principalmente aos companheiros do LAESP e GRUCAD, que compartilharam comigo muito conhecimento e bons momentos.

Às empresas Engie Brasil Energia, Itá Energética S.A. e AQTech Engenharia e Instrumentação S.A. pelo suporte técnico e financeiro por meio do projeto PD-00403-0048/2019, que viabilizou parte da pesquisa.

Por fim, agradeço a todos os meus professores, desde a alfabetização até o final da graduação, que sempre demonstraram paciência e experiência para transmitir grande parte do conhecimento que possuo, contribuindo para minha formação como cidadão.

**[DA VINCI, Leonardo.** O conhecimento nasce da observação atenta e da análise crítica. [s.d.].

## RESUMO

Este trabalho apresenta o desenvolvimento e a implementação de um sistema de imposição de faltas progressivas em um gerador síncrono. Esse sistema procura emular situações reais de faltas em geradores, auxiliando em ensaios investigativos com imposição de defeitos controlados. O trabalho também contém um estudo de base teórica. Primeiramente, foram estudados aspectos de interferência magnética, pois havia dúvida sobre a necessidade de aplicação de blindagem eletromagnética no sistema. Apresenta-se também um estudo breve sobre os sensores de campo magnético empregados em máquinas síncronas. Além disso, aborda métodos de detecção de anomalias em geradores. O sistema aplica a falta no circuito do rotor da máquina, utilizando uma resistência variável em paralelo com um dos polos. Quando essa resistência diminui, menos corrente passa pelo enrolamento do polo do campo do gerador, reduzindo sua força magnetomotriz. Após os estudos e o desenvolvimento do trabalho, foram realizados ensaios com imposição de defeitos na bancada do GRUCAD/EEL/UFSC. O sistema desenvolvido demonstrou robustez e eficácia, permitindo a imposição de diversos níveis de falta de maneira controlada. A partir dos dados de campo magnético obtidos pelos sensores nos ensaios, foi possível identificar a ocorrência de faltas em diversos momentos, validando o método e destacando sua aplicabilidade no diagnóstico e monitoramento de geradores síncronos. Os resultados obtidos reforçam a importância deste sistema para estudos futuros e para o desenvolvimento de técnicas precisas de diagnóstico e monitoramento de geradores síncronos.

**Palavras-chave:** faltas incipientes; gerador síncrono; ensaios em geradores.



## ABSTRACT

This work presents the development and implementation of a system for imposing progressive faults in a synchronous generator. This system aims to emulate real fault situations in generators, supporting investigative testing with controlled defect imposition. The work also includes a theoretical foundation study. Initially, aspects of magnetic interference were studied, as there was uncertainty about the need for electromagnetic shielding in the system. A brief study of the magnetic field sensors used and synchronous machines is also presented. Methods for anomaly detection in generators are addressed. The system applies faults to the rotor circuit of the machine by using a variable resistor in parallel with one of the poles. As this resistance decreases, less current flows through the generator field pole winding, reducing its magnetomotive force. After the studies and development of the work, tests with fault imposition were carried out at the GRUCAD/EEL/UFSC bench. The developed system demonstrated robustness and efficiency, allowing various levels of faults to be imposed in a controlled manner. From the magnetic field data obtained through magnetic field sensors during the tests, it was possible to identify the occurrence of faults at different moments, validating the method and highlighting its applicability in the diagnosis and monitoring of synchronous generators. The results obtained reinforce the importance of this system for future studies and for developing accurate techniques for diagnosing and monitoring synchronous generators.

**Keywords:** incipient faults; synchronous generator; tests on generators.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Ensaio de blindagem eletromagnética .....	21
Figura 2 – Regra da mão direita .....	22
Figura 3 - Campos produzidos em condutores por correntes em sentidos opostos. .	23
Figura 4 - Fotografia da máquina síncrona em corte.....	24
Figura 5 – Rotor de oito polos salientes .....	25
Figura 6 - Bancada especial para imposição de defeitos em máquinas síncronas ...	27
Figura 7 - Enrolamento de armadura do gerador síncrono de oito polos .....	29
Figura 8 - Enrolamento de campo do gerador síncrono de 8 polos.....	30
Figura 9 - Placa de bornes .....	31
Figura 10 - Sensor de campo magnético .....	32
Figura 11 - Maleta de aquisição .....	33
Figura 12 – Forma de onda medida pelo sensor em ensaio com imposição de faltas .....	34
Figura 13 – FFT do sinal de campo da Figura 12.....	36
Figura 14 - Fluxograma da detecção de raias .....	37
Figura 15 – Distribuição normal.....	38
Figura 16 - Distribuição de uma série temporal estacionaria. ....	39
Figura 17 – Utilização de gráficos de controle na detecção de possível falta em um GS .....	40
Figura 18 - Sistema de imposição de faltas eletrônico .....	43
Figura 19 – Enrolamento de campo do gerador com resistência variável em paralelo com um dos polos .....	45
Figura 20 – Reostato utilizado para o sistema de imposição .....	48
Figura 21 - Enrolamento de campo do gerador com resistência variável em paralelo com um dos polos com amperímetros posicionados.....	48
Figura 22 – Medidores de corrente de campo da bancada de ensaios.....	49
Figura 23 – Circuito de potência do sistema de imposição de faltas.....	50
Figura 24 – Circuito de comando do sistema de imposição de faltas.....	50
Figura 25 – Medição do campo externo ao tubo que leva os cabos de alimentação da bancada.....	52
Figura 26 – Posicionamento do sensor próximo à caixa de ligação do gerador.....	52

Figura 27 - Posicionamento do sensor mais afastado à caixa de ligação do gerador .....	53
Figura 28 – Sondas de corrente medindo durante realização do ensaio .....	54
Figura 29 – Corrente no enrolamento de campo medida no ensaio sem carga, na condição sadia. ....	55
Figura 30 - Corrente no enrolamento de campo medida no ensaio sem carga, numa condição de falta .....	55
Figura 31 – Corrente no enrolamento de campo medida no ensaio com carga, na condição sadia .....	56
Figura 32 – Corrente no enrolamento de campo medida no ensaio sem carga, numa condição de falta .....	56
Figura 33 – Histórico de harmônicas obtido a partir do ensaio.....	57
Figura 34 – Maleta de aquisição em operação.....	58
Figura 35 – Posicionamento do sensor de campo e das sondas de corrente .....	58
Figura 36 – Visão geral do ensaio com imposição de faltas .....	59
Figura 37 – Histórico para comparação entre os métodos de imposição de falta .....	60
Figura 38 – Histórico para comparação entre os métodos de imposição de falta em detalhe .....	61
Figura 39 – Severidade da falta em função da resistência do reostato.....	62
Figura 40 – Severidade da falta em logaritmo em função da resistência do reostato. ....	62
Figura 41 – Detecção de anomalia na harmônica de 15 Hz.....	63
Figura 42 – Detecção de anomalia na harmônica de 105 Hz.....	64
Figura 43 - Detecção de anomalia na harmônica de 90 Hz.....	64
Figura 44 - Detecção de anomalia na harmônica de 390 Hz.....	65

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros da bancada de imposição de defeitos.....	28
Tabela 2 – Configuração dos canais .....	55

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>15</b>
1.1	MOTIVAÇÃO.....	16
1.2	OBJETIVOS.....	17
<b>1.2.1</b>	<b>Objetivo Geral.....</b>	<b>18</b>
<b>1.2.2</b>	<b>Objetivos específicos .....</b>	<b>18</b>
1.3	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	19
<b>2</b>	<b>BLINDAGEM ELETROMAGNÉTICA EM CONDUTORES .....</b>	<b>20</b>
2.1	BLINDAGEM ATRAVÉS DE UM MATERIAL.....	20
2.2	BLINDAGEM POR DISPOSIÇÃO DOS CONDUTORES.....	22
<b>3</b>	<b>SISTEMA DE ESTUDO .....</b>	<b>24</b>
3.1	A MÁQUINA SÍNCRONA.....	24
3.2	BANCADA ESPECIAL PARA IMPOSIÇÃO DE DEFEITOS .....	26
3.3	SENSOR DE CAMPO MAGNÉTICO .....	32
<b>4</b>	<b>DETECÇÃO DE FALTAS INCIPIENTES EM GERADORES SÍNCRONOS</b>	<b>35</b>
4.1	DETECÇÃO DE FALTAS A PARTIR DO CAMPO MAGNÉTICO EXTERNO	35
4.2	RASTREAMENTO DE RAIAS.....	36
4.3	MÉTODO DE DETECÇÃO DE ANOMALIAS.....	37
<b>4.3.1</b>	<b>Análise de séries temporais.....</b>	<b>38</b>
<b>4.3.2</b>	<b>Aplicação de gráficos de controle.....</b>	<b>40</b>
<b>5</b>	<b>SISTEMA DE IMPOSIÇÃO DE FALTAS EM GERADORES SÍNCRONOS</b>	<b>42</b>
5.1	SISTEMA ELETRÔNICO DE IMPOSIÇÃO DE FALTAS .....	42
5.2	SISTEMA DE IMPOSIÇÃO DE FALTAS ANALÓGICO .....	43
<b>5.2.1</b>	<b>Aplicação de faltas graduais no enrolamento de campo .....</b>	<b>44</b>
<b>5.2.2</b>	<b>Desenvolvimento do sistema de imposição de faltas no rotor.....</b>	<b>47</b>
<b>6</b>	<b>ENSAIOS REALIZADOS.....</b>	<b>51</b>
6.1	ENSAIOS DE COMPATIBILIDADE MAGNÉTICA .....	51
6.2	ENSAIOS COM IMPOSIÇÃO DE DEFEITOS.....	53
<b>6.2.1</b>	<b>Ensaios sem sincronização à rede.....</b>	<b>54</b>
<b>6.2.2</b>	<b>Ensaios com sincronização à rede.....</b>	<b>57</b>

<b>7</b>	<b>CONCLUSÕES FINAIS.....</b>	<b>66</b>
----------	-------------------------------	-----------

## 1 INTRODUÇÃO

Os geradores síncronos desempenham um papel fundamental na geração de energia elétrica no Brasil e no mundo, sendo amplamente utilizados em usinas térmicas, nucleares e hidrelétricas. Segundo dados da ONS (Operador Nacional do Sistema), usinas térmicas, nucleares e hidrelétricas somadas geram aproximadamente 75% (EPE, 2024) da energia elétrica conectada ao SIN (Sistema Interligado Nacional), refletindo a importância desse tipo de gerador no fornecimento de eletricidade no Brasil. Devido à relevância desse tipo de máquina para o SIN, as suas manutenção e inspeção são cruciais para garantir a operação contínua e a minimização de faltas em usinas que podem resultar em prejuízos financeiros e interrupções no fornecimento de energia.

O monitoramento de condições e a detecção de faltas em geradores síncronos é uma tarefa complexa que pode envolver a análise da corrente elétrica, da vibração (Santos, 2022), do campo magnético externo ao gerador (Rigoni, 2014), entre outros métodos não invasivos, como a monitoração por meio do campo magnético, são extremamente interessantes para a identificação dos defeitos sem a necessidade de parar a máquina ou desmontá-la, proporcionando uma abordagem segura e eficiente para a manutenção preditiva.

No entanto, campos eletromagnéticos gerados por cabos condutores e circuitos eletrônicos próximos ao gerador podem gerar campos adicionais que se sobrepõem ao campo do gerador e assim diminuir a efetividade das medições e, conseqüentemente, a acurácia dos métodos de detecção de faltas.

Existem diversos estudos que relacionam alterações no sinal de campo magnético com a ocorrência de defeitos em máquinas elétricas rotativas (Santos, 2021; Hoegen, 2021). O GRUCAD (Grupo de Concepção e Análise de Dispositivos Eletromagnéticos) da UFSC (Universidade Federal de Santa Catarina), já publicou diversos estudos que contemplam este tema (Antunes, 2022; Santos, 2016). Além da base teórica, estes estudos também contemplaram ensaios práticos realizados no Laboratório de Máquinas (LABMAQ) da universidade. Estes ensaios são realizados em um grupo gerador especial que permite a imposição de defeitos.

A relevância deste trabalho de conclusão de curso consiste na capacidade de melhorar a qualidade dos ensaios realizados no gerador presente na

universidade e, conseqüentemente, melhorar a acurácia das técnicas de diagnóstico de faltas em geradores síncronos, contribuindo para a longevidade destas máquinas e, por extensão, para a estabilidade do sistema de geração de energia elétrica.

## 1.1 MOTIVAÇÃO

A motivação deste trabalho pode ser observada pelo âmbito teórico e prático. A bancada e os equipamentos utilizados, como sensores e circuitos de condicionamento e aquisição, já foram, e ainda são, objetos de estudo de diversas pesquisas. Por exemplo, a tese de doutorado de Maurício Rigoni, que foi defendida em 2014, desenvolveu um sistema de detecção de faltas em geradores síncronos por meio da análise do campo magnético externo (Rigoni, 2014), ou a dissertação de mestrado de Luciano Antunes, defendida em 2023 (Antunes, 2023), em que foram elaboradas estratégias para detecção de faltas incipientes em geradores síncronos através do fluxo magnético no entreferro.

Nos estudos elaborados por Rigoni, as faltas eram impostas manualmente, exigindo mais tempo e conhecimentos específicos sobre a máquina a ser ensaiada. Já no trabalho realizado por Antunes, foi utilizado um sistema automatizado, desenvolvido por Hesmman (Hesmman, 2018) para facilitar a imposição de faltas. Este equipamento foi baseado no emprego de relés, medidores, dispositivos de proteção, micro controlador, e uma interface de operação que permitia a imposição de uma série de faltas de curto-circuito nos geradores. Por meio do acionamento de relés, comandados pelo microcontrolador, impunha-se o contato elétrico entre pontos específicos das bobinas, tanto do estator quanto do rotor, além do curto-circuito entre chapas do núcleo da máquina.

Contudo, ao longo dos anos de uso, esse equipamento de imposição de faltas apresentou falhas operacionais em alguns de seus componentes internos. Atualmente, se encontra inoperante. Buscando o desenvolvimento de uma nova versão desse sistema de imposição de faltas, observou-se a oportunidade de realizar alguns aprimoramentos, entre os quais, pode-se destacar a viabilização da imposição de faltas graduais de curto-circuito de espiras, que é o objeto de estudo principal deste trabalho de conclusão de curso.



Ademais, é importante que este novo sistema não cause interferência no campo magnético externo ao gerador. Desse modo, é necessário a realização de um estudo de blindagens eletromagnéticas garantido mais qualidade e praticidade nos testes realizados em laboratório.

## 1.2 OBJETIVOS

O objetivo principal deste trabalho é desenvolver um sistema de imposição de faltas progressivas em um gerador síncrono, emulando o avanço gradual de um curto-circuito nas espiras do rotor do gerador. Este mecanismo pode ser replicado para a imposição de faltas de estator e de curto-circuito de chapas do núcleo em aplicações futuras.

### 1.2.1 Objetivo Geral

O GRUCAD dispõe de uma bancada para ensaios de geradores síncronos com mecanismos que permitem a imposição de faltas de naturezas diversas. Em outros trabalhos, foi desenvolvido um sistema capaz de realizar a imposição de faltas elétricas de forma automatizada. Ele funciona alterando conexões e aplicando curtos-circuitos nas bobinas do estator e do rotor, bem como em lâminas do núcleo. Estas operações são possíveis por se tratar de uma máquina especial para este tipo de estudo. No entanto, atualmente o equipamento se encontra danificado e inoperante, de modo que se faz necessário o desenvolvimento de uma nova versão aprimorada e com funcionalidades adicionais.

O objetivo geral deste trabalho de conclusão de curso é proporcionar um sistema de imposição de faltas graduais de curto-circuito para o futuro aprimoramento de uma nova versão do equipamento de imposição de faltas da bancada de ensaios. Esta nova funcionalidade viabiliza a aplicação de faltas incipientes de maneira a simular a ocorrência de faltas ainda mais próxima da realidade, ou seja, aplicar as faltas de maneira gradual ou “lenta”.

Além disso, objetiva-se também realizar um estudo sobre blindagens eletromagnéticas para avaliar as estratégias mais apropriadas que podem ser empregadas para garantir que o sistema de imposição de faltas, ou até mesmo o cabeamento de controle e alimentação das máquinas não ocasionem interferências relevantes nos sensores de medição de campo durante os ensaios.

### 1.2.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos são:

- Revisão da teoria de máquinas síncronas;
- Estudo de sensores de campo magnético;
- Estudo de blindagem eletromagnética em condutores;
- Aplicação de técnicas de detecção de faltas incipientes em GS;
- Desenvolvimento de um sistema de imposição de faltas incipientes;
- Realização de ensaios com imposição de faltas incipientes em GS.

### 1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Este documento foi dividido em seções para facilitar a leitura e a compreensão do trabalho. No capítulo 2 está descrita a base teórica das principais técnicas de blindagem eletromagnética em fios condutores. No capítulo 3 é apresentado o sistema de estudo, passando por uma revisão sobre o funcionamento de uma máquina síncrona, uma breve descrição da bancada de ensaios especiais em geradores síncronos do GRUCAD e uma revisão sobre os sensores de campo magnético utilizados ao longo do trabalho. Já o capítulo 4 explica o método de detecção de faltas incipientes em geradores síncronos, passando pela técnica de rastreamento de raias até a aplicação de gráficos de controle. Em seguida, no capítulo 5, são apresentados dois sistemas de imposição de defeitos. O primeiro a ser apresentado é o sistema que foi desenvolvido em 2018 (Hesmann, 2018) que se encontrava inoperante em função de um defeito. O outro, é o sistema desenvolvido no escopo desse trabalho. A seguir, o capítulo 6 descreve os ensaios realizados para validação dos métodos estudados ao longo do desse trabalho, assim como apresenta os resultados e as análises dos dados obtidos a partir desses ensaios. Por fim, o capítulo 7 apresenta as conclusões e as perspectivas para futuros trabalhos.

