

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS APLICADO PARA CÁLCULO DE CAMPOS  
ELETROMAGNÉTICOS EXCITADOS POR DESCARGAS PARCIAIS EM  
HIDROGERADOR

NATHAN MASTRANGE LOPES

DM 03 / 2025

UFPA / ITEC / PPGEE  
Campus Universitário do Guamá

Belém-Pará-Brasil

2025

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

NATHAN MASTRANGE LOPES

MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS APLICADO PARA CÁLCULO DE CAMPOS  
ELETROMAGNÉTICOS EXCITADOS POR DESCARGAS PARCIAIS EM  
HIDROGERADOR

Dissertação submetida à  
Banca Examinadora do Programa  
de Pós-Graduação em Engenharia  
Elétrica da UFPA para a  
obtenção do Grau de Mestre em  
Engenharia Elétrica na área de Telecomunicações.

UFPA / ITEC / PPGEE  
Belém-Pará-Brasil - 2025

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ - INSTITUTO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS APLICADO PARA CÁLCULO DE CAMPOS  
ELETROMAGNÉTICOS EXCITADOS POR DESCARGAS PARCIAIS EM  
HIDROGERADOR

DM 03 / 2025 - AUTOR: NATHAN MASTRANGE LOPES

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA À AVALIAÇÃO DA BANCA EXAMINADORA APROVADA PELO COLEGIADO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ E JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA NA ÁREA DE TELECOMUNICAÇÕES.

APROVADA EM \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_

BANCA EXAMINADORA:

---

Prof. Dr. Rodrigo Melo e Silva de Oliveira  
Orientador - UFPA (PPGEE)

---

Prof. Dr. Victor Dmitriev  
Coorientador - UFPA (PPGEE)

---

Prof. Dr. João Paulo Abreu Vieira  
Membro Avaliador - UFPA (PPGEE)

---

Prof. Dr. Ronaldo de Freitas Zampolo  
Membro Avaliador - UFPA (FCT)

---

Prof. Dr. Licinius Dimitri Sá de Alcantara  
Membro Avaliador - UFPA (ICIBE).

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD**  
**Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará**  
**Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)**

---

L864m    Lopes, Nathan Mastrange.  
            Método dos elementos finitos aplicado para cálculo de campos  
            eletromagnéticos excitados por descargas parciais em hidrogerador  
            / Nathan Mastrange Lopes. — 2025.  
            XVI, 43 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. Rodrigo Melo Silva de Oliveira  
Coorientador(a): Prof. Dr. Victor Alexandrovich Dmitriev  
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará,  
Instituto de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Elétrica, Belém, 2025.

1. Descargas elétricas. 2. Análise numérica. 3. Método dos  
elementos finitos. 4. Geradores hidrelétricos. 5. Medidas de  
segurança. I. Título.

CDD 621.3

---

*A Deus, aos meus pais, Eduardo e Mara, às minhas irmãs, Elisandra, Elisângela e Eliomara e a  
minha afilhada Ayla.*

# Agradecimentos

Agradeço, em primeiro lugar, a Deus, por me conceder a vida da qual desfruto todos os dias e por colocar em meu caminho pessoas tão extraordinárias.

Aos meus pais, Eduardo e Mara, por sempre me acompanharem com amor nos meus melhores e piores momentos, e por me darem força e estabilidade financeira, garantindo que nunca me faltasse nada.

À minha irmã, Elisandra, por me ajudar nos estudos desde o ensino fundamental e por sempre ter sido uma das minhas maiores alegrias, acompanhando-me ao longo desses anos.

Ao meu prezado professor e orientador, Prof. Rodrigo Melo e Silva de Oliveira, por me apresentar o tema de Descargas Parciais e pela oportunidade de orientação neste trabalho.

Ao meu coorientador Prof. Victor Dmitriev por suas ideias e sugestões ao longo do trabalho.

Ao Prof. Licinius Alcantara, pela sua contribuição nos cálculos e no modelo numérico.

Aos meus amigos, pelo apoio e pela compreensão diante da minha ausência, ajudando a tornar a vida mais leve.

Por fim, a todos que, direta ou indiretamente, colaboraram para que eu chegasse até aqui.

*“Acredito, com os Teólogos de Westminster e seus predecessores ad infinitum, que 'O principal fim do homem é glorificar a Deus e desfrutá-lo para sempre.' Que, para esse fim, a cada homem foi dada uma capacidade progressivamente crescente de comunicação com outras criaturas. Que, com seus poderes, suas suscetibilidades aumentam. Que a felicidade está indissoluvelmente ligada ao pleno exercício desses poderes em sua direção pretendida. Que a felicidade e a miséria devem inevitavelmente aumentar com o aumento do poder e do conhecimento. Que a transição de um curso para o outro é essencialmente milagrosa, enquanto que o progresso é natural.”*  
(J.C. Maxwell)

# Resumo

Este trabalho tem como objetivo desenvolver e simular numericamente um modelo tridimensional de um hidrogerador sujeito à ocorrência de descarga parcial (DP) e analisar os resultados obtidos para a voltagem e o campo induzidos. Para isso, foi elaborado um modelo eletromagnético baseado no método dos elementos finitos, representando um setor de doze graus angulares de um hidrogerador da usina de Campos Novos. As propriedades do modelo foram selecionadas para refletir com precisão as características físicas da máquina real. A definição dos parâmetros do núcleo magnético do estator teve como referência um estudo sobre perdas e mecanismos de desgaste no material utilizado no núcleo estatórico de hidrogeradores, permitindo a seleção da permeabilidade magnética adequada para uma simulação linear. Para a simulação da DP no modelo numérico, foi introduzida uma pequena fonte de corrente unitária para representar o canal de descarga, em duas posições diferentes sobre uma das espiras do estator, utilizando uma frequência de 40 MHz. Para o cálculo da voltagem induzida, foram calculadas integrais de linha do campo elétrico entre o piso aterrado do recinto e diferentes pontos das espiras. Os resultados obtidos indicaram mecanismos de propagação de onda eletromagnética no ambiente do hidrogerador, com o núcleo magnético do estator atuando como guia para o campo induzido e as barras estatóricas funcionando como blindagem. Observou-se que as voltagens induzidas foram de maior intensidade nas espiras mais próximas das DPs, o que sugere que essa metodologia pode ser utilizada para a localização de descargas parciais.

**Palavras-chave:** hidrogerador; descargas parciais; elementos finitos; defeitos no estator; ondas eletromagnéticas.

# Abstract

This study aims to develop and numerically simulate a three-dimensional model of a hydrogenerator subjected to partial discharge (PD) and analyze the resulting induced voltage and field. To achieve this, an electromagnetic model was developed based on the finite element method, representing a twelve-degree angular sector of a hydrogenerator from the Campos Novos power plant. The model's properties were carefully selected to accurately reflect the physical characteristics of the real machine. The definition of the magnetic core parameters of the stator was based on a study of losses and wear mechanisms in the material used in hydrogenerator stator cores, allowing for the selection of appropriate magnetic permeability for a linear simulation. To simulate PD in the numerical model, a small unitary current source was introduced to represent the discharge channel at two different positions on one of the stator windings, using a frequency of 40 MHz. For the calculation of the induced voltage, line integrals of the electric field were computed between the grounded floor of the enclosure and different points of the windings. The obtained results indicated mechanisms of electromagnetic wave propagation within the hydrogenerator environment, with the stator's magnetic core acting as a wave guide for the induced field and the stator bars functioning as shielding. It was observed that the induced voltages were of higher intensity in the windings closest to the PDs, suggesting that this methodology can be used for the localization of partial discharges.

**Keywords:** hydrogenerator; partial discharges; finite elements; stator defects; electromagnetic waves.

# Lista de ilustrações

|           |                                                                                                                                                                                                                               |    |
|-----------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1  | – Ilustração interna de hidrogerador de barragem, setas em azul indicam o fluxo da água no funcionamento. Imagem extraída de [39]                                                                                             | 21 |
| Figura 2  | – Ilustração interna de hidrogerador de barragem, destacando a turbina e hidrogerador. Setas em azul indicam o fluxo da água no funcionamento. Imagem extraída de [39]                                                        | 21 |
| Figura 3  | – Representação de núcleo estatórico. Imagem adaptada de [41]                                                                                                                                                                 | 22 |
| Figura 4  | – Tipos de ligações de bobinas com base em barras Roebel do tipo imbricada (a) e ondulada (b). Imagem adaptada de [44]                                                                                                        | 23 |
| Figura 5  | – Tipos de isolamento presentes em (a) barras Roebel e em (b) bobinas de múltiplas espiras.                                                                                                                                   | 24 |
| Figura 6  | – Representação das diferentes etapas na formação de <i>Streamers</i> . Os gráficos à esquerda das imagens, em azul, ilustram a variação do campo elétrico reduzido ao longo do eixo do <i>gap</i> . Figura adaptada de [45]. | 25 |
| Figura 7  | – Representação do deslocamento de cargas por meio do processo de avalanche de elétrons.                                                                                                                                      | 26 |
| Figura 8  | – Probabilidades respectivas dos fatores que levam a danos no isolamento [53]                                                                                                                                                 | 29 |
| Figura 9  | – Exemplos de elementos finitos para problemas (a) 2D e (b) 3D.                                                                                                                                                               | 32 |
| Figura 10 | – Exemplo de elemento tetraédrico com os nós numerados.                                                                                                                                                                       | 33 |
| Figura 11 | – Modelo de setor de gerador: (a) Modelo de setor de gerador (b) detalhe do modelo para as barras e núcleo magnético do estator.                                                                                              | 40 |
| Figura 12 | – Permeabilidade relativa $\mu_r$ do núcleo magnético em função de $ \vec{B} $ .                                                                                                                                              | 41 |
| Figura 13 | – Condições de contorno para as superfícies: (a) isolamento magnético e (b) condição periódica.                                                                                                                               | 41 |
| Figura 14 | – Espectro médio de descargas parciais no domínio da frequência. Adaptado de [68]                                                                                                                                             | 43 |
| Figura 15 | – Local do elemento de DP adicionado à junção superior entre as barras da espira (Caso A).                                                                                                                                    | 43 |
| Figura 16 | – Local do elemento de DP adicionado à junção inferior entre as barras da espira (Caso B).                                                                                                                                    | 44 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 17 – Planos para visualização de resultados, (a) $\tilde{A}$ altura da descarga para o Caso A, (b) $\tilde{A}$ altura da descarga para o Caso B, (c) normal ao eixo radial $r$ e (d) normal ao versor $\hat{a}_\varphi$ . As coordenadas $r$ e $\varphi$ são relativas ao sistema cilíndrico padrão de coordenadas. . . . . | 45 |
| Figura 18 – Caminhos de integração usados para cálculos de voltagens entre as barras e o piso. Os números indicam as barras distintas no estator, sendo 0 a barra em que foram aplicadas as DP para ambos os casos. . . . .                                                                                                        | 46 |
| Figura 19 – Distribuição da parte real $E_z$ no plano A, escala em Decibéis (Caso A). . . .                                                                                                                                                                                                                                        | 46 |
| Figura 20 – Distribuição da parte real de $E_z$ no plano D, escala de 0 a 10 V/m (Caso A). . .                                                                                                                                                                                                                                     | 47 |
| Figura 21 – Distribuição da parte real de $E_z$ no plano D, escala de 0 a 0,1 V/m (Caso A). . .                                                                                                                                                                                                                                    | 47 |
| Figura 22 – Voltagens calculadas entre as barras do estator e o piso (Caso A). . . . .                                                                                                                                                                                                                                             | 48 |
| Figura 23 – Distribuição da parte real de $E_z$ no plano B, escala em Decibéis (Caso B). . .                                                                                                                                                                                                                                       | 48 |
| Figura 24 – Distribuição da parte real de $E_z$ no plano D, escala de 0 a 1 V/m (Caso B). . .                                                                                                                                                                                                                                      | 49 |
| Figura 25 – Distribuição da parte real de $E_z$ no plano D, escala de 0 a 1 mV/m (Caso B). . .                                                                                                                                                                                                                                     | 49 |
| Figura 26 – Voltagens calculadas entre as barras do estator e o piso (Caso B). . . . .                                                                                                                                                                                                                                             | 50 |

# Lista de tabelas

|                                                                            |    |
|----------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1 – Dimensões usadas para o modelo de hidrogerador [35]. . . . .    | 40 |
| Tabela 2 – Propriedades eletromagnéticas usadas para os materiais. . . . . | 40 |

# Lista de siglas

|      |                                         |
|------|-----------------------------------------|
| FDTD | <i>Finite-Difference Time-Domain</i>    |
| DP   | Descarga Parcial                        |
| FEM  | <i>Finite Element Method</i>            |
| PDA  | <i>Partial Discharge Analysis</i>       |
| PRPD | <i>Phase-resolved Partial Discharge</i> |
| RF   | Radiofrequência                         |

# Lista de símbolos

|                                   |                                           |
|-----------------------------------|-------------------------------------------|
| $a_i$                             | Coefficiente de Ionização                 |
| $\vec{E}/n$ (Vm <sup>2</sup> )    | Campo elétrico reduzido                   |
| $(E/n)_{crit}$ (Vm <sup>2</sup> ) | Campo elétrico reduzido crítico           |
| $\vec{B}$ (T)                     | Vetor Densidade de Fluxo Magnético        |
| $n$ (1/m <sup>3</sup> )           | Densidade local do gás                    |
| $n_0$ (1/m <sup>3</sup> )         | Densidade volumétrica inicial de elétrons |
| $n_e$ (1/m <sup>3</sup> )         | Densidade volumétrica de elétrons         |
| $\epsilon_0$ (F/m)                | Permissividade Elétrica do Vácuo          |
| $\epsilon_r$                      | Permissividade Elétrica Relativa          |
| $e$ (C)                           | Carga elementar                           |
| $\varepsilon_k$ (eV)              | Energia cinética do elétron               |
| $\vec{E}$ (V/m)                   | Vetor Intensidade de Campo Elétrico       |
| $\vec{H}$ (A/m)                   | Vetor Intensidade de Campo Magnético      |
| $k_i$                             | Parâmetro característico da Ionização     |
| $m_e$ (kg)                        | Massa do elétron                          |
| $\mu_e$ (m <sup>2</sup> /(Vs))    | Mobilidade elétrica do meio               |
| $\mu_0$ (H/m)                     | Permeabilidade Magnética do vácuo         |
| $\mu_r$                           | Permeabilidade Magnética Relativa         |
| $\nu_m$ (Hz)                      | Frequência de colisão do elétron          |
| $\vec{A}$ (T·m)                   | Vetor Potencial Magnético                 |
| $V$ (V)                           | Potencial Elétrico                        |

|                |                                 |
|----------------|---------------------------------|
| $V_e$ (m/s)    | Velocidade de deriva do elétron |
| $V_t$ (m/s)    | Velocidade térmica do elétron   |
| $\sigma$ (S/m) | Condutividade Elétrica          |

# Sumário

|            |                                                          |           |
|------------|----------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b>   | <b>INTRODUÇÃO . . . . .</b>                              | <b>17</b> |
| <b>1.1</b> | <b>Estrutura do trabalho . . . . .</b>                   | <b>19</b> |
| <b>2</b>   | <b>REVISÃO TEÓRICA E METODOLOGIA . . . . .</b>           | <b>20</b> |
| <b>2.1</b> | <b>Funcionamento de uma usina hidrelétrica . . . . .</b> | <b>20</b> |
| <b>2.2</b> | <b>Física de descargas . . . . .</b>                     | <b>23</b> |
| <b>2.3</b> | <b>Descargas Parciais . . . . .</b>                      | <b>27</b> |
| <b>2.4</b> | <b>Equações de Maxwell . . . . .</b>                     | <b>29</b> |
| <b>2.5</b> | <b>Método de Elementos Finitos . . . . .</b>             | <b>31</b> |
| <b>2.6</b> | <b>Modelagem Computacional . . . . .</b>                 | <b>38</b> |
| <b>2.7</b> | <b>Caracterização das Descargas Parciais . . . . .</b>   | <b>42</b> |
| <b>3</b>   | <b>RESULTADOS . . . . .</b>                              | <b>45</b> |
| <b>4</b>   | <b>CONCLUSÕES . . . . .</b>                              | <b>51</b> |
| <b>5</b>   | <b>PUBLICAÇÕES DURANTE O MESTRADO . . . . .</b>          | <b>53</b> |
|            | <b>REFERÊNCIAS . . . . .</b>                             | <b>54</b> |

# 1 Introdução

A demanda energética de um país está fortemente relacionada à sua evolução econômica e tecnológica, bem como à sua atividade produtiva e ao Produto Interno Bruto (PIB). Historicamente, as matrizes energéticas nacionais foram majoritariamente compostas por combustíveis fósseis não renováveis, o que resulta em impactos ambientais negativos, como a emissão de gases de efeito estufa e poluentes. Esses efeitos comprometem tanto a sustentabilidade ambiental quanto a segurança do suprimento energético a longo prazo. O estudo realizado por [1] mostra que o intenso desenvolvimento econômico do Brasil ao longo do século XX resultou em um aumento significativo da demanda energética e na diversificação da matriz energética do país. No início desse período, o petróleo e a lenha representavam 78% das fontes de energia consumidas. Já em 2000, três fontes compunham 74% da matriz energética brasileira: petróleo, lenha e energia hidrelétrica. Uma análise mais recente da matriz elétrica brasileira, apresentada em [2], indica que, em 2020, a energia hidrelétrica correspondia a 64% da capacidade instalada de geração elétrica no país. Quando somadas às demais fontes renováveis (biomassa, solar e eólica), essas fontes representavam 83,6% da geração elétrica nacional.

O funcionamento das usinas hidrelétricas, assim como o de outras fontes de geração, como parques eólicos e usinas de biomassa, depende da operação de geradores síncronos de alta tensão. A integridade dessas máquinas está diretamente ligada à preservação de seus sistemas de isolamento, fundamentais para a confiabilidade e eficiência da geração de energia. Contudo, o uso contínuo desses equipamentos provoca o desgaste natural dos materiais dielétricos. Irregularidades na isolamento podem surgir tanto durante o processo de fabricação quanto ao longo do tempo de operação, devido a fatores como a presença de corpos estranhos, delaminação, estresse térmico, erosão causada por descargas elétricas e estresse elétrico. Esses fatores podem levar ao surgimento de Descargas Parciais (DPs) [3–8].

As DPs referem-se a pequenas descargas elétricas localizadas que ocorrem devido a falhas no material isolante ou nos revestimentos semicondutores de máquinas elétricas de alta tensão [9, 10]. O monitoramento dessas descargas é essencial para a manutenção preventiva e preditiva, possibilitando a identificação precoce de problemas. Segundo [11], as DPs podem ser classificadas em quatro tipos principais: descargas internas, descargas nas ranhuras, descargas nos enrolamentos finais e arcos ou faíscas.

Para mitigar esses problemas, o monitoramento contínuo das máquinas elétricas é essencial para preservar o funcionamento das usinas e evitar falhas graves nos dielétricos. Para

esse fim, a norma IEC 60270 definiu um método padronizado para a detecção de DPs [12]. Esse método exige que a máquina seja desativada para a inserção de um capacitor acoplado em paralelo com o equipamento monitorado. Além de ser considerado invasivo, a necessidade de interromper a operação da máquina e alterar seu circuito elétrico torna essa abordagem pouco prática.