O trabalho de pesquisa apresentado neste trabalho foi motivado e parcialmente custeado no âmbito do programa de P&D ANEEL e desenvolvido no programa de P&D da Engie Brasil Energia e Itá Energética S.A. no projeto PD 0403-0057/2023, intitulado “Equipamento não Invasivo para Detecção de Falhas em Geradores Síncronos através do Campo Magnético Externo – Lote Pioneiro e Inserção no Mercado”, realizado em parceria com a empresa AQTech Engenharia e Instrumentação S.A.

## 2 BLINDAGEM ELETROMAGNÉTICA EM CONDUTORES

Conforme é descrito pela lei de Ampère (2.1), um campo magnético ( $H$ ) em ( $A/m$ ) é criado ao redor de um condutor por onde flui uma corrente elétrica, representada na equação (2.1) pela densidade de corrente ( $J$ ). Em alguns casos, o surgimento deste campo pode ser indesejado. Na aplicação deste trabalho, por exemplo, em que um dos objetivos se constitui em facilitar ensaios com medição do campo magnético externo de um gerador, é importante que não existam campos parasitas no ambiente dos sensores produzidos por outras fontes que não a máquina ensaiada.

$$\nabla \times H = J \quad (2.1)$$

As ondas eletromagnéticas podem se difundir pelos ambientes, pois não dependem de um meio físico para propagação. Ao mesmo tempo, estas ondas podem percorrer grandes distâncias dependendo dos materiais presentes no caminho. Dependendo do contexto, essas ondas podem ser indesejadas e, quando captadas por um sensor, são consideradas ruído, podendo atrapalhar a medição de uma grandeza de interesse.

Nesta seção serão descritos alguns métodos de blindagem presentes na literatura e suas particularidades.

### 2.1 BLINDAGEM ATRAVÉS DE UM MATERIAL

Entre os diversos métodos de blindagem, existe o método de blindagem através de um material (Siemann, 2024), que consiste em revestir o condutor com um outro material que consiga atenuar o campo magnético. Para avaliar se o material utilizado na blindagem produzirá um resultado satisfatório é necessário observar a equação (2.2), que descreve a profundidade de penetração ( $\delta$ ), em metros, de um campo, elétrico ou magnético em um meio. A análise desta equação permite observar que a profundidade de penetração varia em função da frequência do campo  $f$  em Hertz, da permeabilidade magnética do meio ( $\mu$ ), em *Henry/metro* ( $H/m$ ) e da sua condutividade elétrica ( $\sigma$ ) em *Siemens/metro* ( $S/m$ ). Vale destacar

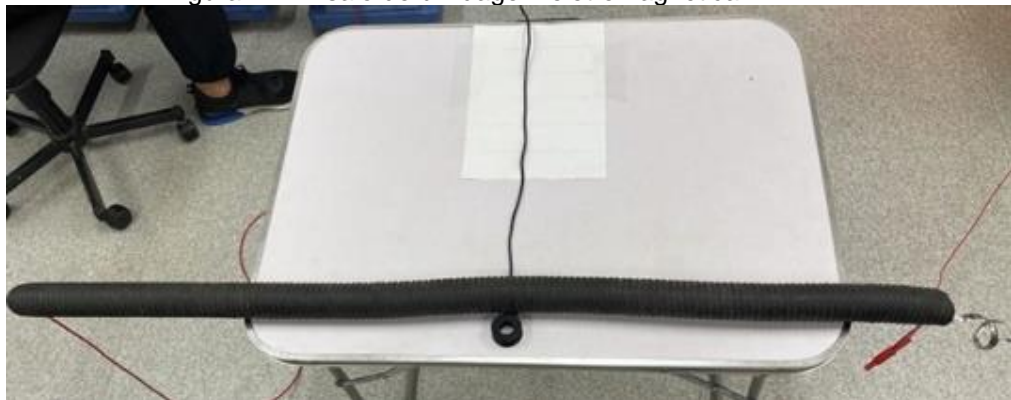
que essa equação representa uma aproximação que considera o campo incidente puramente sinusoidal, isotrópico e linear.

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{\pi f \mu \sigma}} \quad (2.2)$$

Ao percorrer a distância igual a uma vez a profundidade de penetração, a onda eletromagnética tem a amplitude reduzida a aproximadamente 37% do valor inicial. Ao mesmo passo, ao percorrer uma distância igual a três vezes a profundidade de penetração, a amplitude desta onda pode ser considerada desprezível (Bastos, 2012). Assim, é necessário um material com espessura maior que três vezes a profundidade de campo para que a blindagem seja considerada eficaz.

Além disso, analisando a equação (2.2), é possível perceber que a profundidade de penetração diminui quando a permeabilidade magnética e a condutividade elétrica do meio aumentam. Ou seja, quanto maior forem os valores destes parâmetros, menos a onda eletromagnética precisa percorrer para que sua amplitude seja considerada desprezível. O mesmo pode ser observado com relação à frequência, deixando evidente que é mais fácil blindar campos de altas frequências. A figura a seguir ilustra um ensaio de blindagem com um tubo feito com um condutite metálico. Em Siemann (2024) são apresentadas análises e conclusões sobre este ensaio, realizado no LABMAQ, apresentado pela fotografia da Figura 1.

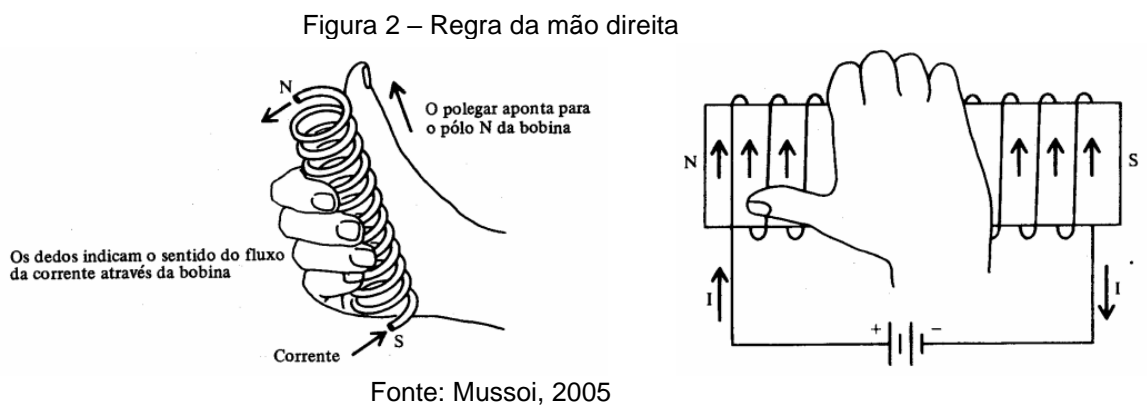
Figura 1 – Ensaio de blindagem eletromagnética



Fonte: Siemann (2024)

## 2.2 BLINDAGEM POR DISPOSIÇÃO DOS CONDUTORES

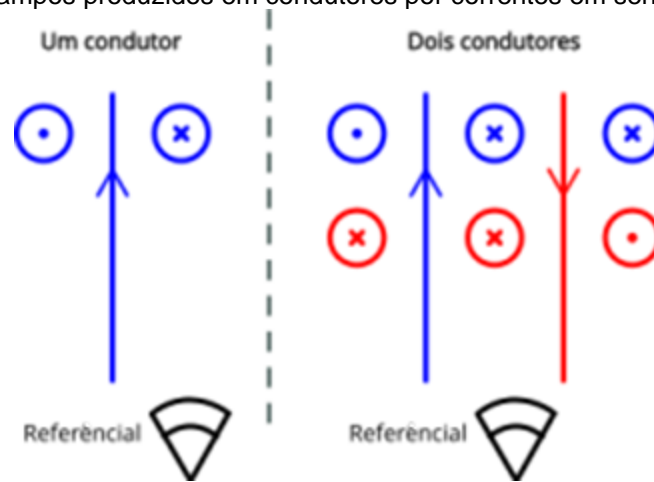
A blindagem a partir da disposição dos condutores é baseada na lei de Ampère, apresentada na equação (2.1), que descreve que o campo magnético produzido por uma corrente fluindo por um condutor é rotacional. O sentido deste campo pode ser determinado a partir da regra da mão direita (neste caso o polegar indica o sentido do campo magnético, enquanto os outros dedos se fecham na palma da mão indicando o sentido da corrente), a regra da mão direita pode ser observada na figura a seguir.



Em um circuito monofásico, através do condutor de alimentação (fase) e o de retorno (neutro) é percorrida a mesma densidade de corrente em amplitude, porém com sentidos opostos, portanto os campos magnéticos formados ao redor de cada condutor têm mesma amplitude e sentidos opostos.

Dessa forma, ao posicionar o condutor fase e o neutro próximos um do outro, os dois campos se sobrepõem. Como ambos possuem o mesmo módulo e sentidos opostos, o campo resultante produzido por esses condutores se soma na região entre eles. Já ao redor dos condutores o campo é praticamente nulo. O somatório desses campos pode ser visto de maneira simplificada na Figura 3.

Figura 3 - Campos produzidos em condutores por correntes em sentidos opostos.



Fonte: Siemann (2024)

Esta técnica de blindagem pode ser replicada ao entrelaçar os condutores, aumentando ainda mais a sua eficácia. Essa metodologia pode ser também utilizada em um conjunto trifásico balanceado.

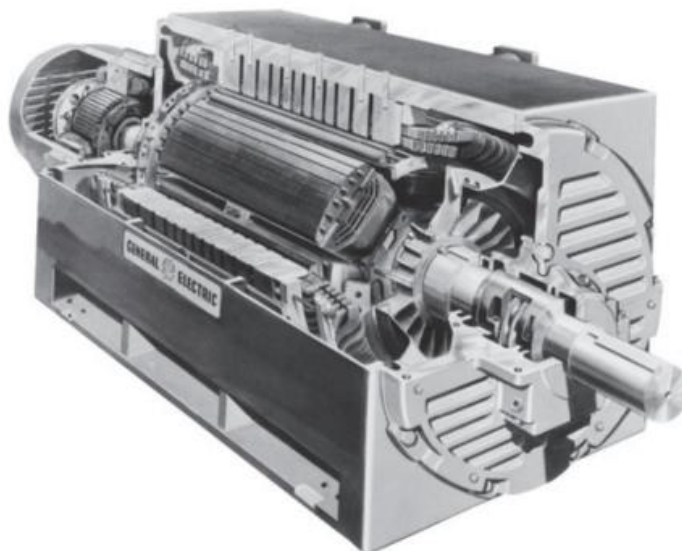
### 3 SISTEMA DE ESTUDO

Nesta seção está apresentado um breve resumo sobre o princípio de funcionamento de uma máquina síncrona, uma descrição da bancada de ensaios do GRUCAD, na UFSC, bem como dos sensores de campo magnético utilizados no presente trabalho.

#### 3.1 A MÁQUINA SÍNCRONA

As máquinas elétricas rotativas são compostas, geralmente, por duas partes fundamentais, o rotor e o estator, separadas por um entreferro, o qual deve ter a menor espessura possível. A fim de minimizar as perdas magnéticas. O rotor é parte rotativa da máquina, ou seja, é a parte que exerce o trabalho mecânico. Já o estator é a porção estática da máquina, cujo núcleo é composto por um material ferromagnético com um pacote laminado, para gerar a maior indução magnética possível e evitar a passagem de correntes parasitas que estão associadas a perdas na forma de calor por efeito Joule. Dentre as principais máquinas elétricas rotativas, destacam-se as máquinas síncronas, máquinas de corrente contínua e motores de indução. A Figura 4 apresenta um diagrama em corte de uma máquina síncrona.

Figura 4 - Fotografia da máquina síncrona em corte



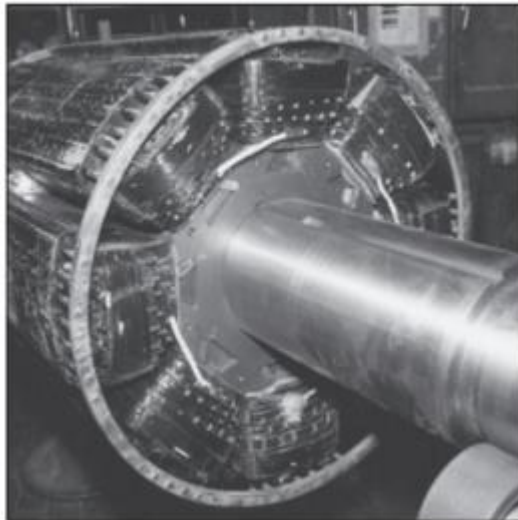
Fonte: Chapman (2013)



As máquinas síncronas, que são objeto de estudo neste TCC, podem trabalhar tanto como gerador quanto como motor. Essas máquinas têm como principal característica a velocidade de giro do rotor que, em regime permanente, é a mesma do campo magnético girante produzido pelas correntes do estator. Esta máquina possui um fluxo magnético produzido pelo enrolamento de campo (geralmente localizado no rotor), seja pela utilização de ímãs permanentes ou pela excitação com corrente contínua (UMANS, 2014).

Em máquinas síncronas existem dois principais tipos de rotor, o de polos lisos e o de polos salientes. O rotor de polos lisos é usado, normalmente, para geradores de alta velocidade, com dois ou quatro polos. Já o rotor de polos salientes se adapta melhor a máquinas de baixa velocidade e com maior número de polos, como os geradores utilizados em usinas hidrelétricas. A Figura 5 contém uma fotografia de um rotor de oito polos salientes de uma máquina síncrona.

Figura 5 – Rotor de oito polos salientes



Fonte: Chapman (2013)

A frequência mecânica ( $f_{mec}$ ), em Hertz (Hz), está relacionada com a frequência elétrica ( $f_{el}$ ), também em Hz, e o número de polos ( $p$ ) por meio da equação (3.1).

$$f_{mec} = \frac{2}{p} * f_{el} \quad (3.1)$$

A velocidade do rotor ( $n$ ), em rotações por minuto (rpm), pode ser simplesmente relacionada com a frequência mecânica a partir de (3.2).

$$n = 60 * f_{mec} \quad (3.2)$$

Logo, a velocidade do rotor se relaciona com a frequência elétrica a partir da equação (3.3)

$$n = \frac{120}{p} * f_{el} \quad (3.3)$$

Atuando como um gerador, a máquina funciona com uma fonte de tensão alternada. A frequência da tensão gerada é determinada pela velocidade de rotação do rotor, que por sua vez é solidário ao rotor de uma máquina primária (uma turbina por exemplo), como mostra a equação (3.1). Já a amplitude da tensão gerada é proporcional à excitação do campo do gerador e à velocidade do rotor.

Ao conectar o gerador em um sistema interligado de grande porte, como o SIN, a tensão e a frequência nos terminais da armadura são, na prática, definidas pelo sistema interligado. Diz-se nesse caso, que a máquina está sincronizada à rede.

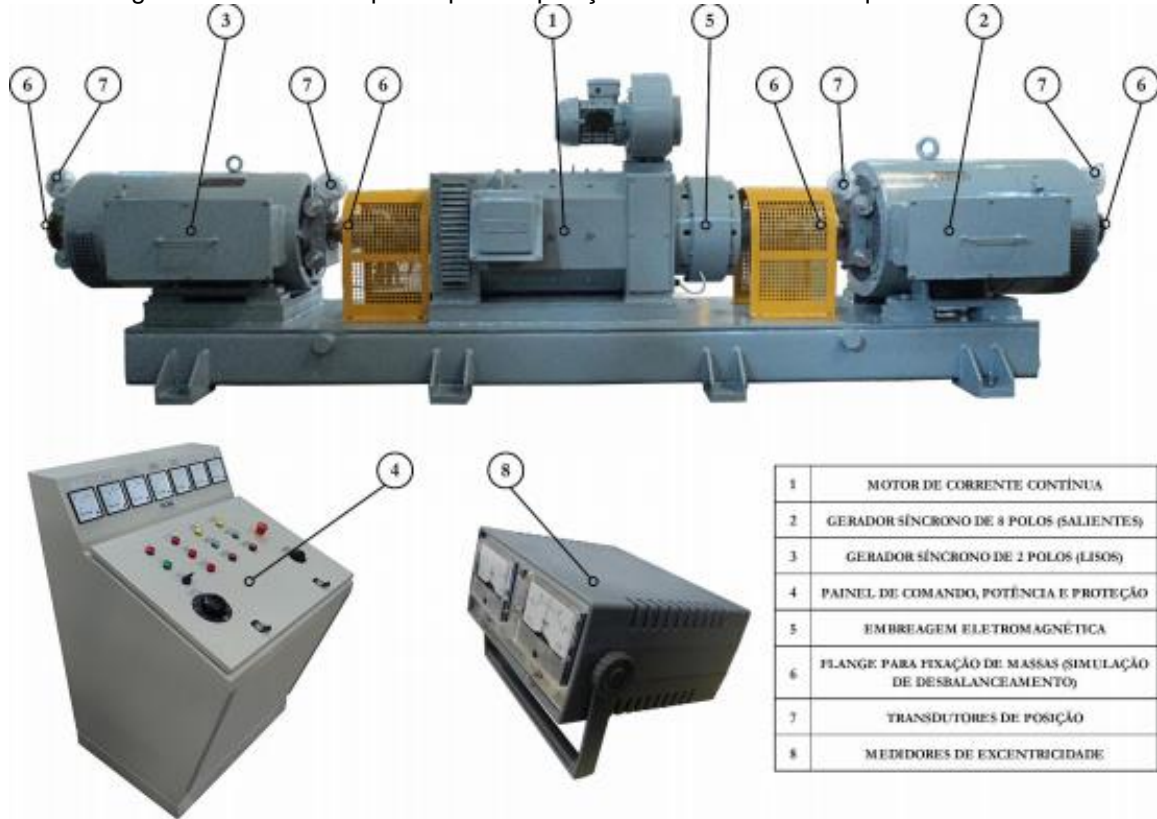
A potência ativa do gerador está intimamente ligada ao torque aplicado pela máquina primária, enquanto a potência reativa está relacionada com a excitação do enrolamento de campo. O gerador síncrono pode operar sobre-excitado ou sub-excitado, isto é, fornecendo ou consumindo potência reativa. Dependendo do contexto, as usinas ainda podem operar a máquina numa configuração conhecida como compensador síncrono, na qual a máquina tem a função de controlar o fator de potência e não há geração de potência ativa.