Dessa forma, diversos autores desenvolveram métodos alternativos para a detecção de DPs [4, 12–24], buscando formas mais eficientes de monitoramento. Dependendo do estado operacional da máquina, os testes podem ser classificados como offline ou online [25]. Nos métodos offline, o equipamento é desativado e energizado por uma fonte de tensão externa para avaliação da isolação. Já os testes online são realizados enquanto a máquina opera sob sua tensão de serviço, permitindo o monitoramento contínuo da isolação e a detecção antecipada de falhas por meio da análise dos dados obtidos [26].

Quanto ao princípio físico empregado na detecção de DPs, os métodos disponíveis podem ser classificados em químicos, acústicos, ópticos e elétricos [5, 27]. A detecção química baseia-se na identificação de subprodutos gerados pela ocorrência das descargas. Dentre esses métodos, destaca-se a detecção de ozônio, formado por reações eletroquímicas entre elétrons das descargas e o oxigênio presente no ar [28], sendo o próprio ozônio, por sua vez, um contribuinte para a degradação química dos componentes dos geradores [29–31].

Os métodos acústicos detectam DPs por meio da energia mecânica gerada pelas descargas e propagada pela isolação, utilizando microfones, transdutores e acelerômetros [32]. Essa abordagem é econômica e eficaz para localizar descargas, mas não permite identificar precisamente o tipo de DP, sendo necessário combiná-la com outras técnicas [32, 33]. A detecção óptica de DPs externas pode ser realizada de forma direta, por observação visual dos pulsos de descarga, ou por meio de câmeras calibradas para captar emissões nos espectros ultravioleta e infravermelho [5, 22–24].

No grupo dos métodos elétricos, inclui-se o procedimento padronizado pela IEC 60270, que utiliza capacitores de alta impedância para as frequências usuais do gerador e baixa impedância para os sinais de alta frequência típicos das DPs [12]. Como alternativa menos invasiva, métodos baseados em radiofrequência (RF) têm sido amplamente explorados. As DPs geram sinais de RF que se propagam além da estrutura da máquina, permitindo sua detecção por sensores de campo próximo e antenas [4, 18, 19]. Essa abordagem reduz a necessidade de instalação de dispositivos diretamente no equipamento, minimizando riscos e facilitando sua implementação em ambientes operacionais.

Outro campo complementar de estudo é a modelagem numérica de hidrogeradores, que

possibilita a simulação de fenômenos físicos complexos e a otimização dos procedimentos de manutenção. Modelos bidimensionais e tridimensionais baseados no método dos elementos finitos (FEM) têm sido empregados para análises eletromagnéticas [20, 21], térmicas [22–24] e mecânicas [34]. Embora avanços significativos tenham sido alcançados, ainda não há estudos que abordem de maneira completa a dinâmica dos fluxos turbulentos em hidrogeradores tridimensionais.

Neste trabalho, foi desenvolvido um modelo tridimensional utilizando o método de elementos finitos para analisar os campos eletromagnéticos propagantes e as tensões induzidas por descargas corona no estator do hidrogerador da Usina de Campos Novos [35]. O modelo abrange uma seção de 12 graus angulares da estrutura, identificando os mecanismos de propagação das descargas.

## 1.1 Estrutura do trabalho

Dando sequência ao trabalho, o Capítulo 2 apresenta a revisão teórica e a metodologia adotada, abordando o funcionamento de uma usina hidrelétrica, com detalhamento das partes e da composição do gerador. Além disso, são discutidos os princípios físicos das descargas elétricas, os principais termos e conceitos relacionados às descargas parciais, as equações de Maxwell e suas formas aplicadas à simulação em frequência, bem como o método de elementos finitos aplicado ao eletromagnetismo. Por fim, são descritos os detalhes e a metodologia utilizados na modelagem computacional do hidrogerador. No Capítulo 3, são apresentados os principais resultados obtidos por meio das simulações, com uma análise das distribuições do campo magnético no interior do hidrogerador e das tensões induzidas. O Capítulo 4 discute as conclusões mais relevantes do estudo e apresenta propostas para trabalhos futuros. Por fim, o Capítulo 5 lista as publicações científicas relacionadas ao tema, realizadas ao longo da execução do curso de mestrado.

## 2 Revisão teórica e Metodologia

### 2.1 Funcionamento de uma usina hidrelétrica

As usinas hidrelétricas são estruturas projetadas para converter a energia do movimento da água em eletricidade. A energia extraída da água por uma usina hidrelétrica é a energia potencial contida na sua massa devido à elevação. Essa energia é liberada à medida que a água escoar rio abaixo, sendo naturalmente dissipada ao longo do curso da água. No entanto, uma turbina hidráulica pode captar parte dessa energia e utilizá-la para a geração de eletricidade [36].

Com base em sua configuração, as hidrelétricas de grande porte podem ser classificadas em três tipos principais: usinas a fio d'água, que utilizam o fluxo natural do rio sem a necessidade de um reservatório; usinas reversíveis ou de bombeamento, que operam com duas bacias d'água (superior e inferior) para armazenar energia potencial gravitacional, bombeando a água da bacia inferior para a superior em momentos de baixa demanda energética; e usinas de reservatório, que utilizam uma barragem para armazenar grandes volumes de água e garantir maior controle sobre a geração de eletricidade [37, 38]. Esta seção trata especificamente das usinas de reservatório.

O reservatório serve como um sistema de armazenamento de energia. Uma vez criado, ele permite controle sobre o fluxo de água no rio além da barragem e, conseqüentemente, sobre a produção de energia. A água pode ser armazenada durante períodos de alta vazão e utilizada quando a chuva for escassa. Além disso, uma barragem também pode ser usada para controle de enchentes. A geração de energia nas usinas de reservatório ocorre de maneira semelhante às usinas a fio d'água e de bombeamento. A água armazenada no reservatório é captada pela tomada d'água e conduzida por condutos forçados até a casa de máquinas, onde aciona as turbinas para a produção de eletricidade, conforme ilustrado na Figura 1.

Após percorrer os condutos no interior da barragem, a água é levada à turbina. A turbina é o componente mecânico mais importante de qualquer usina hidrelétrica. Esse dispositivo é responsável por converter a energia contida no fluxo da água no movimento rotativo necessário para acionar um gerador e produzir eletricidade. A turbina hidráulica é um componente simples, com a maioria das turbinas feita de ferro ou aço, ou fundida em bronze ou outras ligas metálicas.

Conectado por um eixo comum à turbina está o hidrogerador. Os geradores de grandes turbinas hidrelétricas são normalmente sincronizados à rede elétrica a 50 ou 60 Hz, o que determina a velocidade de rotação tanto da turbina quanto do gerador. Uma ilustração detalhando

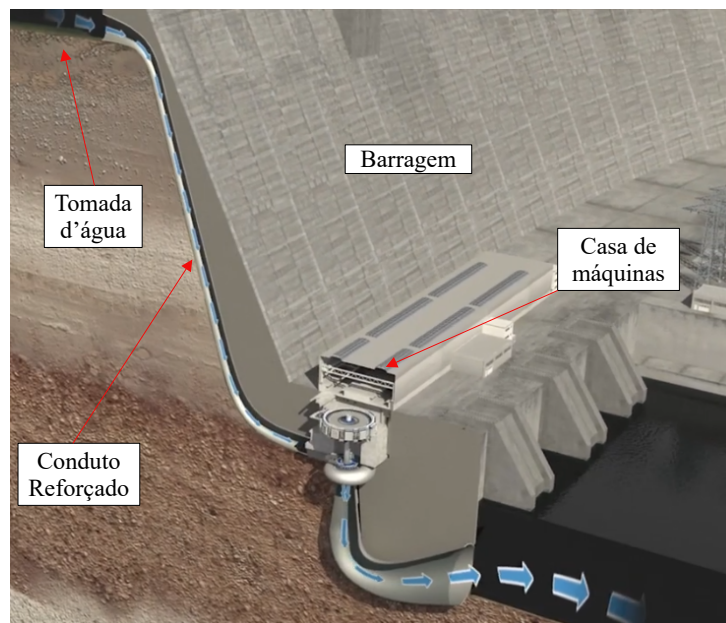


Figura 1 – Ilustração interna de hidrogerador de barragem, setas em azul indicam o fluxo da água no funcionamento. Imagem extraída de [39]

o par turbina e hidrogerador é mostrada na Figura 2.

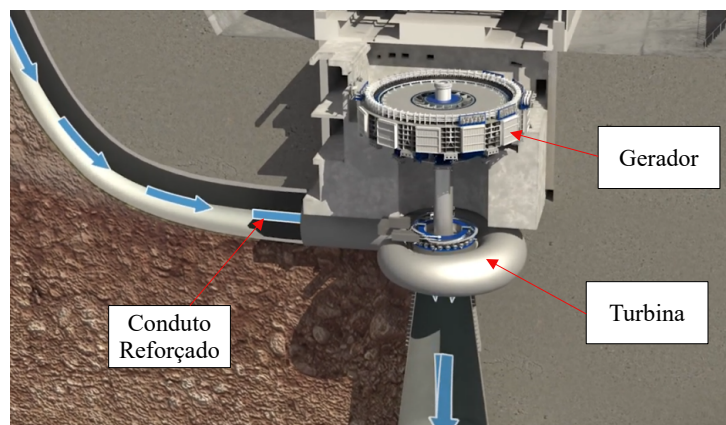


Figura 2 – Ilustração interna de hidrogerador de barragem, destacando a turbina e hidrogerador. Setas em azul indicam o fluxo da água no funcionamento. Imagem extraída de [39]

A estrutura de um hidrogerador é composta principalmente pelo rotor e pelo estator [40]. O rotor, parte móvel do sistema, é responsável por gerar o campo magnético girante necessário para a indução de corrente elétrica no estator. Por outro lado, o estator é constituído por condutores fixados (barras estatóricas) em um núcleo aterrado (núcleo estatórico), organizados de forma a direcionar e suportar o fluxo de corrente elétrica. O núcleo do estator é formado por chapas finas de aço silício com baixo teor de carbono, com espessura variando entre 0,35 mm e 0,5 mm,

que passam por processos de estampagem, lixamento e envernização. Esse tratamento tem como objetivo reduzir as perdas por correntes de Foucault e evitar curtos-circuitos localizados, além de aumentar a eficiência do sistema [41,42].

As chapas de aço são organizadas em seções, separadas por espaçadores que permitem a circulação de ar. A passagem de ar entre as seções ajuda na dissipação térmica, distribuindo o calor de forma uniforme e evitando dilatações térmicas excessivas que poderiam comprometer o desempenho da máquina. Ao longo da circunferência do núcleo do estator, encontram-se as ranhuras, que servem de alojamento para os enrolamentos. Entre essas ranhuras estão os dentes, e juntos eles formam a coroa do estator, uma estrutura robusta e essencial para a organização interna do hidrogerador. A estrutura do núcleo está representada na Figura 3

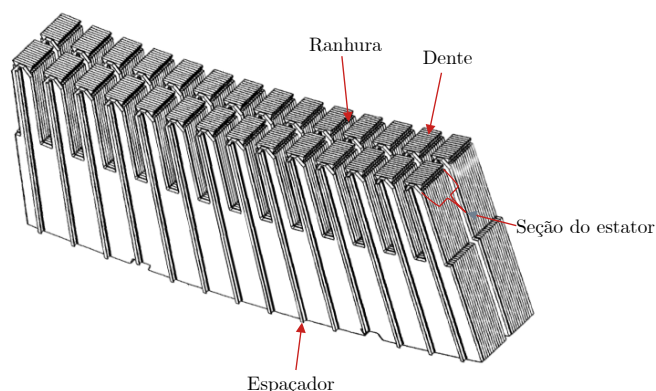


Figura 3 – Representação de núcleo estatórico. Imagem adaptada de [41]

A configuração dos enrolamentos no estator depende, essencialmente, da potência do gerador e das suas características operacionais. Para máquinas menores, com potências de até 75 MW, é mais comum a utilização de bobinas de múltiplas espiras [43]. Nessa configuração, os condutores são organizados em espiras e cada bobina pode conter várias delas, o que torna o projeto mais flexível e adaptável ao número de ranhuras e circuitos paralelos desejados. Em contraste, para geradores de grande porte, utiliza-se o sistema de barras Roebel, também conhecido como meia bobina, onde múltiplos condutores de seção retangular são isolados individualmente e conectados para formar a bobina completa.

As barras Roebel podem ser organizadas em dois modelos: imbricado e ondulado, como indicado na Figura 4. No modelo imbricado, os terminais das bobinas são conectados diretamente às barras adjacentes. Já no modelo ondulado, a conexão é feita com barras deslocadas de 360° elétricos, correspondendo às fases defasadas em 120° entre si. A escolha entre os modelos

depende da configuração elétrica do gerador, sendo ambos eficazes para minimizar perdas e otimizar o desempenho.

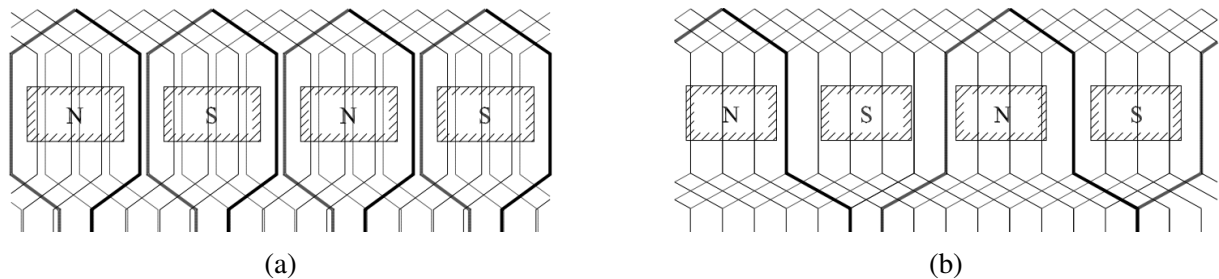


Figura 4 – Tipos de ligações de bobinas com base em barras Roebel do tipo imbricada (a) e ondulada (b). Imagem adaptada de [44]

Independentemente do tipo de enrolamento adotado, a isolamento elétrico dos componentes é um aspecto crítico no funcionamento seguro dos hidrogeradores. Como a diferença de potencial entre os enrolamentos e o núcleo pode atingir valores superiores a milhares de Volts, é indispensável a utilização de materiais isolantes adequados. No caso das bobinas de múltiplas espiras, são empregadas três camadas de isolamento: a isolamento individual dos condutores (*strand insulation*), a isolamento entre espiras (*turn insulation*) e a isolamento externa principal (*groundwall insulation*). Por sua vez, nas barras Roebel, que não possuem espiras, utiliza-se apenas a isolamento individual dos condutores e a isolamento externa principal, como está ilustrado na Figura 5.

Além dessas camadas isolantes, é aplicada uma tinta semi-condutiva na superfície externa das barras. Essa camada é fundamental para melhorar o contato elétrico com as paredes das ranhuras, reduzindo o risco de descargas parciais e minimizando o gradiente de tensão. A tinta semi-condutiva também desempenha um papel relevante na prevenção de descargas do tipo corona, que podem ocorrer devido a imperfeições ou vazios entre o enrolamento e a parede da ranhura. No entanto, caso as barras não estejam devidamente fixadas, as vibrações mecânicas e elétricas podem desgastar a tinta, levando a falhas mais graves no sistema isolante e, em casos extremos, danos ao material dielétrico.

## 2.2 Física de descargas

Em condições normais de temperatura e pressão, o ar se comporta como um excelente isolante. No entanto, uma descarga elétrica ocorre quando há a ruptura da rigidez dielétrica do gás, ou seja, quando ele deixa de agir como isolante e passa a conduzir eletricidade. Esse processo exige a presença de elétrons livres, os quais são gerados através de mecanismos de ionização, permitindo assim a transição para um estado condutor. [45] [46]

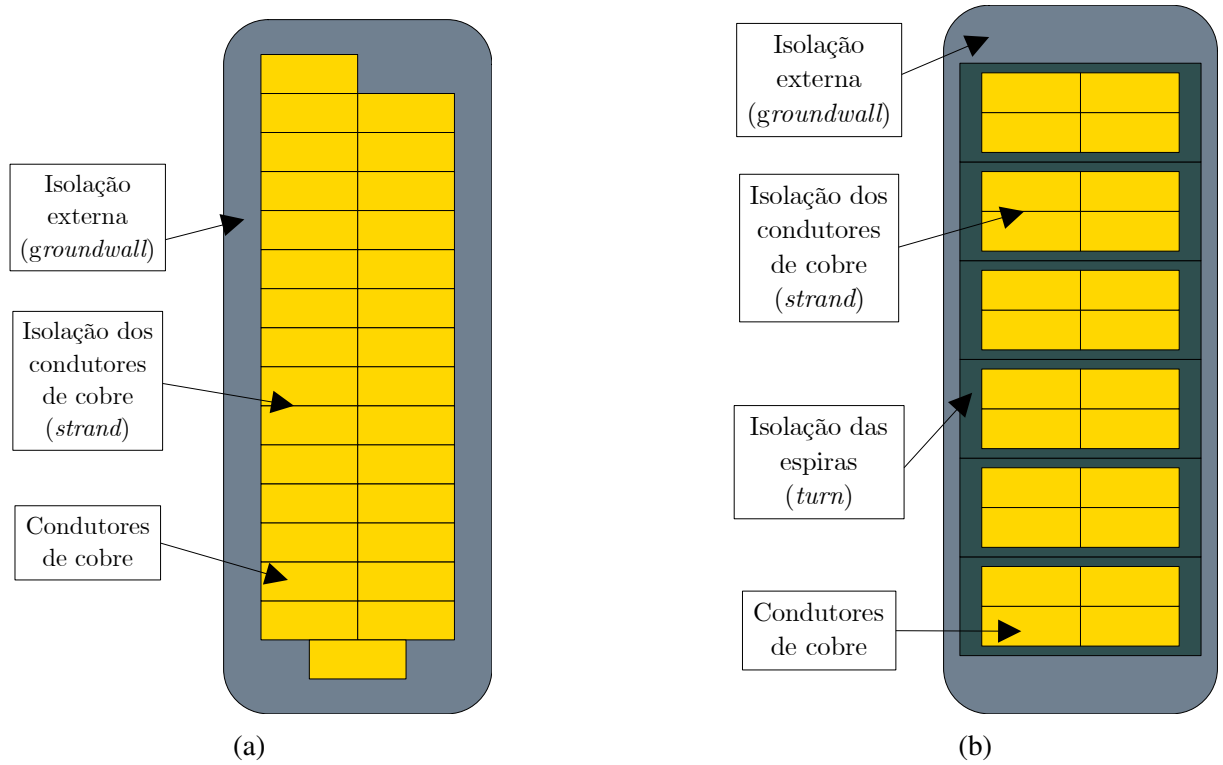


Figura 5 – Tipos de isolamento presentes em (a) barras Roebel e em (b) bobinas de múltiplas espiras.

Em [45], as descargas representadas na Figura 6 são analisadas como funções do campo elétrico reduzido ( $E/n$ ), sendo que  $n$  corresponde à densidade local do gás. No entanto, essas descargas ocorrem em condições de campo elétrico reduzido menores que o valor crítico ( $(E/n)_{crit}$ ), onde o coeficiente de ionização equilibra o coeficiente de ligação eletrônica.