### 3.2 BANCADA ESPECIAL PARA IMPOSIÇÃO DE DEFEITOS

O GRUCAD dispõe de uma bancada de ensaios especial que conta com dois geradores síncronos, um de oito polos salientes e outro de dois polos lisos. Esses geradores foram projetados para que seja possível a inserção de diversos tipos de faltas de maneira segura e controlada. Os geradores são acionados por um motor de corrente contínua, que atua como a força motriz dos geradores, de maneira análoga à água girando uma turbina em uma usina hidrelétrica. A bancada também conta com um painel de comando, embreagem eletromagnética, transdutores de posição, medidores de excentricidade e um flange para fixação de massas (para

simular defeitos de desbalanceamento). A bancada está representada na Figura 6 e os parâmetros da bancada podem ser observados na Tabela 1.

Figura 6 - Bancada especial para imposição de defeitos em máquinas síncronas



Fonte: Equacional (2014).

Tabela 1 – Parâmetros da bancada de imposição de defeitos

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

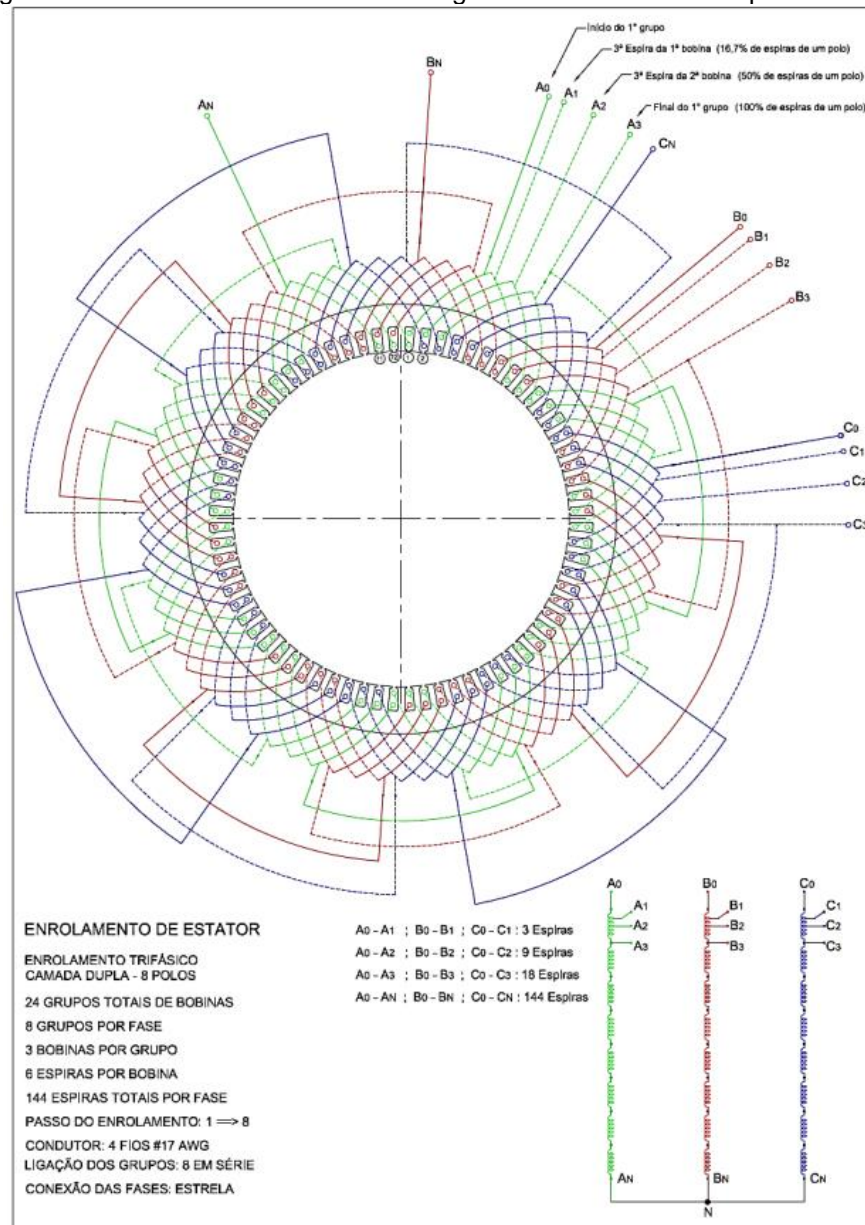
Fonte: Equacional (2014).

Essa bancada permite a imposição de diversas faltas, tanto de natureza mecânica, como a de excentricidade, cuja imposição é possível ao acoplar pesos nos flanges, quanto de natureza elétrica, como a de curto-circuito entre as lâminas do núcleo. Outra falta de natureza elétrica que é possível simular na bancada é a de curto-circuito de espiras dos enrolamentos de campo e de armadura. Estas, são impostas ao alterar os *taps* estatóricos e rotóricos presentes na bancada. Ao alterar as conexões dos *taps* relativos ao campo ou à armadura do gerador o número de espiras é alterado, alterando assim a força magnetomotriz do enrolamento, como pode ser visto em (3.4), onde N é o número de espiras e I é a corrente em Amperes que passa pelo enrolamento:

$$FMM = NI \quad (3.4)$$

No caso da imposição de faltas na armadura (estator) é possível alterar os *taps* em três posições, simulando um defeito de retirada de 16,7%, 50% ou 100% das espiras de um polo por fase, como pode ser observado na Figura 7, para o gerador de oito polos.

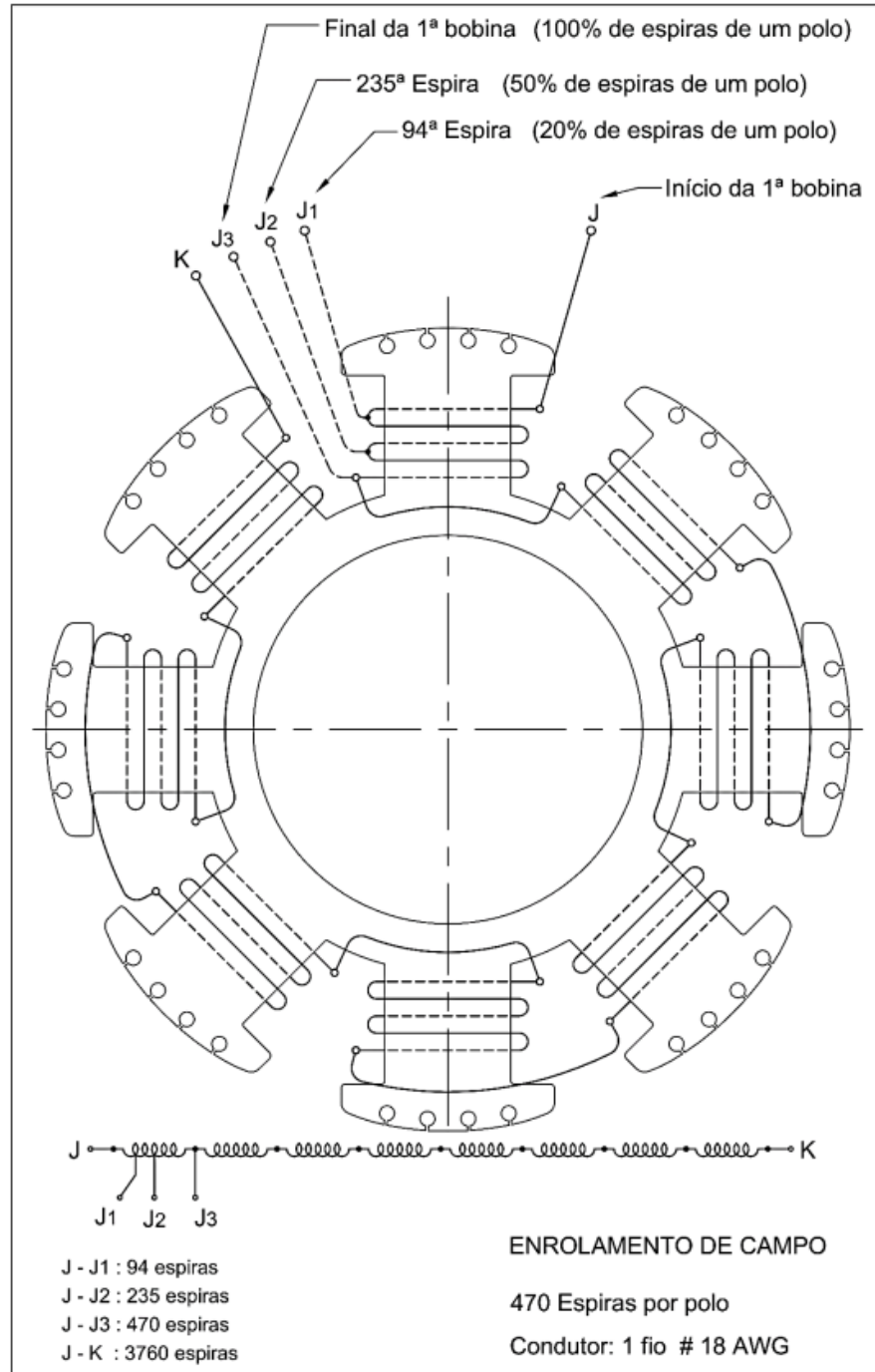
Figura 7 - Enrolamento de armadura do gerador síncrono de oito polos



Fonte: Equacional (2014)

Os geradores possuem o enrolamento de campo distribuído no rotor e, para aplicar faltas, é possível alterar os *taps* relativos a um defeito de retirada de 20%, 50% ou 100% das espiras de um polo do campo, como está ilustrado na Figura 8, para o gerador de oito polos.

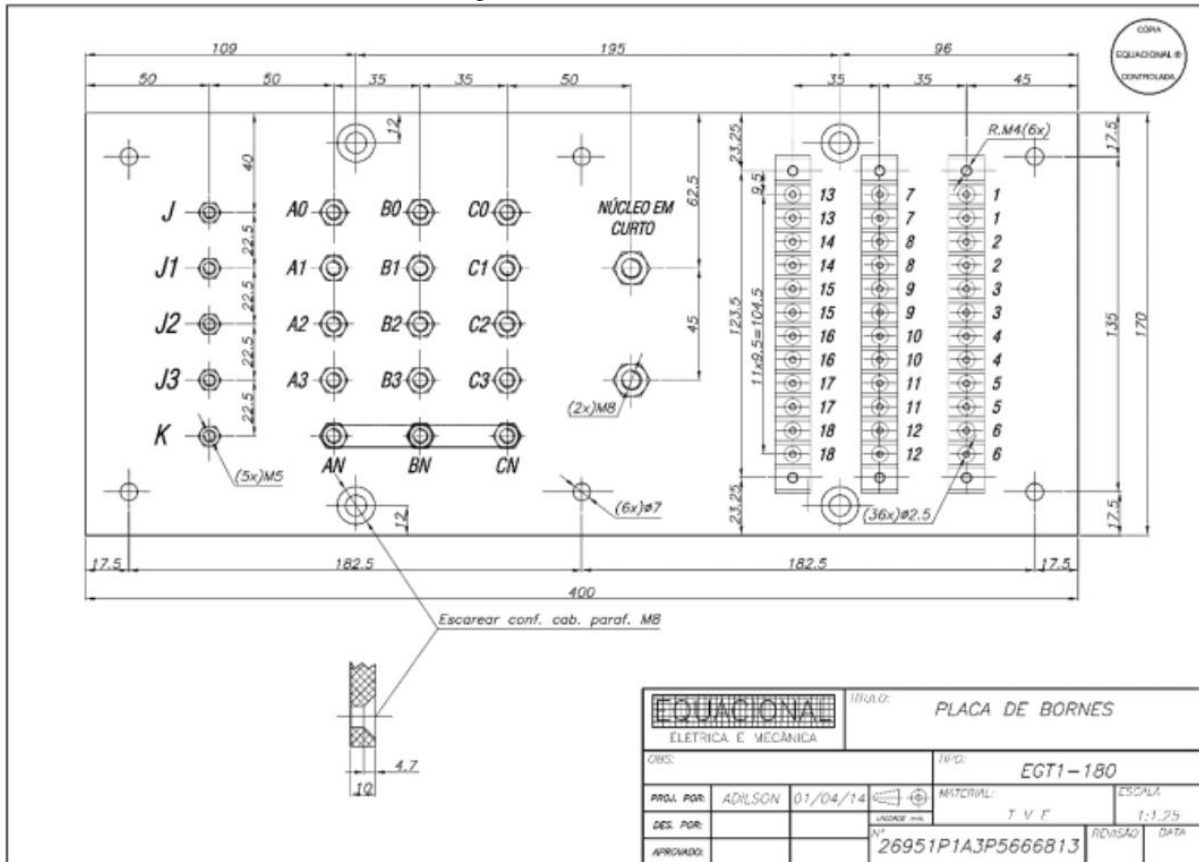
Figura 8 - Enrolamento de campo do gerador síncrono de 8 polos.



Fonte: Equacional (2014)

A Figura 9 ilustra a placa de bornes na qual são realizadas as conexões para a imposição de defeitos:

Figura 9 - Placa de bornes



Fonte: Equacional (2014)

Os geradores que compõem a bancada também têm a possibilidade de operarem sincronizados com a rede de distribuição local e, conseqüentemente, ao SIN. Essa função permite garantir condições de operação similares às encontradas em usinas geradoras. Quando um gerador opera em sincronismo com a rede, a frequência da tensão gerada é ditada pelo sistema. Dessa maneira, é possível simular o ambiente de geração de energia de uma usina, permitindo, assim, que os testes reflitam condições de carregamento e faltas reais.

### 3.3 SENSOR DE CAMPO MAGNÉTICO

O monitoramento do campo magnético em máquinas elétricas é possível por meio da utilização de diversos tipos de sensores. Dentre eles se destaca o sensor de campo magnético por indução, como pode ser visto em Santos (2021). Esse sensor é um dos mais utilizados e estudados, e possui diversas vantagens em relação a outras topologias, dentre as quais pode-se citar a sua simplicidade e a amplificação natural das componentes harmônicas de alta frequência. Nesse tipo de sensor, o campo captado é convertido em tensão induzida nos seus terminais. Entretanto, usualmente, os valores de tensão nos terminais desses sensores são baixos. Essa desvantagem pode ser superada com a utilização de circuitos eletrônicos amplificadores.

Na Figura 10 estão expostos dois sensores de campo magnético em diferentes formatos. Eles consistem em um carretel de material polimérico enrolado por espiras de cobre. Esses sensores, que são utilizados nos ensaios realizados neste trabalho, foram fabricados no GRUCAD. O carretel foi impresso em uma impressora 3D e as espiras foram enroladas com o auxílio de uma bobinadeira disponível no laboratório. É importante notar que estes sensores possuem núcleo de ar, evitando, assim, efeitos indesejados da saturação magnética.

Figura 10 - Sensor de campo magnético



Fonte: Santos, G. F. et al., 2021.

A tensão de saída do sensor pode ser relacionada ao campo magnético por meio da lei de Faraday-Lenz (3.5), na qual  $N$  é o número de espiras,  $S$  é a área da seção transversal do sensor em  $m^2$ ,  $\mu_0$  é a permeabilidade magnética do vácuo em  $H/m$ ,  $H$  é o campo magnético em  $A/m$  e  $v(t)$  é a tensão induzida em V. Analisando a



equação fica evidente que a tensão de saída é proporcional à variação do campo magnético e não ao campo em si, o que explica a amplificação das componentes de alta frequência medidas pelo sensor.

$$v(t) = -N\mu_0 S \frac{dH}{dt} \quad (3.5)$$

A tensão de saída deste tipo de sensor pode ser muito baixa dependendo da intensidade do campo, principalmente porque a permeabilidade magnética do vácuo é muito baixa, da ordem de  $10^{-6} \text{ H/m}$ . Uma das maneiras de contornar esse problema seria o aumento da seção do sensor, porém, desse modo, o sensor se torna menos pontual. Uma alternativa seria aumentar, então, o número de espiras e, conseqüentemente, o número de camadas sobrepostas. Contudo, dessa forma a capacitância parasita e a indutância aumentam, resultando na diminuição da largura de banda, e dificultando a medição das harmônicas de alta ordem. Portanto, é fundamental estabelecer um equilíbrio para garantir que o sensor apresente uma tensão de saída adequada aos ensaios.

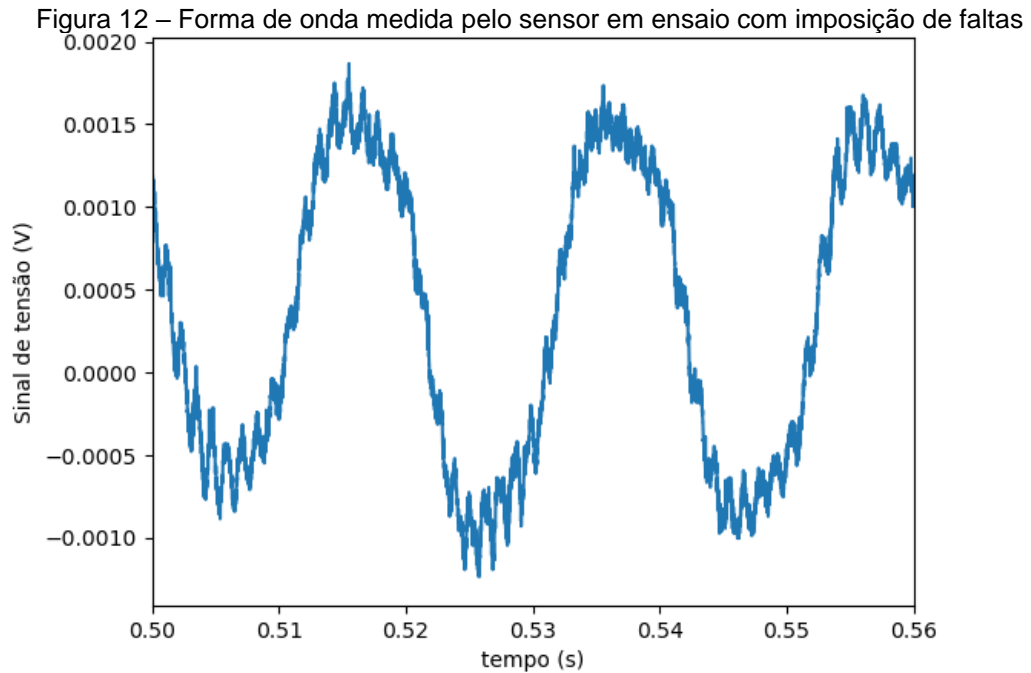
Para realizar os ensaios foi utilizada uma maleta que contém um circuito eletrônico de filtragem e amplificação de sinais. Nesta maleta também está disponível uma placa de aquisição, que permite a aquisição em diversos canais simultaneamente. A Figura 11 a seguir contém uma fotografia da maleta de ensaios desenvolvida no laboratório.

Figura 11 - Maleta de aquisição



Fonte: Autor (2022)

A Figura 12 mostra um exemplo de aquisição de campo magnético feita pelo aparato de medição durante um ensaio com imposição de faltas no rotor do gerador síncrono de oito polos da bancada. Esta aquisição foi feita por cinco segundos, utilizando uma taxa de amostragem de 125 kHz.



Fonte: Autor (2024)

## 4 DETECÇÃO DE FALTAS INCIPIENTES EM GERADORES SÍNCRONOS

A detecção de faltas incipientes em geradores síncronos é de relevante importância para evitar interrupções no abastecimento de energia para a população em geral, além de reduzir prejuízos para as operadoras. Ao longo dos anos, diversos estudos foram realizados com o objetivo de detectar estas faltas antes que a máquina sofra danos severos. Entre os principais métodos destacam-se a análise através da corrente do estator (Neti, 2009), a análise através da vibração da máquina (Santos, 2022) e a análise a partir do campo magnético externo (Grillo, 2024), sendo esta o foco deste trabalho.

### 4.1 DETECÇÃO DE FALTAS A PARTIR DO CAMPO MAGNÉTICO EXTERNO

A detecção de faltas por meio do campo magnético externo se destaca por ser um método preciso, capaz de identificar defeitos tanto no estator quanto no rotor, funcionar em máquinas de grande e pequeno porte e, principalmente, por ser um método não invasivo. Dessa maneira, não é necessário que a geração de energia sofra uma pausa para que o sistema de detecção seja instalado. A ideia deste método é avaliar a alteração no espectro de frequências dos sinais de campo magnético obtidos periodicamente.

O espectro de frequência do sinal medido pelo sensor é gerado a partir do cálculo da Transformada Rápida de Fourier (FFT). Quanto maior a taxa de aquisição mais frequências podem ser observadas no espectro, enquanto o tempo de aquisição define a resolução espectral ( $df$ ). A resolução espectral é a capacidade de distinguir as frequências no espectro e considerando que  $T$  é o período de aquisição, é definida por (4.1):

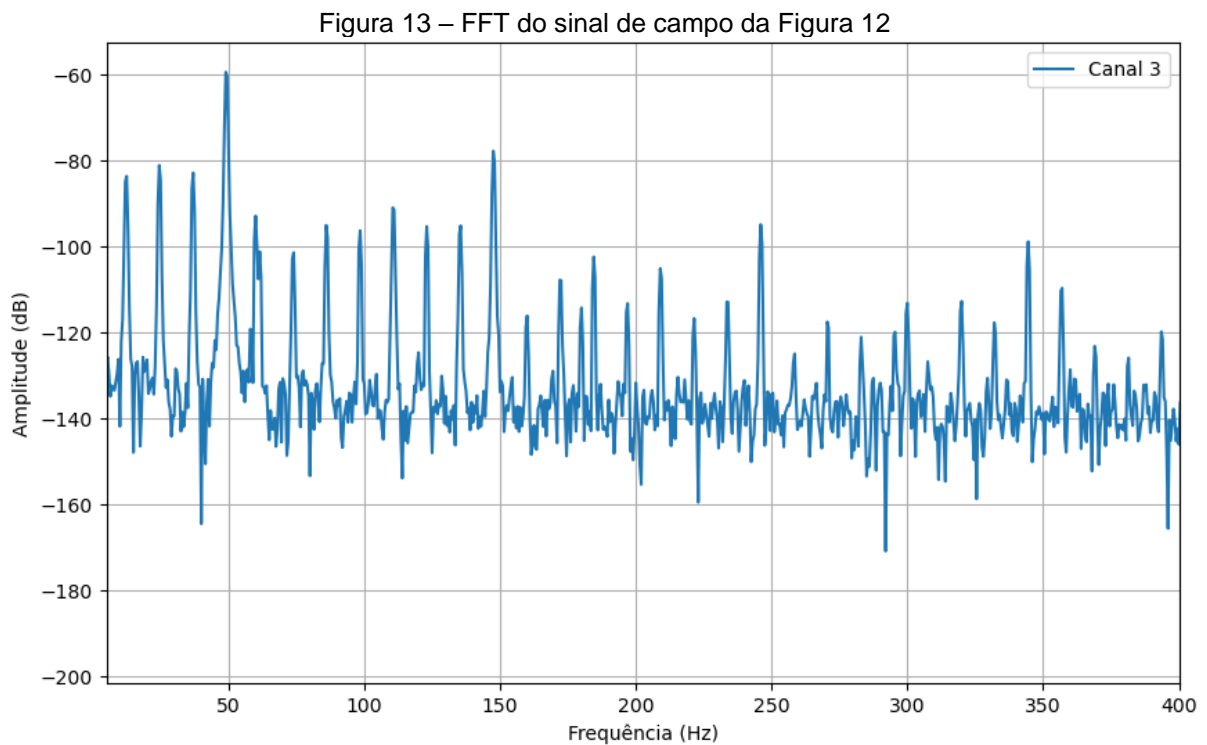
$$df = \frac{1}{T} \quad (4.1)$$

O monitoramento do histórico das amplitudes das frequências observadas no espectro permite a avaliação do comportamento da máquina ao longo do tempo. Cada frequência pode ser avaliada individualmente, portanto, cada componente possui seu próprio histórico de amplitudes. Assim, são formadas diversas séries temporais associadas a cada uma das componentes harmônicas do sinal. Monitorar

essas séries simplifica a manipulação da informação contida no espectro de frequências e reduz significativamente a quantidade de dados para análise.

O espectro de frequências do sinal captado pelos sensores contém a frequência fundamental mecânica ( $f_{mec}$ ) e suas múltiplas inteiras, assim como a frequência fundamental elétrica ( $f_{el}$ ) e suas múltiplas inteiras. Entretanto, o sinal também contém frequências provenientes de ruídos. As frequências de interesse, como as múltiplas inteiras da fundamental mecânica, geralmente possuem amplitudes mais significativas que o ruído. Contudo, em frequências mais altas, é necessário tomar cuidado, pois as amplitudes são mais próximas e uma frequência que não carrega informações relevantes pode ser observada de forma errônea.

Na Figura 13 pode-se observar o espectro de frequências obtido a partir da FFT do sinal apresentado na Figura 12 do capítulo anterior.



Fonte: Autor (2024)

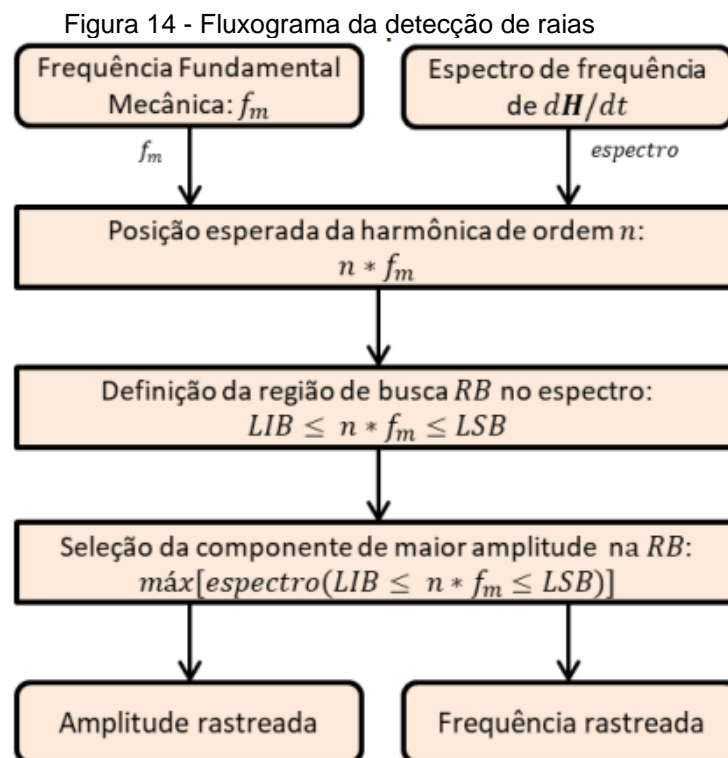
## 4.2 RASTREAMENTO DE RAIAS

Um dos primeiros passos para o processo de detecção de faltas é o rastreamento de raias, que é fundamental para a criação dos históricos de amplitudes. O objetivo do rastreamento de raias é identificar as componentes harmônicas de interesse e armazenar suas respectivas amplitudes. Esse processo, apesar de ser relativamente simples, requer uma série de cuidados que garantem a

identificação correta das frequências de interesse e asseguram a confiabilidade do processo total de monitoramento da máquina.

As harmônicas de interesse são múltiplas inteiras da frequência fundamental mecânica. Assim, é possível a definição de uma região de busca no espectro de frequências ao redor da harmônica de ordem  $n$ , definida por um limite inferior (LIB) e um limite superior (LSB) de busca. Dentro dessa região busca-se o ponto de maior amplitude. O ponto encontrado é, então, considerado como a frequência de interesse, enquanto a amplitude rastreada é armazenada para formação do histórico. Para que o método seja eficaz é importante que a fundamental mecânica seja definida inicialmente com bastante precisão.

A Figura 14, demonstra um fluxograma que ajuda no entendimento geral do procedimento de detecção de raias.



Fonte: Grillo (2024)

### 4.3 MÉTODO DE DETECÇÃO DE ANOMALIAS

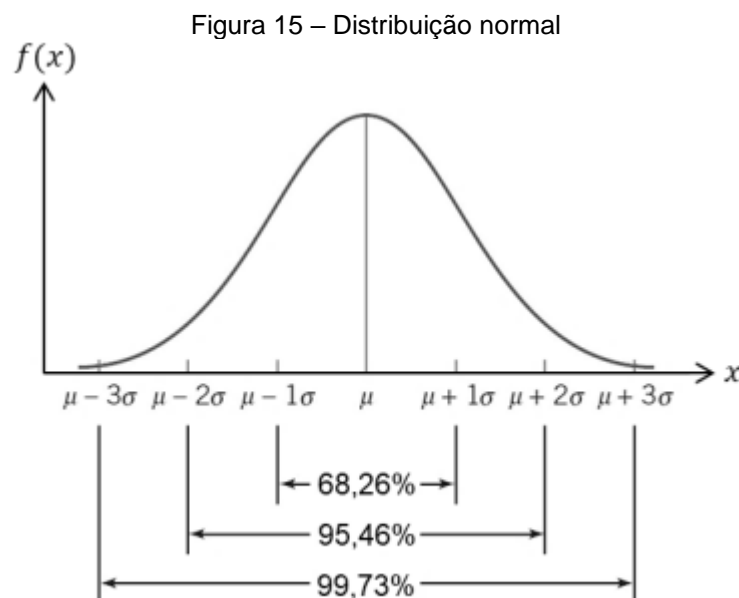
Após o rastreamento de raias e a formação das séries temporais, o próximo passo para a identificação de faltas é a detecção de alterações dos históricos de amplitudes. A assinatura magnética do gerador tende a se manter dentro de um

padrão e, caso ocorram mudanças nos indicadores avaliados, como a amplitude da harmônica, é provável que a condição do sistema também tenha sido alterada. Entretanto, isso não necessariamente indica uma falta, pois a simples alteração do ponto de operação do gerador, também altera as amplitudes das componentes harmônicas do campo magnético medido.

#### 4.3.1 Análise de séries temporais

Para que a estacionariedade da série seja quantificada, indicadores estatísticos, como a dispersão podem ser utilizados. A distribuição normal possui características vantajosas para a determinação de uma região de confiança da variável monitorada.

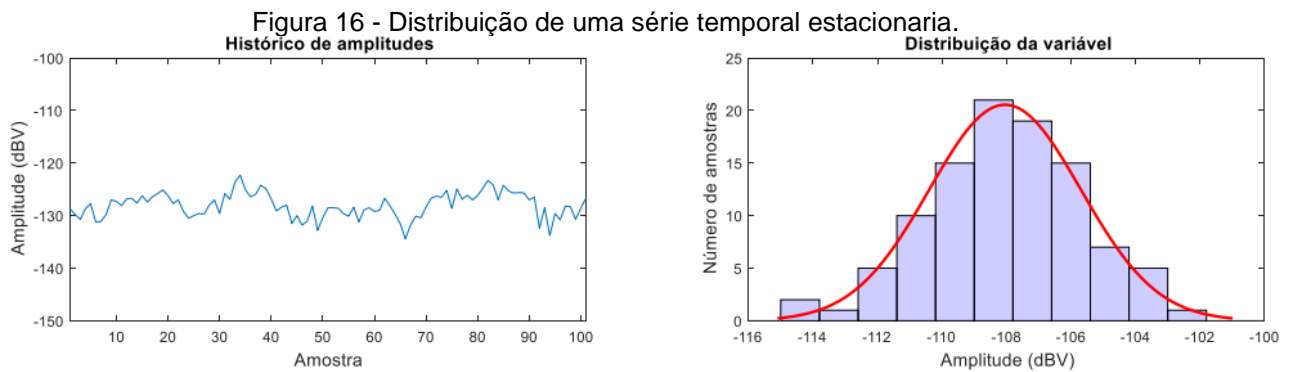
A distribuição normal pode ser observada em diversos fenômenos da natureza, como a distribuição da altura humana, por exemplo. Essa distribuição consiste em uma curva simétrica em torno da média. A maioria das ocorrências se concentra próximas da média e a probabilidade de ocorrência diminui ao se distanciar da média. Dois principais parâmetros se destacam, a média ( $\mu$ ), que define o centro da curva e o desvio padrão ( $\sigma$ ), que determina a dispersão dos dados com relação à média. A forma característica dessa distribuição, em formato de sino pode ser observado na Figura 15.



Fonte: Adaptada de Montgomery (2019)

A partir da Figura 15 pode-se inferir que, se a variável apresenta uma distribuição normal, 68,26% dos dados estarão entre os limites definidos pela média mais ou menos uma vez o desvio padrão ( $\mu \pm \sigma$ ). Ao mesmo tempo, aproximadamente 99,73% dos dados estarão no intervalo  $\mu \pm 3\sigma$ . Esses intervalos podem ser utilizados para prever a ocorrência de amostras futuras desta variável.

A distribuição de séries temporais estacionárias pode ser vista como uma distribuição normal. A Figura 16 ilustra a amplitude de uma componente amplitude da frequência fundamental mecânica obtida do sinal do campo magnético em um ensaio com um gerador síncrono. Nota-se que esta componente possui um comportamento estacionário e a distribuição das amostras pode ser aproximada por uma distribuição normal.



Fonte: Grillo (2024).

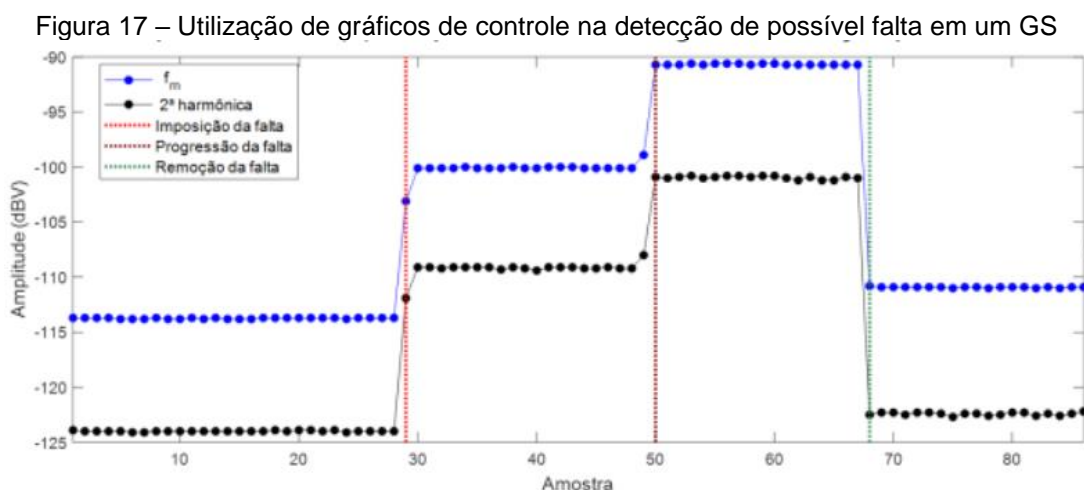
Essa aproximação, permite a aplicação de diversas técnicas estatísticas, incluindo o uso de gráficos de controle. Essa estratégia, além de simples e eficiente no monitoramento de séries temporais, possibilita a identificação de anomalias. Um dado pode ser considerado anômalo quando se encontra fora do intervalo definido pela média mais ou menos três vezes o desvio padrão ( $\mu \pm 3\sigma$ ).

### 4.3.2 Aplicação de gráficos de controle

A utilização de gráficos de controle é uma abordagem consolidada no monitoramento de processos, permitindo a identificação de anomalias com base em estatísticas descritivas das séries temporais. No contexto deste trabalho, os gráficos de controle são aplicados para analisar o comportamento das amplitudes de cada harmônicas de frequência do campo magnético externo ao gerador.

A aplicação de gráficos de controle está altamente relacionada com a distribuição normal, visto que utiliza os mesmos indicadores estatísticos observados nesta distribuição. Uma região de normalidade é definida utilizando as relações de média e desvio padrão, isto é, um dado é considerado anômalo se estiver fora do intervalo ( $\mu \pm 3\sigma$ ).