Assim, a única maneira de uma descarga ocorrer nessas condições é concentrando o campo elétrico inicialmente nas regiões próximas ao ânodo. Para uma descarga corona positiva, como mostrado na Figura 6(a), forma-se um fraco brilho ao redor do eletrodo. Nesse pequeno espaço, onde o campo elétrico se concentra, ocorre a ionização do ar, criando uma alta concentração de íons positivos e gerando o brilho observado.

A corrente elétrica, nesse caso, se origina entre os eletrodos por meio do fluxo das cargas geradas pelo campo na região de ionização. A velocidade do elétron sob o campo elétrico  $\vec{E}$  combina seu movimento aleatório com a velocidade térmica  $v_t$  e a velocidade de deriva  $\vec{v}_e$ , que depende do campo. A velocidade de deriva é determinada pela força elétrica  $-e\vec{E}$  e pela perda de momento causada pelas colisões elásticas com átomos no meio. A velocidade de deriva do

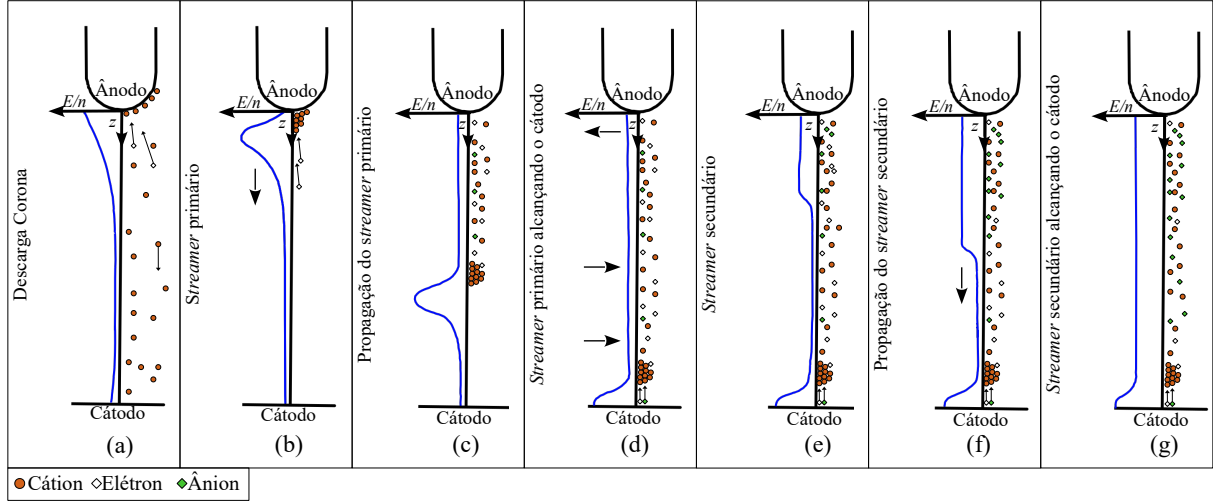


Figura 6 – Representação das diferentes etapas na formação de *Streamers*. Os gráficos à esquerda das imagens, em azul, ilustram a variação do campo elétrico reduzido ao longo do eixo do *gap*. Figura adaptada de [45].

elétron pode ser expressa como [46]

$$\vec{v}_e \approx \frac{-e\vec{E}}{\nu_m m_e} = \mu_e \vec{E}, \quad (2.1)$$

onde  $\nu_m$  é a frequência de colisões necessária para a transferência de momento,  $m_e$  é a massa do elétron e  $\mu_e$  é a mobilidade elétrica no meio. Para simplificação, assume-se que  $\nu_m$  é independente da velocidade térmica  $v_t$  ou da energia cinética do elétron  $\varepsilon_k = mv^2/2$ , sendo calculada a partir de dados experimentais. A velocidade e o coeficiente de deriva para espécies iônicas podem ser obtidos de maneira semelhante à equação (2.1). Normalmente, a mobilidade e a velocidade de deriva das espécies iônicas são menores por um fator de grandeza em comparação com as eletrônicas, contribuindo assim de forma reduzida para a corrente elétrica. Portanto, quando a densidade de elétrons é aproximadamente igual à densidade de cátions, a condutividade e a densidade de corrente são expressas, respectivamente, por [46]

$$\sigma = -en_e\mu_e \quad (2.2)$$

e

$$\vec{J} = -en_e\vec{v}_e = -en_e\mu_e\vec{E} = \sigma\vec{E}, \quad (2.3)$$

onde  $n_e$  é a densidade volumétrica de elétrons. A partir disso, é possível calcular a energia liberada por unidade de volume por segundo através do efeito Joule da corrente, como mostrado por  $\vec{J} \cdot \vec{E} = \sigma \vec{E} \cdot \vec{E} = en_e\vec{v}_e \cdot \vec{E}$ .

No entanto, para gases eletronegativos como o ar, os elétrons gerados inicialmente se ligam ao  $O_2$  presente no ar, antes de seguir seu processo de deriva entre os eletrodos. Nesse caso, a corrente de uma descarga corona ocorre devido ao fluxo de íons na região de *gap*, resultando em uma corrente fraca, sem redução significativa da voltagem no *gap*.

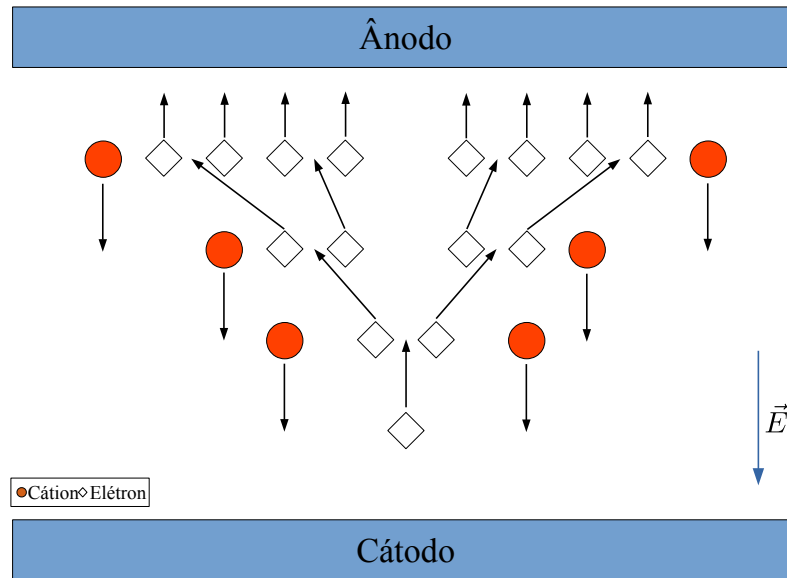


Figura 7 – Representação do deslocamento de cargas por meio do processo de avalanche de elétrons.

Com o aumento da voltagem aplicada entre os eletrodos, o campo elétrico  $\vec{E}$  também cresce, energizando os elétrons livres que ionizam átomos do ar, perdendo energia nesse processo e gerando um íon e dois elétrons livres. Esses elétrons, por sua vez, são energizados novamente pelo campo e ionizam mais átomos, criando uma avalanche de elétrons que são direcionados ao ânodo, como mostrado na Figura 7.

Porém, como o elétron é mais leve e adquire maior velocidade que os íons positivos, ocorre o acúmulo de cargas provenientes das avalanches de elétrons no ânodo, como mostrado na Figura 6(b), reduzindo parte do campo elétrico normal na superfície do eletrodo e expandindo o alcance da ionização. Como demonstrado nas Figuras 6(b)-(c), conforme mais elétrons são extraídos da ponta do canal do que ao longo de seu comprimento (onde o campo elétrico diminui), a região de ionização se propaga até o cátodo, formando um *streamer* primário.

Durante esse processo de ionização, a produção de cargas é principalmente gerada pelas colisões dos elétrons. Assim, a taxa de ionização, ou a quantidade de ionização por volume por

segundo, é dada por

$$\frac{dn_e}{dt} = k_i n n_e, \quad (2.4)$$

onde  $k_i$  é o parâmetro característico da ionização, que depende da densidade do gás e é definido pela distribuição de energia do elétron, que por sua vez varia com  $\vec{E}/n$ . Se considerarmos uma taxa de ionização constante e sem perdas de elétrons, a quantidade de elétrons aumenta exponencialmente com a avalanche, seguindo a equação

$$n_e(t) = n_0 e^{k_i n t}, \quad (2.5)$$

onde  $n_0$  é a densidade inicial de elétrons.

A avalanche de elétrons também se desenvolve ao longo do espaço, e uma forma útil de descrever a ionização é pelo coeficiente de ionização  $a_i$ , que representa o número de eventos de ionização ocorrendo por comprimento percorrido, calculado por

$$a_i = k_i n / v_e. \quad (2.6)$$

Considerando um campo constante, a ionização dos elétrons aumenta ao longo do caminho entre os eletrodos, seguindo

$$n_e(z) = n_0 e^{a_i z}. \quad (2.7)$$

Por fim, na Figura 6(d), observa-se a conexão da ponta do *streamer* com o cátodo, formando o *Breakdown Streamer* (BS) e um aumento súbito na corrente do canal. Após essa conexão, a voltagem do *gap* é redistribuída, formando um canal remanescente. Esse pico de corrente resulta no aumento da energia cinética das cargas, o que eleva a temperatura do canal, aumentando seu diâmetro por expansão térmica, além de gerar mais cargas livres, como visto nas Figuras 6(e)-(g). Durante a expansão do canal, a energia cinética das cargas diminui, resultando em uma maior recombinação dos elétrons livres com os cátions, levando à desionização.