Ao avaliar defeitos, como as faltas estudadas neste trabalho, é interessante que a região de normalidade seja definida como a média dos valores obtidos enquanto a máquina está sadia, pois os parâmetros da máquina devem estar dentro de uma faixa estável e previsível. A média desses valores reflete a linha de base, ou o comportamento esperado da máquina, o que facilita a detecção de anomalias. Além disso são definidos dois limites de controle, correspondentes a média mais ou menos três desvios padrões, chamados de Limite Superior de Controle e Limite Inferior de Controle, respectivamente. A Figura 17 ilustra um exemplo da utilização de gráficos de controle na detecção de uma possível falta em um GS.



Fonte: Adaptado de Grillo (2024)

No caso de amostras ultrapassarem esses limites, é provável que esteja ocorrendo um defeito na máquina se esta estiver operando em regime permanente. Entretanto, não é incomum a ocorrência de falsos positivos. Portanto, para mitigar



esse fenômeno, foi definido um número mínimo de amostras, que depende do número de amostras totais, que ultrapassam esses limites para que determinada harmônica indique uma falta.

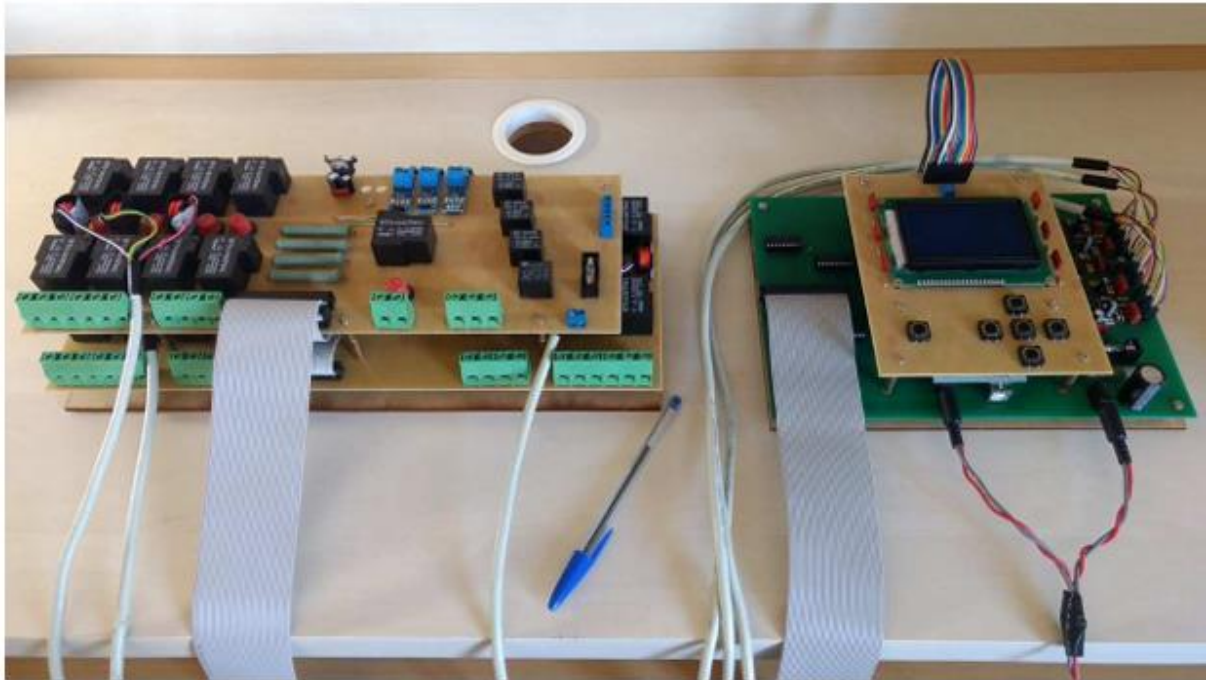
## **5 SISTEMA DE IMPOSIÇÃO DE FALTAS EM GERADORES SÍNCRONOS**

Nesta seção serão mostrados dois sistemas de imposição de faltas compatíveis com a bancada disponível do GRUCAD. O primeiro sistema foi desenvolvido em 2018, no escopo do trabalho de conclusão de curso de Hesmann (Hesmann, 2018) e utiliza principalmente relés eletrônicos. Já o aprimoramento proposto, desenvolvido no âmbito deste trabalho, tende a ser mais robusto e utiliza componentes analógicos como um reostato e contadores.

### **5.1 SISTEMA ELETRÔNICO DE IMPOSIÇÃO DE FALTAS**

No GRUCAD, foi desenvolvido um sistema para a imposição de faltas em geradores, conforme descrito por Hessmann (2018). Esse sistema utiliza um microcontrolador, uma Interface Homem-Máquina (IHM), relés e sensores de corrente elétrica. Ele é composto por duas placas distintas: uma placa de potência, responsável pelos chaveamentos necessários para a imposição das faltas, e uma placa de controle, na qual o tratamento do sinal de corrente elétrica é realizado. Nesta placa de controle, encontram-se o microcontrolador e a IHM, que têm a função de determinar a falta a ser imposta e sua severidade. A Figura 18 ilustra o sistema de imposição montado.

Figura 18 - Sistema de imposição de faltas eletrônico



Fonte: Hesmann (2018)

Este circuito permitia a imposição de faltas no campo e na armadura, assim como o curto-circuito de lâminas no núcleo do gerador. O sistema foi utilizado durante muitos anos. Porém, devido a alguns defeitos nos sensores de corrente, a placa se encontra em desuso.

## 5.2 SISTEMA DE IMPOSIÇÃO DE FALTAS ANALÓGICO

A imposição de defeitos nos geradores é uma tarefa relativamente perigosa e complexa. Assim, é necessário que um sistema robusto e pouco suscetível a falhas seja aplicado, evitando um desgaste maior do que o necessário para a máquina e, principalmente, diminuindo o risco à vida dos usuários.

Além disso, o sistema eletrônico ou manual para imposição de defeitos manipulava diretamente os *taps* disponíveis nos bornes da placa de ligação dos geradores. Assim o defeito era aplicado de maneira brusca e em níveis específicos. Para que os ensaios reproduzam a realidade com maior fidelidade, é interessante que a falta seja imposta de maneira gradual. Concomitantemente, é crucial desenvolver um método para controlar e quantificar a falta, pois ao utilizar os *taps*, um número definido de espiras deixa de ter influência na força magnetomotriz do gerador, o que não acontece com este novo método de imposição de faltas.

Para esse trabalho de conclusão de curso foi desenvolvido um sistema que leva em consideração estes dois fatores: aplicação de faltas graduais e robustez do sistema.

### 5.2.1 Aplicação de faltas graduais no enrolamento de campo

As faltas incipientes se desenvolvem de maneira progressiva no gerador. Portanto, para emular uma falta real, é necessário considerar a evolução temporal do defeito que causa uma alteração e um desbalanceamento na força magnetomotriz do gerador.

Para isso, foi aplicada uma abordagem distinta da utilizada anteriormente, no desenvolvimento do método de imposição de faltas descrito neste trabalho. Essa nova metodologia visa emular o comportamento progressivo das faltas incipientes, considerando sua evolução gradual e os efeitos iniciais de baixa severidade. Essa estratégia proporcionando uma simulação mais realista e precisa do processo de falta no gerador.

Observando a equação ((3.4), apresentada no capítulo 3, observa-se que para alterar a força magnetomotriz, ou seja, aplicar uma falta em um polo do gerador, é necessário alterar o número de espiras da bobina ou a corrente que passa por essa bobina. A alteração no número de espiras pode ser feita através dos *taps*. Dessa forma, poucos níveis de falta podem ser impostos e a severidade da falta já começa relativamente alta.

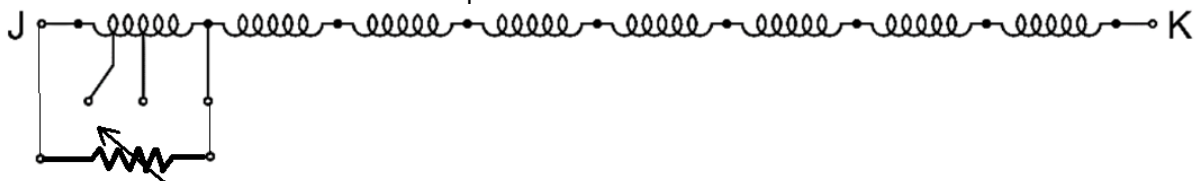
Uma alternativa é, então, alterar a corrente que flui na bobina. Isso é possível ao colocar uma resistência em paralelo com os *taps* disponíveis na bancada. Dessa forma, uma parte da corrente deixa de fluir pela bobina e passa a percorrer essa resistência. A relação entre as correntes que passam na resistência em paralelo e na bobina podem ser equacionadas a partir de um divisor de corrente, definido em (5.1), em que  $i_2$  é a corrente que flui, em Amperes, em um resistor  $r_2$  medido em Ohms e  $i_1$  é a corrente, em Amperes, que flui em um resistor  $r_1$ , medido em Ohms. Como o enrolamento de campo do gerador é alimentado por corrente contínua, a princípio os efeitos de indutância podem ser desprezados.

$$i_2 = \frac{r_1}{r_2} i_1 \quad (5.1)$$

Para que a corrente seja alterada progressivamente, e a falta tenha características incipientes, é importante que a resistência em paralelo com a bobina em falta mude lentamente. É importante lembrar que quanto menor essa resistência paralela, maior a corrente que a percorre, reduzindo a corrente que passa pelo enrolamento, diminuindo também a FMM desse polo. Portanto, no caso das espiras do rotor, é possível colocar uma resistência variável em paralelo com um de seus polos, assim, conforme a resistência adicionada diminui, menos corrente percorre a bobina, caracterizando uma falta, que ocorre proporcionalmente conforme a alteração dessa resistência.

A Figura 19 ilustra, idealmente, como o método pode ser aplicado nos enrolamentos do rotor da máquina de oito polos da bancada do GRUCAD. Nesse caso, é possível que a falta seja aplicada ao conectar a resistência variável em paralelo com os *taps* de 20%, 50% e 100% do número de espiras de um polo do campo, limitando assim o nível da falta a ser imposto, caso a resistência variável chegue a zero.

Figura 19 – Enrolamento de campo do gerador com resistência variável em paralelo com um dos polos



Fonte: Adaptado de Equacional (2014)

Para controlar o nível da falta imposta e comparar com o sistema de imposição anterior, é necessário achar um método equivalente, que relacione as duas grandezas alteradas em cada método, a corrente e o número de espiras. A equação (3.4), apresentada no capítulo 3, mostra que a força magnetomotriz é diretamente proporcional ao número de espiras da bobina e à corrente que flui por ela. Isso significa que, de maneira simplificada, retirar 20% das espiras de um polo, mantendo o mesmo valor de corrente total, é o equivalente a reduzir em 20% o valor da força magneto motriz. Em se tratando do método de imposição progressiva da falta, a corrente vai se dividir e uma parcela vai fluir pelo resistor variável conectado em paralelo com a fração da bobina, que neste exemplo corresponde a 20%. Logo, uma maneira de determinar o nível da falta é observando proporção entre a corrente

que flui pela bobina e a parcela correspondente à falta progressiva, que flui pelo resistor. Para isso, são necessários dois amperímetros.

Para o caso onde a corrente de campo é controlada e fixa, como em ensaios onde não há variação do ponto de operação da máquina, é possível definir o nível da falta através de um modelo de divisor de corrente aplicado ao circuito apresentado na Figura 19, que está equacionado em (5.2), onde  $r_{eq}$  é a resistência equivalente da associação paralela entre o polo completo e a resistência variável,  $r_{paralelo}$  é o valor da resistência variável (em Ohms),  $I_{paralelo}$  é a corrente que flui por essa resistência (em Amperes), e  $I_{total}$  é a corrente total do circuito. Essa equação é interessante para definir os limites em que a resistência adicional pode variar.

$$I_{paralelo} = \frac{r_{eq}}{r_{paralelo}} I_{total} \quad (5.2)$$

Analisando matematicamente a equação (3.4), que representa a FMM de um polo saudável, entende-se que um polo com defeito pode ser caracterizado pela seguinte equação (5.2).

$$FMM_{polo\ em\ falta} = N(I_{total} - I_{paralelo}) \quad (5.3)$$

Manipulando as equações (3.4), apresentada no capítulo 3, e (5.3), a equação (5.4) é obtida, evidenciando a proporcionalidade entre a severidade da falta e a razão entre  $I_{paralelo}$  e  $I_{total}$ , que representa a perda de FMM do polo no instante da falta.

$$1 - \frac{FMM_{polo\ em\ falta}}{FMM_{nominal}} = \frac{I_{paralelo}}{I_{total}} \quad (5.4)$$

Uma maneira de enxergar a relação  $\frac{FMM_{polo\ em\ falta}}{FMM_{nominal}}$  é a força magnetomotriz remanescente relativa no polo durante a falta. Além disso, o nível da

falta pode ser visto como a diferença entre a força magnetomotriz nominal e força magnetomotriz remanescente no polo, relativas à força magnetomotriz nominal.

$$\text{Nível de falta} = \frac{I_{\text{paralelo}}}{I_{\text{total}}} \quad (5.5)$$

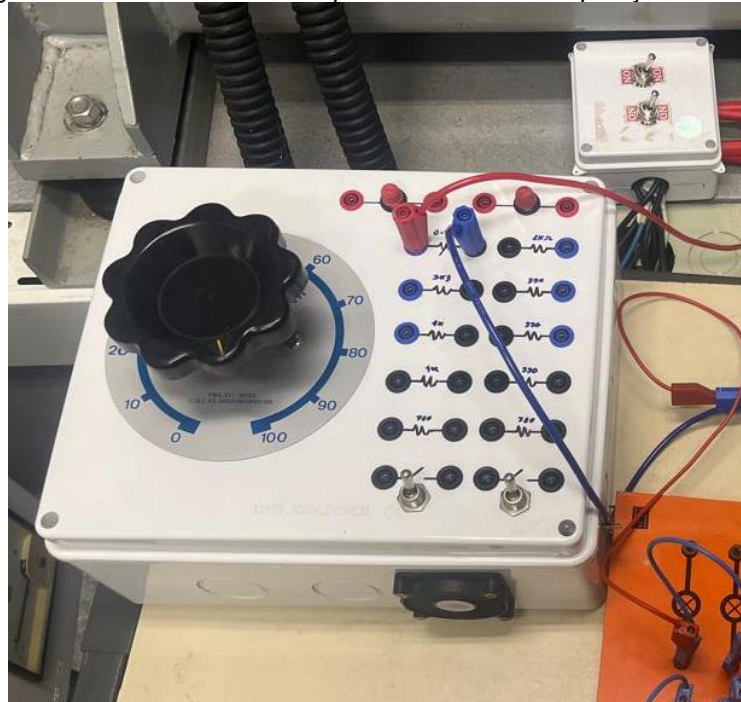
A partir desses conceitos a aplicação da falta é feita de uma maneira mais controlada e progressiva, representando uma situação mais compatível com a realidade. A quantificação da falta garante que os ensaios sejam confiáveis e reproduzíveis. Essa metodologia fornece bases sólidas para realização de ensaios com imposição de defeitos.

### 5.2.2 Desenvolvimento do sistema de imposição de faltas no rotor

Um sistema de imposição de defeitos em máquinas deve ser preciso e robusto, para prevenir danos permanentes na máquina, evitar que o sistema entre em colapso, já que está inserido em condições críticas, e, principalmente, para não colocar os operadores dos ensaios em risco.

Para prevenir danos ao dispositivo de imposição durante o ensaio, decidiu-se utilizar, no circuito de comando do sistema, componentes simples, mas resistentes, comuns na eletrotécnica, como chaves, relés de proteção e fusíveis. Para o controle da falta, foi empregado um reostato de 700 Ohms, colocado em paralelo com um dos polos do gerador, com potência nominal de 250 Watts e capacidade de corrente de aproximadamente 600 mA. A capacidade de corrente é uma grandeza importante a ser considerada, pois ela limita a severidade da falta imposta. Conforme apresentado na Tabela 1, a corrente de campo nominal do gerador de oito polos é de 3,5 A. Portanto se o reostato operar no limite, a severidade máxima da falta é de aproximadamente 20%. Para que o reostato esteja protegido contra sobrecorrentes, uma resistência adicional fixa é conectada em série. O reostato utilizado pode ser observado na Figura 20.

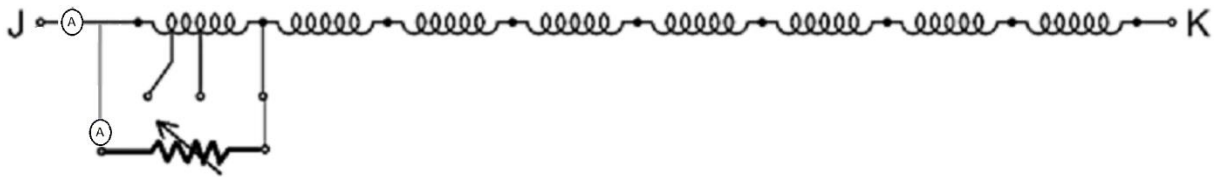
Figura 20 – Reostato utilizado para o sistema de imposição



Fonte: Autor (2024)

Também são utilizados dois medidores de corrente que monitoram  $I_{paralelo}$  e  $I_{total}$ . Essas medidas, não só determinam o nível da falta como o monitoramento de  $I_{paralelo}$  garante a integridade do reostato e conseqüentemente do circuito todo. A Figura 21 ilustra a montagem do circuito.

Figura 21 - Enrolamento de campo do gerador com resistência variável em paralelo com um dos polos com amperímetros posicionados



Fonte: Autor (2025)

Para a realização dos ensaios de validação do mecanismo de imposição de faltas progressivas desenvolvido neste trabalho, todas as conexões e medições foram realizadas manualmente nos terminais do gerador. No entanto, visando a automação do sistema, foi elaborado um projeto para uma possível adaptação do circuito de acionamentos elétricos da bancada a fim de automatizar a aplicação do método tanto para a máquina de dois polos quanto para a de oito polos.



O circuito desenvolvido aproveita dois outros medidores de corrente que já estavam instalados na bancada para a medição das correntes de campo de cada um dos geradores (Figura 22). Assim, foram projetadas adaptações para permitir que, quando um dos geradores é ensaiado, o seu medidor original continue monitorando a corrente total, enquanto o medidor que normalmente monitora a corrente de campo do outro gerador, passe a medir a corrente que flui pelo reostato.

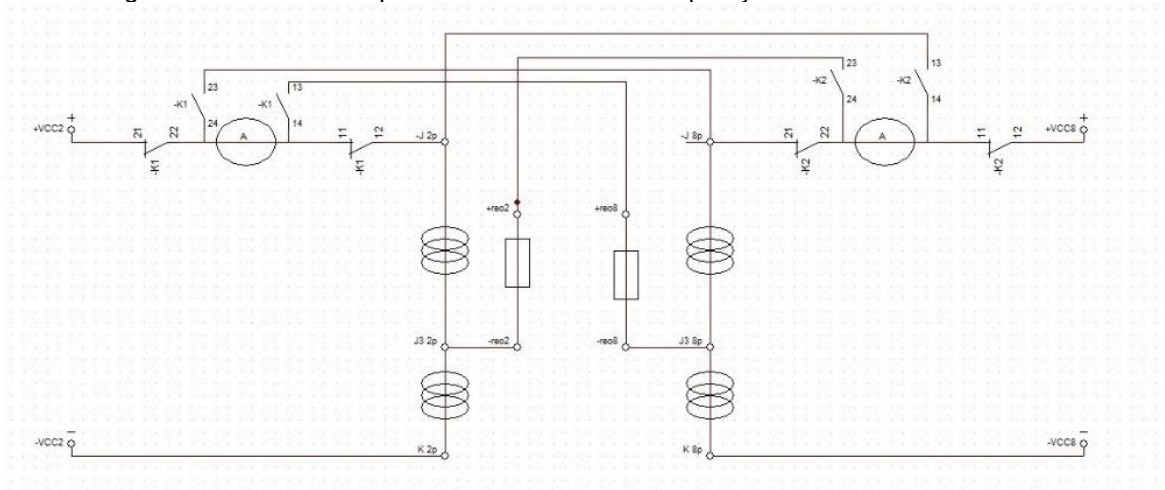
Figura 22 – Medidores de corrente de campo da bancada de ensaios



Fonte: Autor (2024)

A Figura 23 mostra o circuito de potência projetado para automatização da imposição de faltas. Na imagem, estão inseridos os amperímetros originais da bancada, a resistência variável e os contatos Normalmente Abertos (NA) e Normalmente Fechados (NF), que comutam conforme o gerador que está sendo ensaiado.

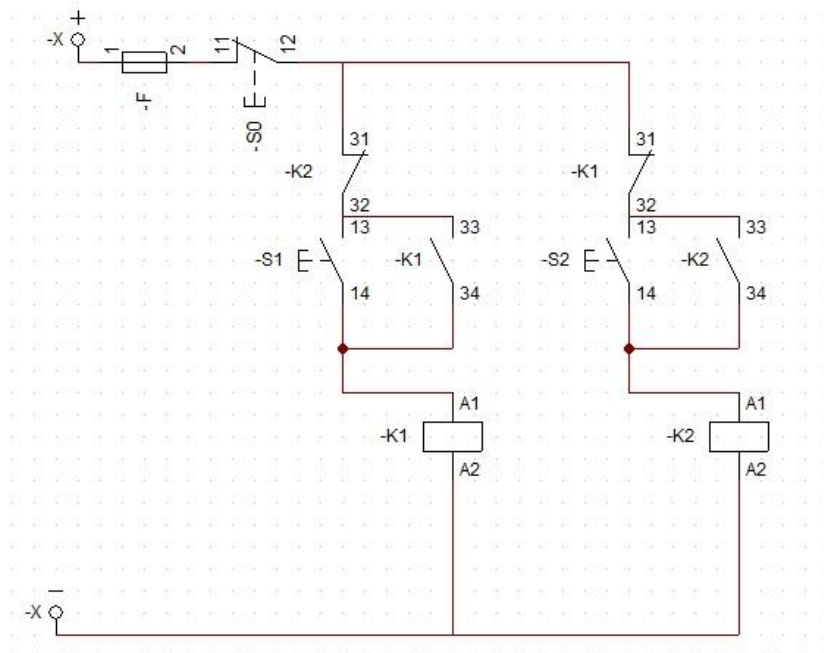
Figura 23 – Circuito de potência do sistema de imposição de faltas



Fonte: Autor (2024)

Para a parte de comandos, foi projetada uma solução utilizando botoeiras e contatores com intertravamento, que impedem o acionamento das duas máquinas ao mesmo tempo. O circuito de comandos é ilustrado na Figura 24. Por falta de recursos este projeto de automação não foi implementado. No entanto, um sistema análogo e simplificado foi provisoriamente instalado para a realização dos ensaios. Foram utilizadas chaves seletoras manuais de múltiplos contatos para fazer as comutações.

Figura 24 – Circuito de comando do sistema de imposição de faltas



Fonte: Autor (2024)

## 6 ENSAIOS REALIZADOS

Nesta seção são os descritos ensaios realizados no presente trabalho. Isto inclui os objetivos do ensaio, a preparação realizada e os procedimentos adotados para a realização dos testes. Adicionalmente, também são apresentados os resultados obtidos.

### 6.1 ENSAIOS DE COMPATIBILIDADE MAGNÉTICA

Os sensores de campo magnético por indução utilizados nesse trabalho captam o campo do meio no qual estão inseridos. Por esta razão, existe a possibilidade desses sensores captarem o campo magnético gerado por outros equipamentos localizados na vizinhança do gerador avaliado. Esse ruído eletromagnético pode ser especialmente prejudicial à análise quando o gerador opera na mesma frequência da rede de distribuição, 60 Hz. Além disso, em altas frequências, região do espectro na qual as amplitudes das harmônicas já são mais baixas, o ruído eletromagnético proveniente de equipamentos vizinhos, ou mesmo dos cabos de alimentação da bancada, também pode prejudicar a análise. Assim, com o intuito de avaliar a necessidade de blindagem eletromagnética foi realizado um ensaio com um único sensor de campo, medindo o campo magnético em diversos pontos no entorno do gerador.

Com o objetivo de avaliar uma possível influência do campo magnético gerado pelos condutores de alimentação do gerador nas medições realizadas no próprio gerador, posicionou-se o sensor no eletroduto que leva esses cabos à máquina. Foram realizadas diversas medições, afastando gradativamente o sensor dos cabos de alimentação em cada uma delas. A Figura 25, a Figura 26 e a Figura 27 mostram o posicionamento do sensor durante os ensaios.

Figura 25 – Medição do campo externo ao tubo que leva os cabos de alimentação da bancada



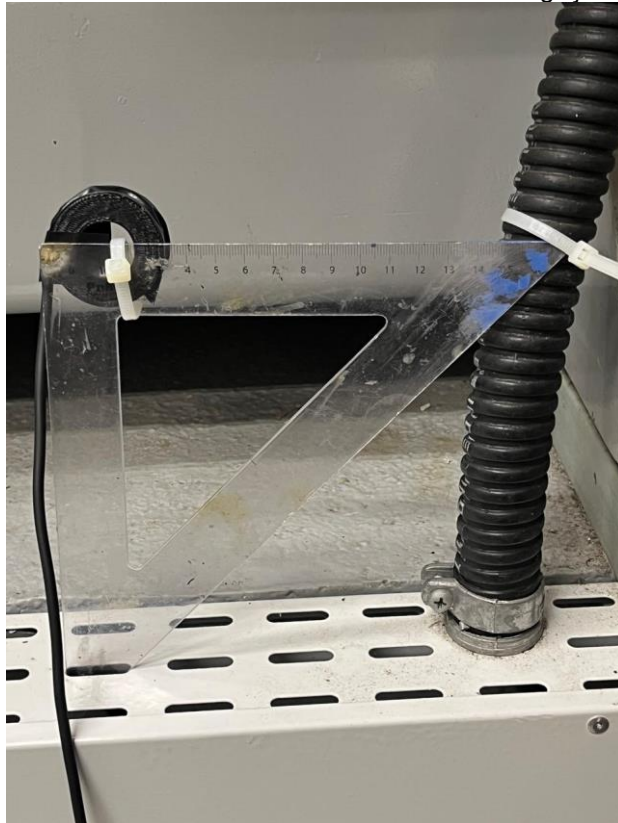
Fonte: Autor (2024)

Figura 26 – Posicionamento do sensor próximo à caixa de ligação do gerador



Fonte: Autor (2024)

Figura 27 - Posicionamento do sensor mais afastado à caixa de ligação do gerador



Fonte: Autor (2024)

Ao final dos ensaios, constatou-se que o campo diminuiu proporcionalmente à distância do sensor ao tubo, o que já era um fenômeno esperado. Ficou evidente então, que o campo magnético produzido pelos cabos de alimentação próximos ao gerador não tem amplitude suficiente para alterar a assinatura magnética do campo magnético externo ao gerador, podendo ser considerado desprezível.

## 6.2 ENSAIOS COM IMPOSIÇÃO DE DEFEITOS

Os ensaios com imposição de defeitos foram realizados em duas etapas. Primeiramente foi realizado um ensaio mais simples com menos níveis de falta, em que o gerador não estava sincronizado à rede. O objetivo desse ensaio foi de simplesmente testar a montagem do sistema de imposição de faltas. Depois de validar o sistema, foi realizado um ensaio com imposição de defeitos, cujo objetivo era detectar alterações na assinatura magnética da máquina e, por fim, validar o sistema e o método de detecção de anomalias.

### 6.2.1 Ensaios sem sincronização à rede

Testes iniciais indicaram que o sistema estava pronto para operar, entretanto, durante o ensaio, percebeu-se que as correntes de campo não se comportavam como o esperado, e apesar da alimentação ser contínua, as correntes estavam variando no tempo. Dessa forma, o controle da severidade da falta era muito difícil. Portanto, duas sondas de corrente foram adaptadas de modo que possam ser conectadas no mesmo sistema de aquisição que os sensores de campo. A Figura 28 demonstra as sondas de corrente medindo a corrente total e a corrente do reostato durante um ensaio.

Figura 28 – Sondas de corrente medindo durante realização do ensaio



Fonte: Autor (2024)

A partir dessa adaptação, o ensaio foi realizado com sucesso. Foram utilizados três canais de aquisição, conforme observado na Tabela 2.

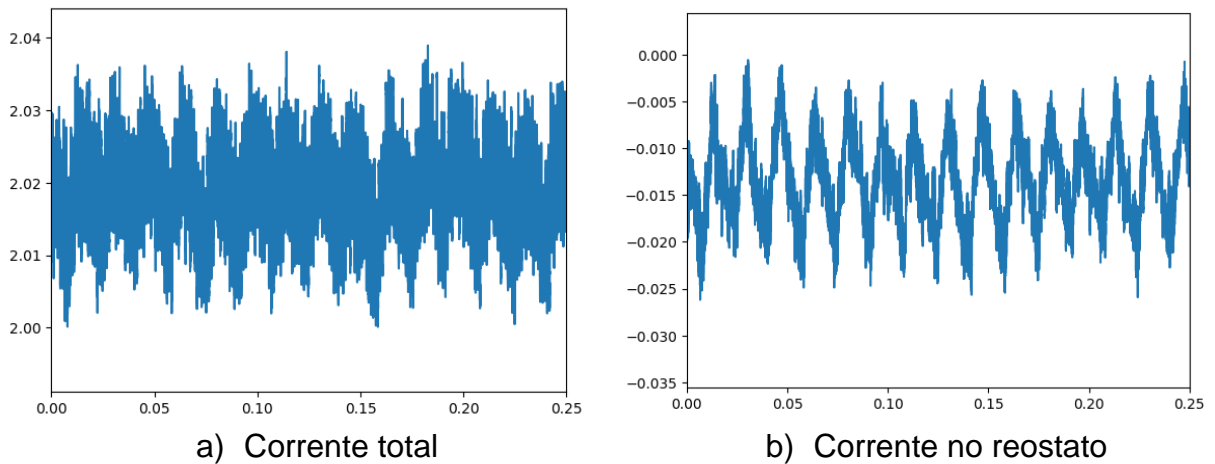
Tabela 2 – Configuração dos canais

CH1	Sonda de corrente total
CH2	Sonda de corrente no reostato
CH3	Sensor de campo

Fonte: Autor (2024)

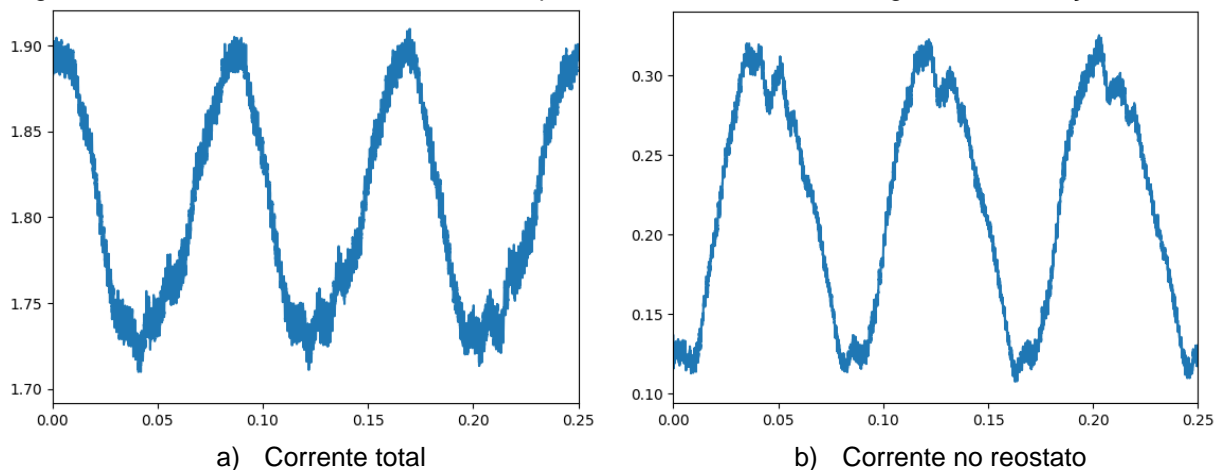
Foram realizados ensaios com a máquina de oito polos operando em 50 Hz com e sem carga. Para cada ensaio foram observadas cinco condições da máquina, isto é, a máquina sadia e mais quatro pontos de falta. As medidas de corrente podem ser observadas nas figuras 29, 30, 31 e 32.

Figura 29 – Corrente no enrolamento de campo medida no ensaio sem carga, na condição sadia.



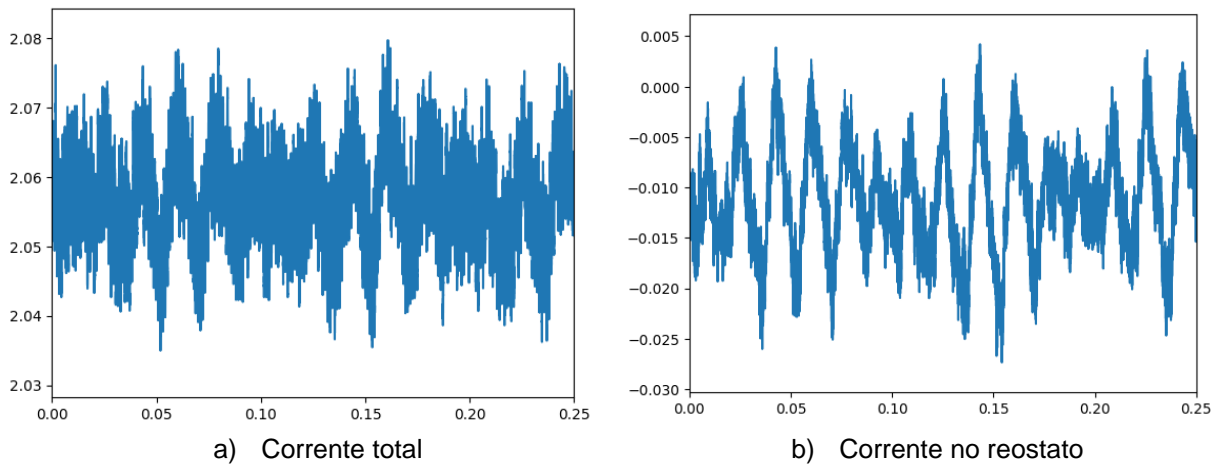
Fonte: Autor (2024)

Figura 30 - Corrente no enrolamento de campo medida no ensaio sem carga, numa condição de falta



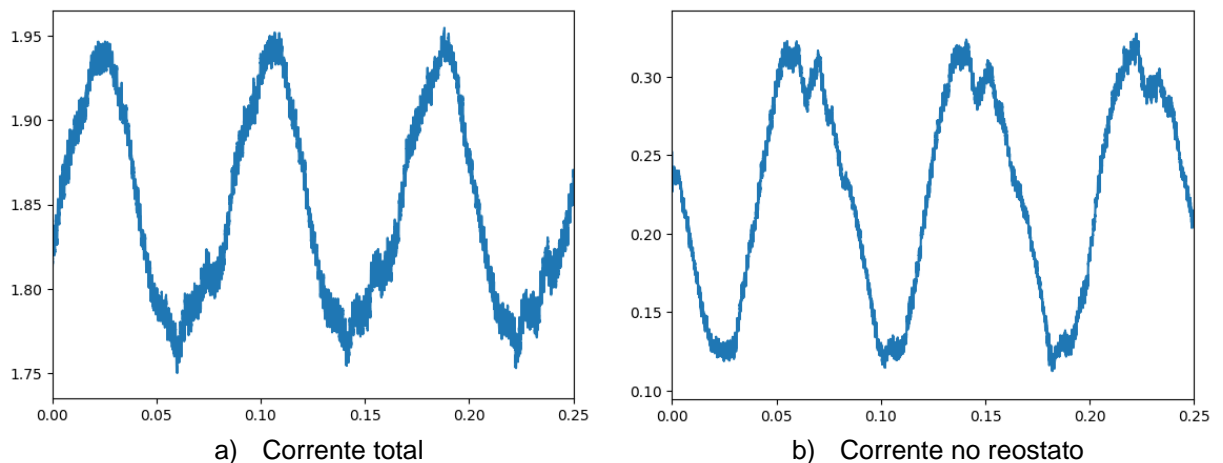
Fonte: Autor (2024)