## 2.3 Descargas Parciais

Do ponto de vista físico, as avalanches de elétrons autossustentadas podem ocorrer apenas em dielétricos gasosos. Assim, descargas típicas que acontecem no ar ambiente, como as descargas *glow*, *streamer* e *leader*, também podem ocorrer em imperfeições estruturais contendo gases dentro de dielétricos sólidos e líquidos, como vazios, fissuras em sólidos e bolhas de ar em líquidos. O pulso de carga gerado pelas descargas de brilho, também conhecidas como descargas

de Townsend, geralmente está na ordem de poucos pC. As descargas de estiramento geram pulsos de carga entre 10 e 100 pC [47]. A descarga parcial é um fenômeno caracterizado pela ruptura dielétrica que ocorre dentro da isolação de máquinas elétricas operando em condições de alta tensão, consequência do aumento do campo elétrico devido às imperfeições presentes. As DPs podem se manifestar de diversas formas, cada uma com características e consequências específicas [43, 48].

As descargas internas surgem devido a imperfeições na isolação, que podem ser originadas durante o processo de fabricação ou desenvolvidas ao longo do tempo devido a estresses mecânicos, térmicos ou elétricos constantes durante a operação da máquina [48, 49]. Esses estresses levam à formação de vazios e descolamentos dentro do material dielétrico. A presença dessas falhas agrava ainda mais a deterioração da integridade da isolação, enfraquecendo-a e tornando-a mais vulnerável a rupturas. A criação de vazios e descolamentos dentro do material dielétrico gera regiões localizadas de menor resistência dielétrica. Essas áreas comprometidas tornam-se mais suscetíveis à ocorrência de descargas parciais quando expostas a campos elétricos elevados. Assim, as descargas internas não apenas enfraquecem o sistema de isolação, mas também atuam como precursoras de falhas elétricas mais graves.

As descargas em ranhuras são conhecidas como um dos mecanismos comuns de falha na isolação dos enrolamentos de estatores [50]. Elas ocorrem quando o revestimento protetor das ranhuras do estator é danificado, tipicamente devido a vibrações, deslocamentos ou fricção relacionados ao movimento das barras do estator. Esse dano frequentemente inicia um processo gradual de erosão, que resulta na deterioração da isolação ao longo do tempo [51, 52]. Vale ressaltar que o intervalo entre o início dessas descargas e a falha completa da isolação tende a ser relativamente curto. A probabilidade de ocorrência de DPs que danifiquem as ranhuras é de cerca de 10%, pois está relacionada à frequência com que as barras se afrouxam em suas posições ou nas extremidades devido a vibrações. Este tipo de falha é menos comum do que DPs relacionadas ao envelhecimento (32%) e à contaminação dos enrolamentos (25%) [53].

As descargas de superfície ocorrem quando a magnitude do campo elétrico ultrapassa a resistência dielétrica do ar circundante. Esse tipo de descarga geralmente ocorre na superfície da isolação elétrica próximo às extremidades dos enrolamentos, normalmente iniciada por efeitos térmicos ou pela contaminação do revestimento protetor das extremidades do enrolamento. Esses fatores contribuem para a degradação da isolação e, se não forem corrigidos, podem levar à ruptura da isolação. Caso a fonte de tensão permaneça ativa, uma avalanche de elétrons pode se intensificar ao longo da superfície do material [54].

Descargas causadas por partículas contaminantes ocorrem quando pequenas partículas

condutoras se acumulam na superfície da isolamento. A condutividade e as características elétricas diferentes dessas partículas alteram o campo elétrico local, aumentando o estresse elétrico [55]. Com o tempo, essas descargas desgastam gradualmente o material da isolamento, resultando em pontos frágeis e comprometendo a eficácia do sistema isolante. A contaminação do enrolamento é a segunda causa mais frequente de DPs prejudiciais, com uma probabilidade de ocorrência de aproximadamente 25% [53].

A Figura 8 apresenta os principais fatores responsáveis por danos aos sistemas de isolamento de hidrogeradores [53]. Observa-se que 60% desses eventos estão associados a DPs, os quais incluem a contaminação do enrolamento, falha na proteção contra corona, descargas parciais internas e desprendimento da barra nas ranhuras ou saliências.

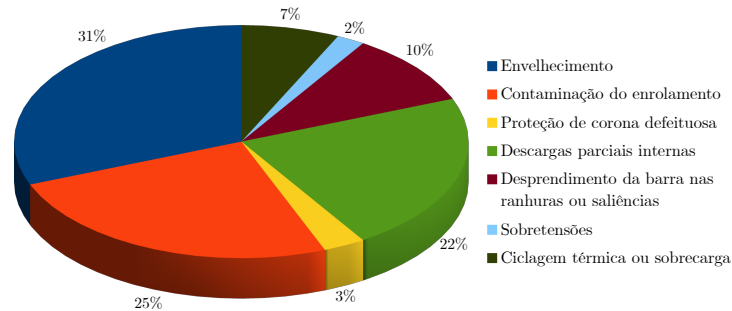


Figura 8 – Probabilidades respectivas dos fatores que levam a danos no isolamento [53]

A ocorrência de descargas parciais, especialmente na superfície da isolamento elétrica, resulta em frequentes colisões de íons e elétrons contra o material isolante. Essas interações constantes intensificam os processos de descarga, acelerando a degradação da isolamento. Manter a integridade do material isolante é crucial para assegurar o funcionamento eficiente e prolongar a vida útil de máquinas elétricas.

## 2.4 Equações de Maxwell

As equações de Maxwell representam a base fundamental do eletromagnetismo, descrevendo o comportamento dos campos elétrico e magnético e sua relação com as fontes de carga e corrente elétrica [56]. Essas equações podem ser expressas na forma diferencial como

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho, \quad (2.8)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0, \quad (2.9)$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}, \quad (2.10)$$

e

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}, \quad (2.11)$$

onde  $\vec{E}$  é o campo elétrico,  $\vec{D}$  é a densidade de fluxo elétrico,  $\vec{H}$  é o campo magnético,  $\vec{B}$  é a densidade de fluxo magnético,  $\rho$  é a densidade volumétrica de carga elétrica e  $\vec{J}$  é a densidade de corrente elétrica de condução. Essas equações podem ser divididas em duas categorias: as leis de Gauss, que descrevem o comportamento do campo elétrico na presença de cargas elétricas e do campo magnético na ausência de cargas magnéticas, e as leis de Faraday e Ampère-Maxwell, que governam a dinâmica dos campos eletromagnéticos e sua interação com correntes elétricas e campos variáveis no tempo.

Para facilitar a solução das equações de Maxwell, é comum expressar os campos elétrico e magnético em termos de potenciais. O campo densidade de fluxo magnético pode ser escrito como o rotacional do vetor potencial magnético  $\vec{A}$ , i.e.,

$$\vec{B} = \nabla \times \vec{A}. \quad (2.12)$$

Da mesma forma, o campo elétrico pode ser expresso em termos do potencial escalar elétrico  $V$  e do potencial vetor magnético  $\vec{A}$ , levando em conta a dependência temporal, através da equação

$$\vec{E} = -\nabla V - \frac{\partial \vec{A}}{\partial t}. \quad (2.13)$$

Em meios condutivos, a densidade de corrente elétrica de condução  $\vec{J}$  é governada pela lei de Ohm generalizada, definida pela equação

$$\vec{J} = \sigma \vec{E}, \quad (2.14)$$

onde  $\sigma$  é a condutividade elétrica do material. Entretanto, em meios dielétricos sujeitos a campos variáveis no tempo, também há a contribuição da densidade de corrente de deslocamento de Maxwell, dada por

$$\vec{J}_d = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}. \quad (2.15)$$

Se o meio estiver em movimento com velocidade  $\vec{v}$ , a força de Lorentz introduz um termo adicional à densidade de corrente  $\vec{J}_m$ , definido por

$$\vec{J}_m = \sigma \vec{v} \times \vec{B}. \quad (2.16)$$

Além disso, deve-se considerar a presença de uma corrente externa imposta,  $\vec{J}_e$ , levando à equação para a densidade de corrente elétrica total  $\vec{J}_t$ , dada por

$$\vec{J}_t = \partial \vec{D} / \partial t + \sigma \vec{E} + \sigma \vec{v} \times \vec{B} + \vec{J}_e. \quad (2.17)$$

Dessa forma, a equação de Ampère assume a forma

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J}_t, \quad (2.18)$$

que, por consequência, produz

$$\nabla \cdot \vec{J}_t = 0. \quad (2.19)$$

Neste trabalho, em que campos produzidos por descargas parciais têm componentes de alta frequência  $\omega$ , empregamos as equações de Maxwell no domínio da frequência na seguinte forma, dadas por

$$\vec{E} = -\nabla V - j\omega \vec{A}. \quad (2.20)$$

$$\vec{B} = \nabla \times \vec{A}, \quad (2.21)$$

$$\vec{J}_t = j\omega \vec{D} + \sigma \vec{E} + \sigma \vec{v} \times \vec{B} + \vec{J}_e, \quad (2.22)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J}_t. \quad (2.23)$$

e, finalmente,

$$\nabla \cdot \vec{J}_t = 0. \quad (2.24)$$

## 2.5 Método de Elementos Finitos

O método dos elementos finitos (FEM) é uma técnica numérica para obter soluções aproximadas para problemas de valor de contorno na engenharia, na física e na matemática. Ele foi proposto pela primeira vez na década de 1940 por Courant para resolver problemas de equilíbrio e vibração [57], e seu uso começou na década de 1950 no design de aeronaves. Desde então, o método foi desenvolvido e amplamente aplicado a problemas de elasticidade e análise estrutural e, cada vez mais, a problemas em outras áreas, como dinâmica dos fluidos e eletromagnetismo.