Figura 31 – Corrente no enrolamento de campo medida no ensaio com carga, na condição sadia



Fonte: Autor (2024)

Figura 32 – Corrente no enrolamento de campo medida no ensaio sem carga, numa condição de falta



Fonte: Autor (2024)

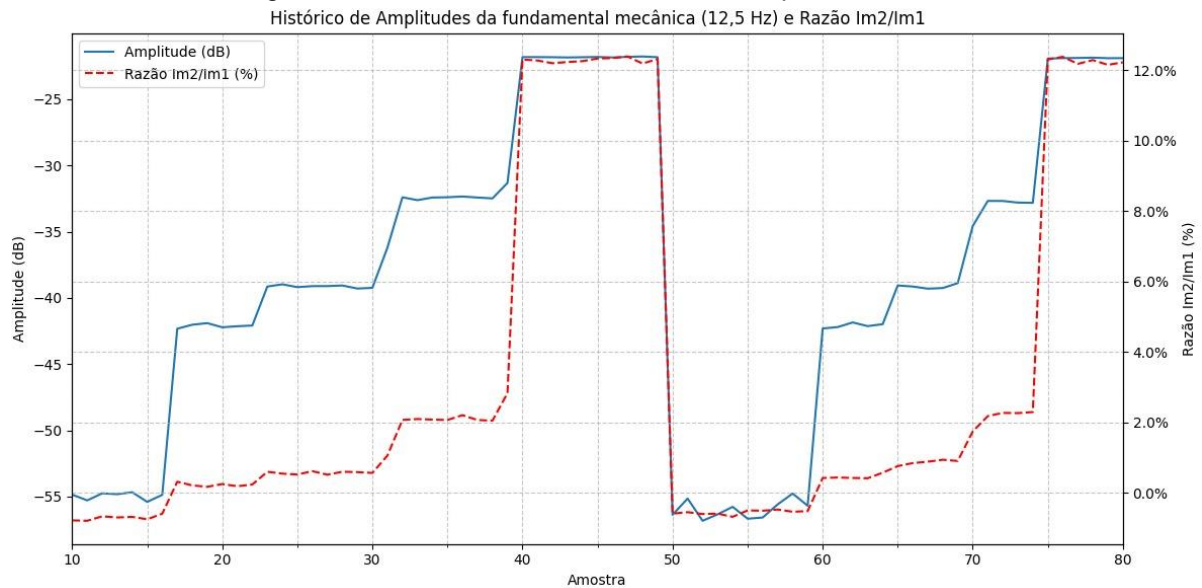
Os dados apresentados nas figuras anteriores mostraram, em condições de falta, o aparecimento da harmônica fundamental mecânica (12,5 Hz no caso da máquina operando em 50 Hz) nas correntes de campo no GS que fluem no reostato e no polo da máquina, independente da carga. Contudo, a análise dessas correntes foge do escopo desse trabalho.

Os dados obtidos do ensaio são os vetores de tensão, referentes a cada canal, descritos na Tabela 2 – Configuração dos canais. Para avaliar os ensaios são utilizados os valores médios das correntes medidas, para determinar a severidade da falta em cada instante, e o histórico de harmônicas do campo magnético externo ao gerador. O objetivo desse ensaio era, nesse primeiro momento, avaliar a



viabilidade do sistema. Por essa razão, menos níveis de falta foram impostos. A figura 33 ilustra o comportamento do campo e das correntes durante o ensaio.

Figura 33 – Histórico de harmônicas obtido a partir do ensaio



Fonte: Autor (2024)

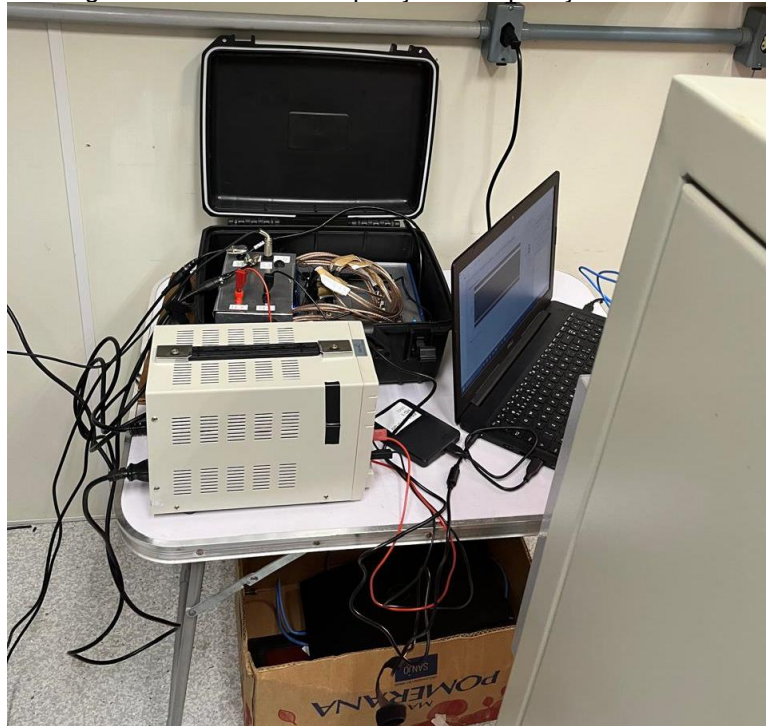
A partir da Figura 33, é possível perceber que a imposição de faltas aplicada a partir do método proposto permite a imposição de mais níveis do que o sistema anteriormente utilizado. Nestes ensaios, por exemplo, foram impostos quatro níveis de falta, enquanto com o método utilizando os *taps*, era possível impor apenas três níveis.

### 6.2.2 Ensaios com sincronização à rede

Com o objetivo de validar o método e o sistema de imposição de faltas, outro ensaio foi realizado, dessa vez com o gerador de oito polos sincronizado à rede de distribuição de 60 Hz. Foram realizadas diversas aquisições de cinco segundos, com 125 kHz de taxa de aquisição. A configuração dos canais da maleta é a mesma apresentada na Tabela 2. Além disso, aguardou-se até que o gerador atingisse o seu regime térmico. Para evitar a influência do ponto de operação no campo, o ensaio foi realizado com ponto de operação fixo em 500 Watts e com fator de potência unitário.

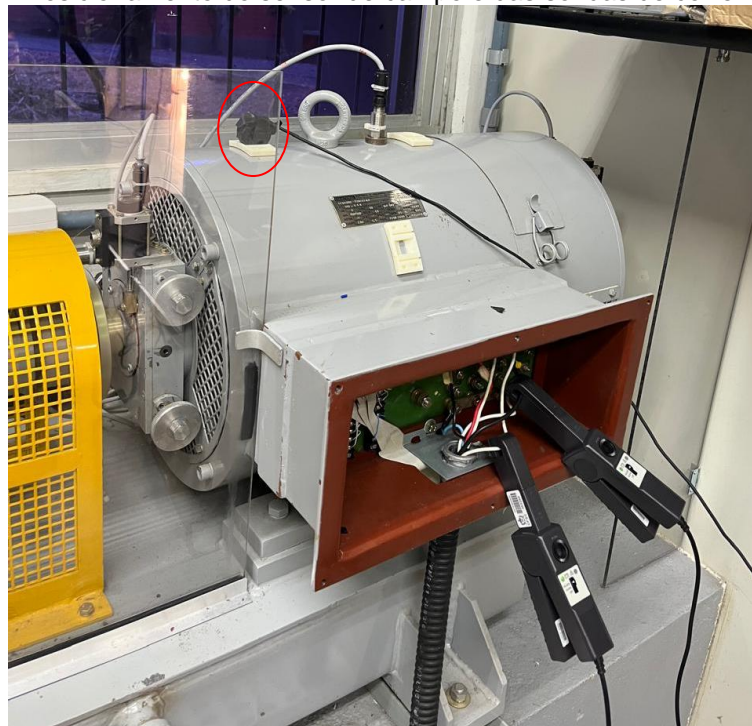
A Figura 34, a Figura 35 e a Figura 36 mostram, respectivamente, a maleta de aquisição, a posição do sensor e das sondas de corrente, e uma visão geral da bancada de ensaios.

Figura 34 – Maleta de aquisição em operação



Fonte: Autor (2024)

Figura 35 – Posicionamento do sensor de campo e das sondas de corrente



Fonte: Autor (2024)

Figura 36 – Visão geral do ensaio com imposição de faltas



Fonte: Autor (2024)

Após atingir o regime térmico foram realizadas 150 amostras com a máquina sadia. Em seguida, foram impostos 17 níveis de falta. A severidade da falta foi aumentada rotacionando levemente o eixo do reostato. Para cada nível foram realizada cinco aquisições. Por fim, foram realizadas mais 15 aquisições com a máquina novamente no seu estado sadio.

O objetivo deste ensaio era obter dados de campo magnético com uma falta progressiva e a partir desses dados conseguir identificar a ocorrência do defeito. As análises presentes nessa subseção são baseadas em gráficos de controle.

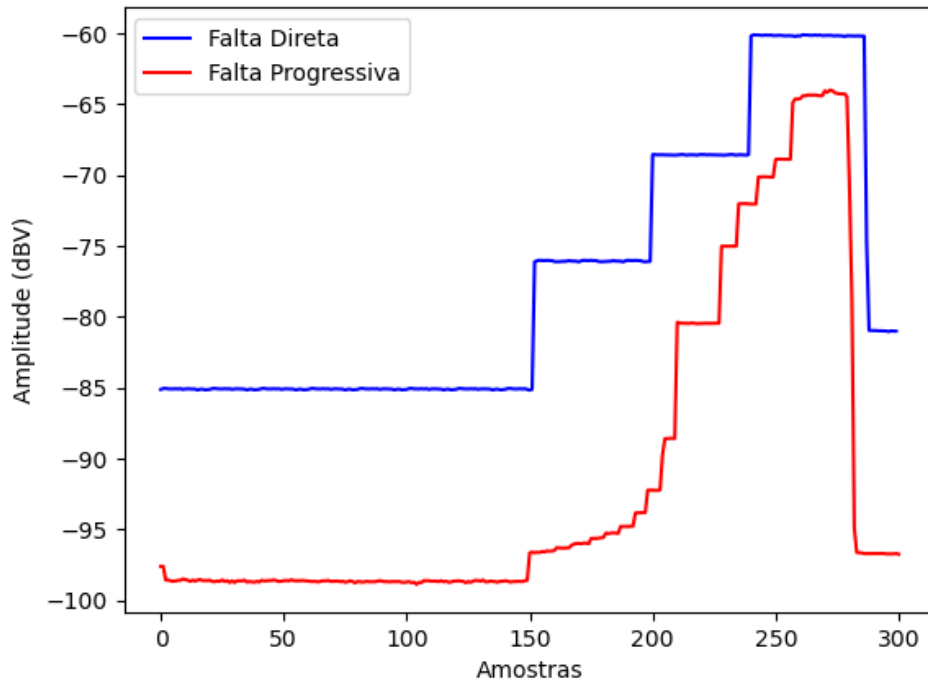
A partir da análise dos dados desse ensaio, é possível perceber que o sistema de imposição de faltas proposto possui uma capacidade melhor de representar faltas incipientes do que o método antigo, isso por dois fatores:

- 1) A falta é imposta com um nível de severidade muito mais baixo, ao contrário do método de alternância de *taps*, no qual a falta de curto-circuito no rotor já começa com uma perda de 20% na FMM do polo.
- 2) É possível impor diferentes níveis de falta, com pouca diferença entre um nível e o subsequente.

A Figura 37 e a Figura 38 comparam os dois métodos de imposição de faltas. É importante ressaltar que as figuras mostram ensaios diferentes com pontos de operação distintos e, portanto, a amplitude apresenta uma grande diferença.

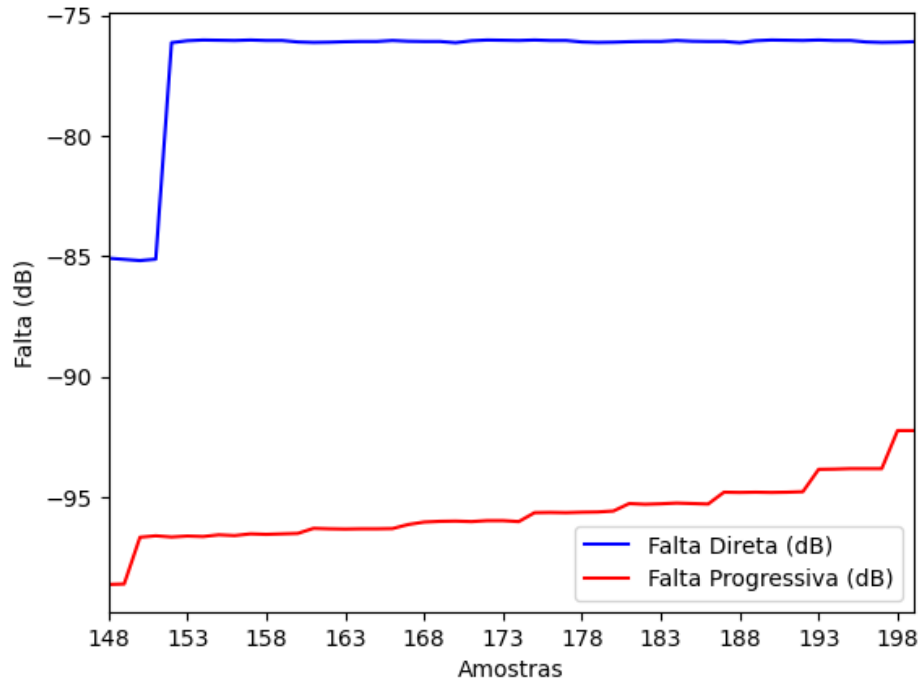
Contudo, como o intuito dessa comparação é mostrar a quantidade de níveis de falta que podem ser impostos com o novo sistema, essa discrepância não atrapalha nesse ponto da análise.

Figura 37 – Histórico para comparação entre os métodos de imposição de falta  
Harmônica de 15 Hz



Fonte: Autor (2024)

Figura 38 – Histórico para comparação entre os métodos de imposição de falta em detalhe  
Harmônica de 15 Hz



Fonte: Autor (2024)

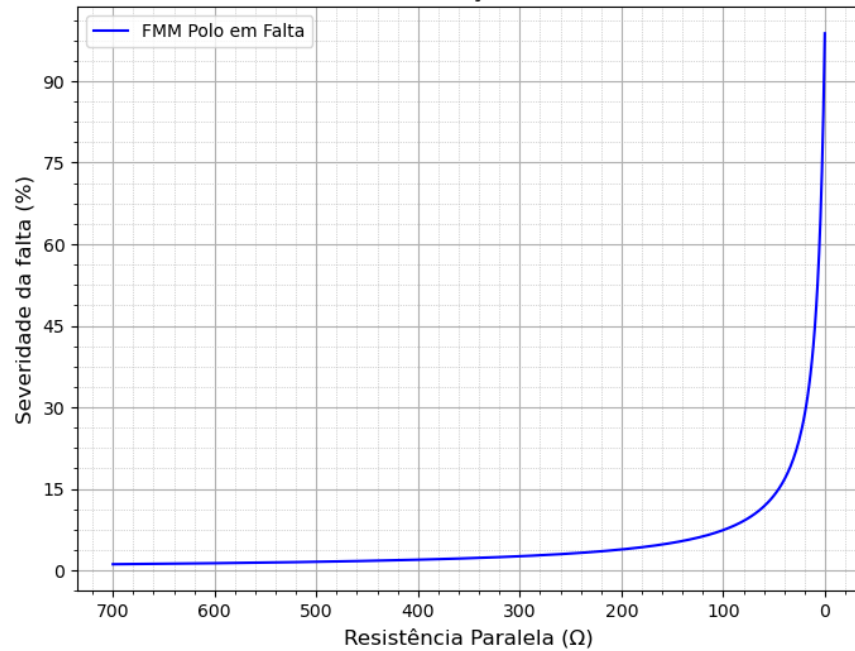
Comparando as duas curvas, é evidente que o método proposto, representado pela curva vermelha, apresenta um comportamento muito mais próximo de uma falta incipiente e gradual, além de possuir um nível de falta inicial mais baixo.

Uma característica da curva obtida a partir dos ensaios realizados para o presente trabalho é que, quanto maior a severidade da falta, mais difícil de controlar o defeito. Isso ocorre pois quanto menor a resistência do reostato, menor ainda se torna a associação paralelo equivalente entre o polo e o reostato, ao passo que cada Ohm começa a fazer mais diferença. Manipulando as equações apresentadas no capítulo 5, (5.2) e (5.4), a equação (6.1) é obtida e isso se evidencia ainda mais.

$$1 - \frac{FMM_{\text{polo em falta}}}{FMM_{\text{nominal}}} = \frac{r_{\text{polo}}}{r_{\text{polo}} + r_{\text{paralelo}}} \quad (6.1)$$

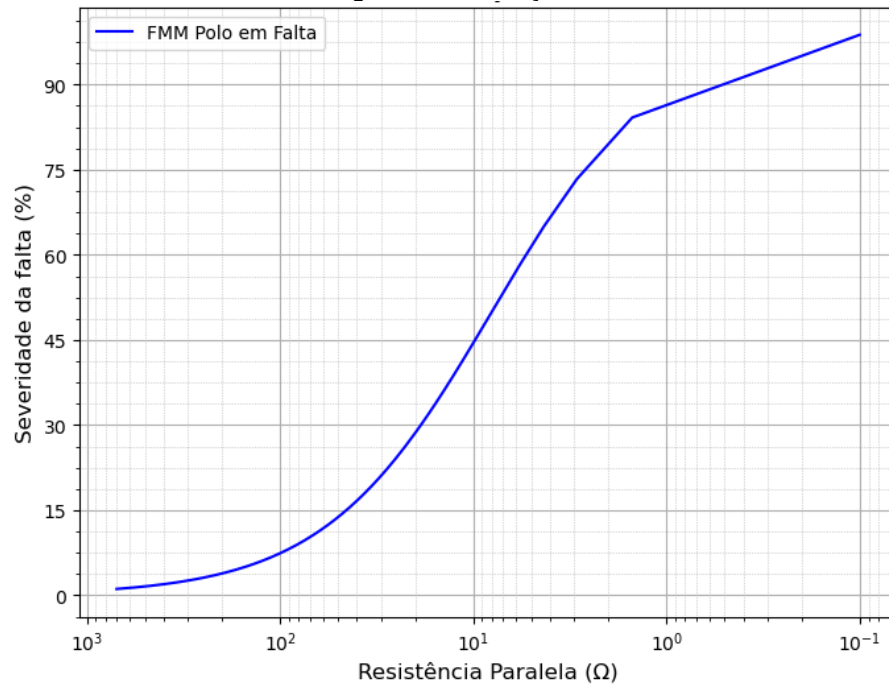
A Figura 39 e a Figura 40 apresentam o comportamento ideal da FMM variando conforme a resistência do reostato.

Figura 39 – Severidade da falta em função da resistência do reostato.



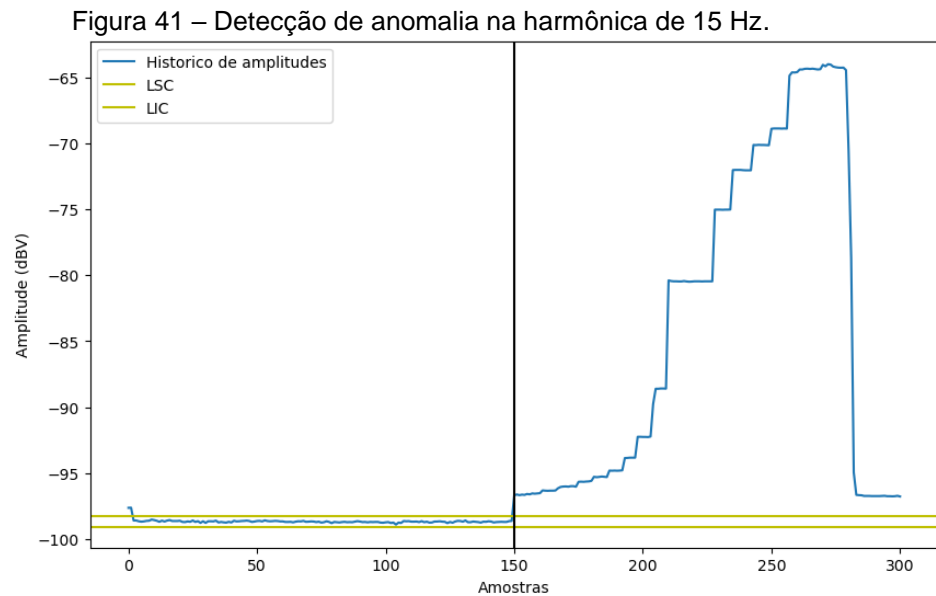
Fonte: Autor (2024).

Figura 40 – Severidade da falta em logaritmo em função da resistência do reostato.



Fonte: Autor (2024).

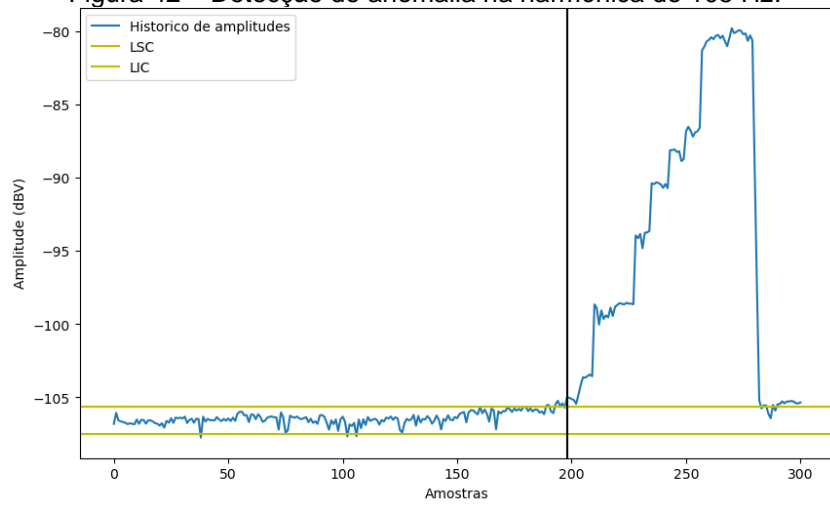
Com o histórico de amplitudes das componentes harmônicas do campo magnético externo em mãos, utilizou-se o método dos gráficos de controle, exposto na seção 4.3.2, para detectar anomalias que indicassem as faltas impostas. Os gráficos de controle construídos conseguiram identificar alterações no espectro em diversas oportunidades, muitas vezes num estágio inicial, como na Figura 41, que mostra a harmônica de 15 Hz. Nesse caso o defeito foi detectado logo que o reostato foi conectado em paralelo ao polo. Isso ocorre uma vez que o reostato não é ideal e uma pequena parcela da corrente destinada originalmente ao polo flui por ele. Isso mostra o poder do método de detecção de faltas, pois mesmo quando a FMM do polo sofre poucos efeitos da falta, os gráficos de controle já são capazes de detectar essa falta.



Fonte: Autor (2024).

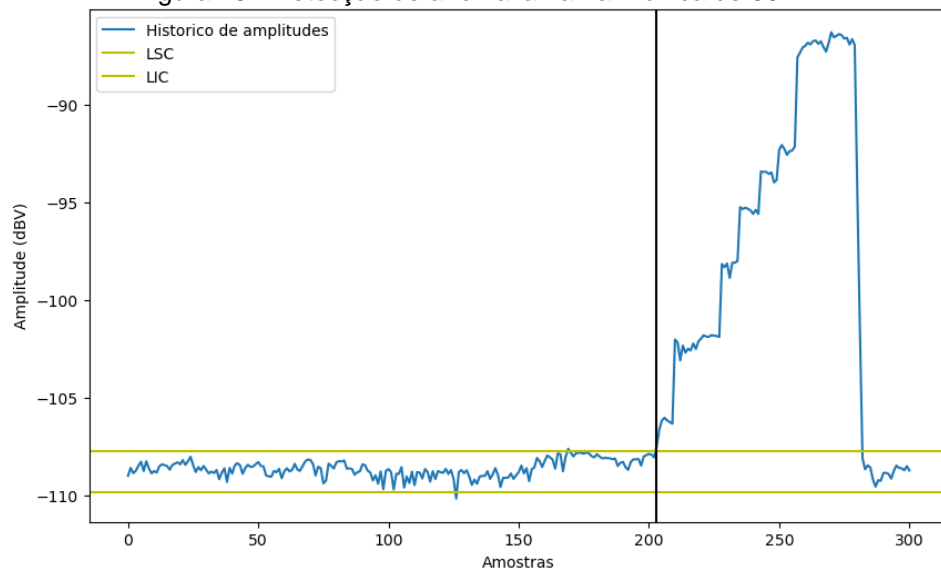
As figuras 42, 43 e 44 mostram o momento que a falta é detectada pelo método de detecção de anomalias, para as frequências de 105 Hz, 90 Hz e 390 Hz.

Figura 42 – Detecção de anomalia na harmônica de 105 Hz.



Fonte: Autor (2024).

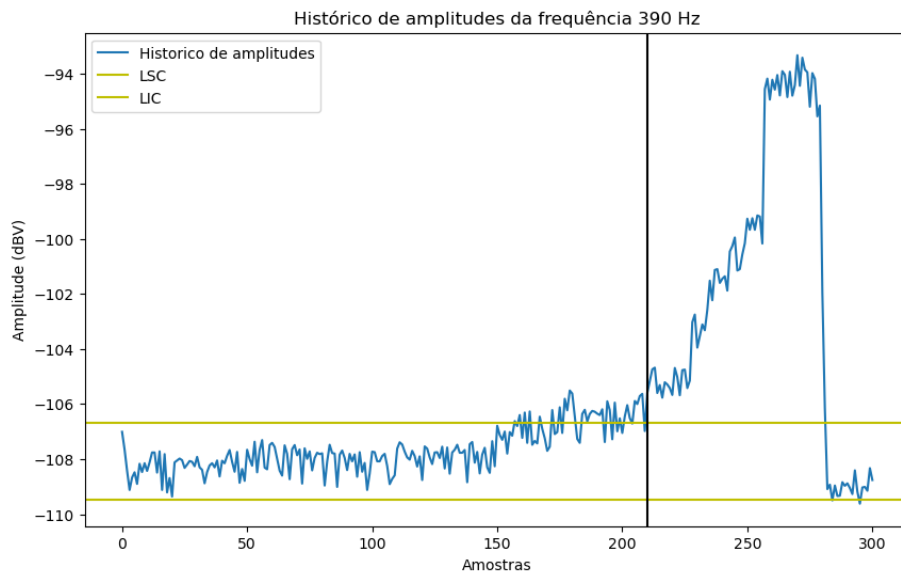
Figura 43 - Detecção de anomalia na harmônica de 90 Hz.



Fonte: Autor (2024).



Figura 44 - Detecção de anomalia na harmônica de 390 Hz



Fonte: Autor (2024)

Como pode ser visto nas figuras anteriores, a falta pode ser detectada em momentos diferentes dependendo do comportamento de cada harmônica, algumas frequências apresentam amplitude baixa e alta variação, para esses casos a aplicação de um filtro digital de média móvel pode tornar o sinal menos ruidoso, facilitando assim a identificação da falta.

## 7 CONCLUSÕES FINAIS

Esse trabalho apresentou o desenvolvimento e a validação de um aprimoramento do sistema automatizado de imposição de faltas, viabilizando a imposição de faltas progressivas de curto-circuito de espiras de geradores síncronos. O sistema foi testado para faltas de rotor e apresentou desempenho satisfatório. Neste sentido, o sistema demonstrou robustez e capacidade de controle na aplicação progressiva da falta, permitindo uma simulação mais realista de condições incipientes de possíveis faltas em geradores. Os ensaios realizados confirmaram a eficácia do sistema tanto na imposição de faltas de forma gradual, quanto na coleta de dados para análise de anomalias, utilizando dados de campo magnético.

Os resultados obtidos destacam a relevância deste sistema para o avanço de estudos em diagnósticos de faltas em geradores síncronos. A imposição de faltas progressivas possibilita uma investigação mais detalhada do comportamento das máquinas sob condições próximas da realidade, contribuindo para o desenvolvimento de métodos de diagnóstico e/ou prognóstico mais confiáveis.

Entre as limitações observadas, destaca-se a dificuldade no controle da severidade de faltas em níveis mais altos, causada pela sensibilidade do circuito em condições críticas. Esse desafio aponta para a necessidade de melhorias no projeto do sistema, como a introdução de resistências adicionais para estabilizar a operação em condições extremas.

O sistema desenvolvido também demonstrou uma base promissora para trabalhos futuros, o mesmo método de aplicação de defeitos através de divisor de corrente pode ser replicado de maneira análoga para diversos tipos de faltas elétricas, como os curtos-circuitos nas espiras do estator e nas chapas do núcleo.

## REFERÊNCIAS

ANTUNES, Luciano Bortoloto; WENGERKIEVICZ, Carlos Alexandre Corrêa; KOERICH, José Mateus; SANTOS, Guilherme Felipe dos; SADOWSKI, Nelson; BATISTELA, Nelson Jhoe; FREITAS, Luciano Mendes de. Detecção de Falhas de Estator em Geradores Síncronos através do Campo Magnético Externo. In: 15º CONGRESSO BRASILEIRO DE ELETROMAGNETISMO, 15., 2022, Florianópolis. **Anais do 15º Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo**. Florianópolis: Even3, 2022. p. 1-2. Disponível em: <https://www.even3.com.br/anais/cbmag2022/473169-deteccao-de-faltas-de-estator-em-geradores-sincronos-atraves-do-campo-magnetico-externo>. Acesso em: 10 jan. 2025.

ANTUNES, Luciano Bortoloto; WENGERKIEVICZ, Carlos Alexandre Corrêa; MAZZOLA, Cristian Franzoi; SANTOS, Guilherme Felipe dos; SADOWSKI, Nelson; BATISTELA, Nelson Jhoe; NASCIMENTO, Rubens José. Detecção de Falhas de Rotor em Geradores Síncronos através de Sensores de Fluxo Magnético no Entreferro. In: 15º CONGRESSO BRASILEIRO DE ELETROMAGNETISMO, 15., 2022, Florianópolis. **Anais do 15º Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo**. Florianópolis: Even3, 2022. p. 1-2. Disponível em: <https://www.even3.com.br/anais/cbmag2022/473170-deteccao-de-faltas-de-rotor-em-geradores-sincronos-atraves-de-sensores-de-fluxo-magnetico-no-entreferro>. Acesso em: 05 jan. 2025.

BASTOS, João Pedro Assumpção. **Eletromagnetismo para engenharia: estática e quase estática**. 3. ed. Florianópolis: Editora UFSC, 2012.

CHAPMAN, Stephen J.. **Fundamentos de Máquinas Elétricas**. 5. ed. Porto Alegre: AMGH Editora Ltda, 2013.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanco Energético Nacional**: ano base 2023. Rio de Janeiro: Empresa de Pesquisa Energética, 2024. 275 p. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-819/topico-723/BEN2024.pdf>. Acesso em: 22 dez. 2024.

EQUACIONAL ELÉTRICA E MECÂNICA. **Manual geral de instruções**: Grupo gerador especial, 2014. 49 p.

GRILLO, Luis Otavio Steffenmunsberg. **Desenvolvimento de Procedimentos para Detecção e Avaliação de Falhas em Geradores Síncronos por Meio da Monitoração do Campo Magnético Externo**. 2024. 177 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2024.

HESSMANN, Gabriel Piazero. **Sistema automatizado para imposição de faltas em uma máquina síncrona modificada**. 2018. 125 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2018.

HOEGEN, Marjorie. **Estratégias de Detecção de Alterações no Comportamento do Campo Magnético Externo de Geradores Síncronos**. 2021. 155 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2021.

MONTGOMERY, Douglas C.. **Introdução ao Controle Estatístico da Qualidade**. Rio de Janeiro: LTC, 2017. 555 p.

MUSSOI, Fernando Luiz Rosa. **Fundamentos de Eletromagnetismo**. Florianópolis: 2005. 127 p. Disponível em: [https://www.ufsm.br/app/uploads/sites/553/2015/04/intranet.ctism\\_.ufsm\\_.br\\_gsec\\_A\\_postilas\\_Eletromagnetismo.pdf](https://www.ufsm.br/app/uploads/sites/553/2015/04/intranet.ctism_.ufsm_.br_gsec_A_postilas_Eletromagnetismo.pdf). Acesso em: 03 jan. 2025.

NETI, Prabhakar; NANDI, Subhasis. Stator Interturn Fault Detection of Synchronous Machines Using Field Current and Rotor Search-Coil Voltage Signature Analysis. **IEEE Transactions On Industry Applications**, [S.L.], v. 45, n. 3, p. 911-920, 2009. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/tia.2009.2018905>.

RIGONI, Mauricio. **Desenvolvimento de um sistema de detecção e avaliação de faltas em geradores síncronos por meio do campo magnético externo**. 2014. 156 p. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014.

SANTOS, Guilherme Felipe dos; BATISTELA, Nelson Jhoe; BERNARD, Laurent Didier; FREITAS, Luciano Mendes de; MATSUO, Tiago Kaoru; TOMINAGA, Luan. Detection of Electrical Faults in a Synchronized Generator through Mechanical Vibration at Various Operating Conditions. In: 15° CONGRESSO BRASILEIRO DE ELETROMAGNETISMO, 15., 2022, Florianópolis. **Anais do 15º Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo**. Florianópolis: Even3, 2022. p. 1-2. Disponível em: <https://www.even3.com.br/anais/cbmag2022/473254-detection-of-electrical-faults-in-a-synchronized-generator-through-mechanical-vibration-at-various-operating-cond/>. Acesso em: 03 jan. 2025.

SANTOS, Guilherme Felipe dos; WENGERKIEVICZ, Carlos Alexandre Corrêa; BATISTELA, Nelson Jhoe; SADOWSKI, Nelson; FREITAS, Luciano Mendes de; NASCIMENTO, Rubens José; MATSUO, Tiago Kaoru. Electrical Faults in a Grid-Synchronized Generator Detected by Vibration Monitoring. In: 15° CONGRESSO BRASILEIRO DE ELETROMAGNETISMO, 15., 2022, Florianópolis. **Anais do 15º Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo**. Florianópolis: Even3, 2022. p. 1-2. Disponível em: <https://www.even3.com.br/anais/cbmag2022/473253-electrical-faults-in-a-grid-synchronized-generator-detected-by-vibration-monitoring>. Acesso em: 03 jan. 2025.

SANTOS, Helton Fernando dos. **Desenvolvimento de um equipamento para monitoração de geradores síncronos através do campo magnético externo**. 2016. 110 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016.

SANTOS, Helton Fernando dos. **Detecção e avaliação de faltas em geradores síncronos por meio de históricos de harmônicos do campo magnético externo.** 2021. 166 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2021.

SIEMANN, Tiago Nascimento; FLORES, Luiz Fernando; NASCIMENTO, Vinicius José Martin; MAZZOLA, Cristian Franzoi; ANTUNES, Luciano Bortoloto. Análise de Efeitos de Blindagem Eletromagnética em Condutores com Corrente Alternada. In: 16° CONGRESSO BRASILEIRO DE ELETROMAGNETISMO - CBMAG 2024, 16., 2024, Goiânia. **Anais do 16º Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo.** Goiânia: DATASCI, 2024. p. 25-28.

UMANS, Stephen D.. **Máquinas elétricas:** de Fitzgerald e Kingsley. 7. ed. Porto Alegre: AMGH Editora Ltda, 2014.