O FEM requer uma série de oito etapas para a solução precisa do modelo eletromagnético [58], embora essa sequência de passos também possa ser utilizada em outras áreas, como análise estrutural na engenharia civil e estudos térmicos na engenharia mecânica. O primeiro passo é a escolha entre o uso de um modelo bidimensional (2D) ou tridimensional (3D). Nos casos em que a distribuição do campo mantém um padrão semelhante ao longo de seções transversais paralelas na maior parte do dispositivo, e em que a geometria do modelo apresenta simetria ao longo de um eixo longitudinal, a abordagem 2D é a mais indicada. Para geometrias mais complexas, sem um padrão claro de simetria, ou quando se deseja obter uma análise mais detalhada da distribuição do campo, a modelagem 3D é necessária.

Em seguida, realiza-se a definição do domínio. O FEM exige que o domínio de análise esteja cercado por uma fronteira fechada, sendo uma linha para modelos 2D e uma superfície para modelos 3D. O próximo passo é a discretização do domínio de análise em regiões menores, os elementos finitos propriamente ditos. Normalmente, são utilizados polígonos e poliedros simples como elementos finitos nos modelos 2D e 3D, respectivamente, conforme ilustrado na Figura 9.

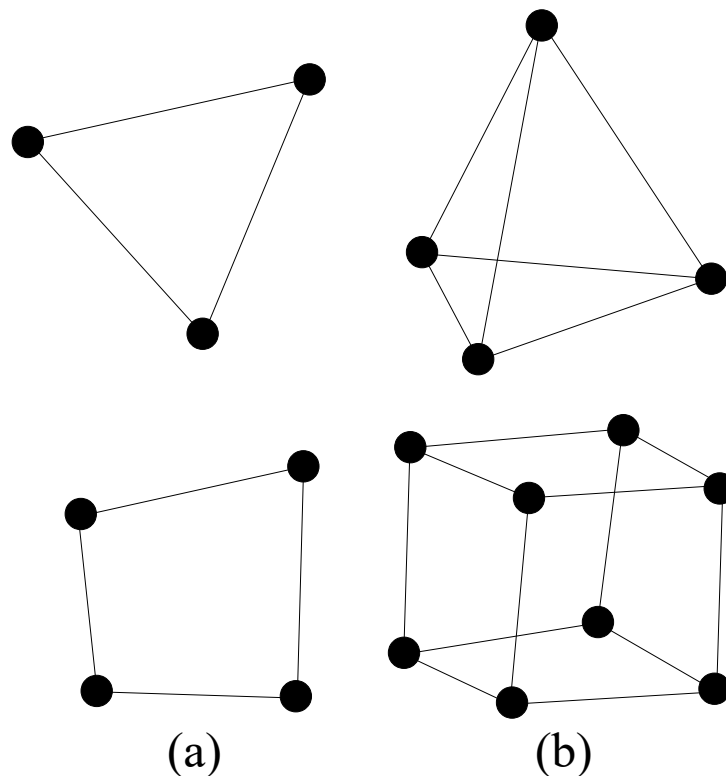


Figura 9 – Exemplos de elementos finitos para problemas (a) 2D e (b) 3D.

Uma vez escolhido o tipo de elemento, inicia-se a discretização, levando em consideração

que cada elemento pode ser constituído por um único material. A interseção entre dois elementos deve ser uma face, uma aresta ou um ponto, e, em regiões onde há maior variação do campo, uma maior densidade de elementos será necessária. O próximo passo é a definição da função interpoladora para os elementos. O conceito de interpolação é utilizado quando se deseja estimar o valor de uma função em um determinado ponto com base nos valores dessa mesma função em pontos vizinhos. A escolha da função interpoladora está diretamente relacionada ao tipo de elemento adotado para a discretização do domínio. Como exemplo, um tetraedro pode ser utilizado como elemento para um domínio de análise 3D, conforme mostrado na Figura 10. A análise tem como objetivo determinar a variável nodal, que pode ser uma função escalar, como o potencial elétrico, ou um campo vetorial, como o vetor potencial magnético. Em alguns casos, ambos podem estar presentes, como ocorre na análise de campos eletromagnéticos dependentes do tempo. Com esse conceito em mente, consideremos que uma função escalar  $f(x, y, z)$  representa a distribuição espacial de uma grandeza física dentro de um elemento. Se assumirmos que essa função é contínua, como ocorre nos potenciais elétrico e magnético, ela pode ser expressa como

$$f(x, y, z) = \alpha_1 + \alpha_2 x + \alpha_3 y + \alpha_4 z, \quad (2.25)$$

onde os coeficientes  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ ,  $\alpha_3$  e  $\alpha_4$  devem ser determinados.

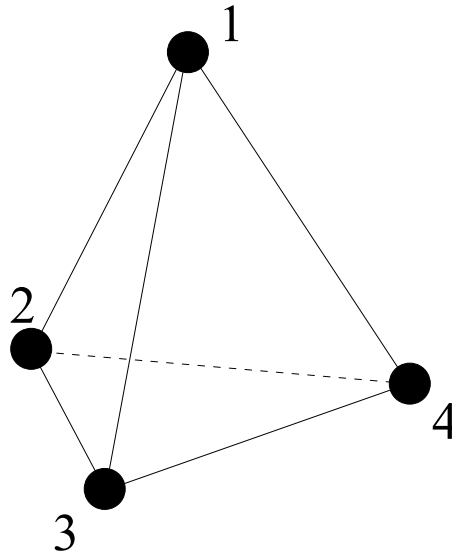


Figura 10 – Exemplo de elemento tetraédrico com os nós numerados.

Para encontrar esses coeficientes, basta escrever a função  $f(x, y, z)$  nos nós do elemento,

resultando no seguinte sistema:

$$f_1 = f(x_1, y_1, z_1) = \alpha_1 + \alpha_2 x_1 + \alpha_3 y_1 + \alpha_4 z_1, \quad (2.26)$$

$$f_2 = f(x_2, y_2, z_2) = \alpha_1 + \alpha_2 x_2 + \alpha_3 y_2 + \alpha_4 z_2, \quad (2.27)$$

$$f_3 = f(x_3, y_3, z_3) = \alpha_1 + \alpha_2 x_3 + \alpha_3 y_3 + \alpha_4 z_3, \quad (2.28)$$

e

$$f_4 = f(x_4, y_4, z_4) = \alpha_1 + \alpha_2 x_4 + \alpha_3 y_4 + \alpha_4 z_4. \quad (2.29)$$

Esse sistema de equações  $4 \times 4$  pode ser resolvido para obter os coeficientes  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$  e  $\alpha_4$ , que são expressos como:

$$\alpha_1 = \frac{1}{6V_l} (a_1 f_1 + a_2 f_2 + a_3 f_3 + a_4 f_4), \quad (2.30)$$

$$\alpha_2 = \frac{1}{6V_l} (b_1 f_1 + b_2 f_2 + b_3 f_3 + b_4 f_4), \quad (2.31)$$

$$\alpha_3 = \frac{1}{6V_l} (c_1 f_1 + c_2 f_2 + c_3 f_3 + c_4 f_4), \quad (2.32)$$

e

$$\alpha_4 = \frac{1}{6V_l} (d_1 f_1 + d_2 f_2 + d_3 f_3 + d_4 f_4), \quad (2.33)$$

sendo

$$a_1 = \begin{vmatrix} x_2 & y_2 & z_2 \\ x_3 & y_3 & z_3 \\ x_4 & y_4 & z_4 \end{vmatrix}, \quad (2.34)$$

$$b_1 = \begin{vmatrix} 1 & y_2 & z_2 \\ 1 & y_3 & z_3 \\ 1 & y_4 & z_4 \end{vmatrix}, \quad (2.35)$$

$$c_1 = \begin{vmatrix} 1 & x_2 & z_2 \\ 1 & x_3 & z_3 \\ 1 & x_4 & z_4 \end{vmatrix}, \quad (2.36)$$

$$d_1 = \begin{vmatrix} 1 & x_2 & y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 \\ 1 & x_4 & y_4 \end{vmatrix}, \quad (2.37)$$

e

$$6V_l = \det \begin{vmatrix} 1 & x_1 & y_1 & z_1 \\ 1 & x_2 & y_2 & z_2 \\ 1 & x_3 & y_3 & z_3 \\ 1 & x_4 & y_4 & z_4 \end{vmatrix}. \quad (2.38)$$

Os demais coeficientes podem ser obtidos por meio de rotação cíclica dos índices, e  $V_l$  representa o volume do elemento tetraédrico.

Substituindo os coeficientes na equação (2.25) e realizando algumas manipulações matemáticas, obtemos a seguinte expressão

$$f(x, y, z) = N_1(x, y, z)f_1 + N_2(x, y, z)f_2 + N_3(x, y, z)f_3 + N_4(x, y, z)f_4 \quad (2.39)$$

onde

$$N_i(x, y, z) = \frac{1}{6V_l}(a_i + b_i x + c_i y + d_i z) \quad i = 1, 2, 3, 4. \quad (2.40)$$

As funções  $N_1(x, y, z)$ ,  $N_2(x, y, z)$ ,  $N_3(x, y, z)$  e  $N_4(x, y, z)$  são as funções de forma do elemento finito tetraédrico de primeira ordem. Elas satisfazem a seguinte condição:

$$N_i(x_j, y_j, z_j) = \begin{cases} 1, & \text{se } i = j \\ 0, & \text{se } i \neq j \end{cases}, \quad (2.41)$$

em que o valor da função  $N_i$  é 1 no nó  $i$  e zero nos demais três nós.

Uma forma compacta de representar a função de interpolação de primeira ordem é:

$$f(x, y, z) = \sum_{i=1}^4 N_i(x, y, z)f_i. \quad (2.42)$$

Essa equação expressa  $f(x, y, z)$  como uma combinação linear dos valores nodais  $f_i$ , ponderados pelas respectivas funções de forma  $N_i$ . Essa abordagem permite estimar a função nodal dentro do elemento, garantindo uma interpolação linear da grandeza física analisada.

Uma vez definida a função de interpolação do sistema, é estabelecido o tipo de estudo e as propriedades utilizadas nos elementos gerados. Para resolver um problema eletromagnético

utilizando FEM, é necessário caracterizar as regiões que compõem o dispositivo por meio de uma ou mais propriedades físicas. Assim, para cada elemento finito, deve-se atribuir as propriedades físicas associadas ao fenômeno presente no dispositivo. Em problemas eletrostáticos, é necessário conhecer a permissividade elétrica  $\varepsilon$  dos materiais e atribuí-la aos elementos correspondentes. No caso da magnetostática, a propriedade física relevante é a permeabilidade magnética  $\mu$ . Em problemas eletrodinâmicos, as propriedades a serem consideradas são a condutividade elétrica  $\sigma$ ,  $\varepsilon$  e  $\mu$  para uma análise completa.

O próximo passo é a definição das condições de contorno para o domínio. Considerando que o FEM envolve equações diferenciais, a solução só pode ser obtida quando essas condições são estabelecidas, pois atuam como restrições essenciais para garantir um sistema bem condicionado fisicamente e matematicamente. Sem essas condições, o sistema de equações resultante não teria uma solução única e bem definida.

Nos problemas que envolvem campos eletromagnéticos, as condições de contorno são impostas nos limites do domínio analisado e podem ser classificadas de diferentes formas. Em alguns casos, a variável de interesse tem seu valor conhecido em determinadas regiões da fronteira do domínio, o que caracteriza uma condição de Dirichlet. Outra forma de impor restrições é através da condição de Neumann, que determina como os campos elétrico e magnético se comportam ao longo da fronteira do domínio. Nesse caso, considerando que os campos elétrico e magnético são acoplados, o campo elétrico deve ser tangente à borda da região analisada, enquanto o campo magnético se orienta de forma normal a essa fronteira [58]. Essa abordagem é especialmente útil para garantir a continuidade e a coerência do comportamento do campo no espaço.

Além dessas duas condições, existe ainda a condição de periodicidade, aplicada a estruturas que apresentam um padrão repetitivo ao longo do domínio. Um exemplo clássico desse tipo de situação ocorre em máquinas elétricas, onde o padrão de um polo magnético se repete ao longo da estrutura circular. Quando essas condições são aplicadas corretamente, é possível reduzir significativamente o esforço computacional da análise, pois basta estudar uma pequena parte da estrutura para prever o comportamento global do sistema.

Após atribuir as propriedades físicas a cada elemento finito e definir as condições de contorno, o próximo passo é a formulação do sistema de equações, que pode ser representado por

$$[A] \cdot [x] = [b], \quad (2.43)$$

onde  $[A]$  representa a matriz global do sistema, cuja ordem corresponde ao número de nós

da malha de elementos finitos,  $[x]$  é o vetor de incógnitas ou variáveis de estado, podendo conter potenciais escalares ou componentes de campos vetoriais, e  $[b]$  é o vetor de fontes, cujos elementos dependem das intensidades das fontes de campo e das condições de contorno impostas.

Alguns problemas podem envolver sistemas não lineares, nos quais os coeficientes da matriz global  $[A]$  dependem dos valores do vetor incógnita  $[x]$ . Para esses casos, como em materiais ferromagnéticos presentes em máquinas elétricas e transformadores, a solução é obtida por meio de um processo iterativo, onde a equação (2.43) precisa ser resolvida repetidamente até atingir a precisão desejada para a solução. O número de iterações necessárias depende tanto do grau de não linearidade do problema quanto da exatidão exigida.

Uma das formas de calcular e obter essas matrizes é pelo método de Galerkin [59, 60]. O método de Galerkin é uma técnica numérica utilizada para minimizar o erro de uma equação diferencial parcial (EDP), tornando esse erro ortogonal a uma função de peso. Para exemplificar, considere a equação de Poisson, dada por

$$\nabla^2 u = f, \quad \text{em } \Omega, \quad (2.44)$$

sendo  $u$  e  $f$  representações simbólicas de campos, podendo corresponder a vetores, escalares ou uma combinação de ambos. Considerando condições de contorno de Dirichlet homogênea e Neumann, as condições de contorno assumem as seguintes formas respectivas:

$$u = 0, \quad (2.45)$$

e

$$\frac{\partial u}{\partial n} = 0 \quad (2.46)$$

No método de Galerkin, a equação (2.44) é multiplicada por uma função de teste  $w$  e integrada sobre o domínio  $\Omega$  em ambos os lados, obtendo-se:

$$\int_{\Omega} w \nabla^2 u \, d\Omega = \int_{\Omega} w f \, d\Omega. \quad (2.47)$$

Em seguida, para facilitar a resolução, aplica-se integração por partes para reduzir a ordem da derivada, resultando em:

$$\int_{\Omega} w \nabla^2 u \, d\Omega = - \int_{\Omega} \nabla w \cdot \nabla u \, d\Omega + \int_{\partial\Omega} w \frac{\partial u}{\partial n} \, dS. \quad (2.48)$$

Como  $u = 0$  em  $\partial\Omega$ , o segundo termo desaparece, e obtemos a forma fraca da equação:

$$\int_{\Omega} \nabla w \cdot \nabla u \, d\Omega = \int_{\Omega} w f \, d\Omega. \quad (2.49)$$

Agora, considerando a discretização do domínio  $\Omega$  por elementos finitos tetraédricos, a função  $u(x)$  é aproximada pelas funções de forma associadas a cada nó  $i$ , como mostrado em:

$$u(x) \approx \sum_{i=1}^N U_i N_i(x, y, z). \quad (2.50)$$

Substituindo essa aproximação na equação (2.49), e definindo as funções de teste como as funções de forma dos nós ( $w = N_i(x, y, z)$ ), é obtida a formulação variacional:

$$\sum_{i=1}^N U_i \int_{\Omega} \nabla N_j \cdot \nabla N_i d\Omega = \int_{\Omega} N_j f d\Omega, \quad \forall j. \quad (2.51)$$

Assim, é possível definir o sistema linear de matrizes da equação (2.43) como:

$$A_{ji} = \int_{\Omega} \nabla N_j \cdot \nabla N_i d\Omega. \quad (2.52)$$

$$[x] = [U_1, U_2, \dots, U_N]^T. \quad (2.53)$$

$$b_j = \int_{\Omega} N_j f d\Omega. \quad (2.54)$$

Isso resulta em um sistema linear para determinar os coeficientes  $U_i$ , que representam a aproximação da solução  $u(x)$  nos nós da malha.

Para o caso analisado neste trabalho, um procedimento similar foi utilizado para discretizar os campos e os potenciais e resolver o sistema das equações (2.20), (2.21), (2.22), (2.23) e (2.24).

O próximo passo, após a solução do sistema de equações, é o pós-processamento dos dados obtidos. Para uma melhor análise dos resultados, os valores numéricos são convertidos em representações gráficas, facilitando a interpretação. É possível visualizar a distribuição do campo no domínio analisado por meio de uma escala de cores, ou ainda exibir gráficos que mostram a variação dos potenciais ou dos campos em função do espaço ou do tempo, dependendo do tipo de estudo realizado.

## 2.6 Modelagem Computacional

Para estudar o efeito e a distribuição de campo elétrico induzido por uma DP no hidrogênio da usina de Campos Novos [35], foi feita uma modelagem tridimensional por meio do FEM

no domínio da frequência [61] através do *software* comercial *COMSOL Multiphysics* [62]. Para isso, foi utilizado o módulo *Magnetic and Electric Fields*, usando como base para o cálculo as equações (2.20), (2.21), (2.22), (2.23) e (2.24). Com base na documentação e dimensionamento do hidrogenador detalhados na Tabela 1 [35], foi concebido um modelo correspondente a um setor de doze graus do gerador, como representado na Figura 11.

Para simular o modelo do estator, foram representadas 24 barras estatóricas compostas de cobre cobertas por camadas dielétricas de mica pintadas em sua superfície com tinta semicondutora. Concreto foi modelado para representar as paredes externas do recinto que contém a máquina e para o rotor foi modelada uma cobertura de resina epóxi. Esses materiais foram definidos no modelo de acordo com [35]. As propriedades eletromagnéticas dos materiais modelados na simulação são mostradas na Tabela 2, de forma que valores os parâmetros permeabilidade relativa  $\mu_r$ , permissividade relativa  $\epsilon_r$  e condutividade elétrica  $\sigma$  mostrados são baseados em [43, 56, 62–66].

Para o modelo do núcleo magnético do estator, foram adicionadas estruturas distintas separadas com espaços de 5 mm para ventilação [35], como exibido na Figura 11 (b). Para obter um modelo linear para o material do núcleo, foi utilizado o valor de permeabilidade relativa  $\mu_r = 1330$  calculado a partir dos dados publicados em [66]. O procedimento realizado foi o seguinte: com base na curva de histerese de [66], foram extraídos os valores respectivos dos campos  $\vec{B}$  e  $\vec{H}$ . Com esses valores foi aplicada a relação

$$\mu_r = \frac{|\vec{B}|}{|\mu_0 \vec{H}|}, \quad (2.55)$$

sendo  $\mu_0$  a permeabilidade magnética no vácuo. Assim, com os valores obtidos para  $\mu_r$ , foi traçado o gráfico da Figura 12, relacionando os valores de  $\vec{B}$  com seus valores de permeabilidade relativa respectivos. Dessa forma, utilizando a distribuição vetorial da densidade de fluxo magnético  $\vec{B}$ , obtida por simulação para o caso sem o núcleo, foi realizada uma média da intensidade do campo na região das barras, sendo possível utilizar o gráfico para estimar, de forma aproximada, o valor efetivo da permeabilidade. A amplitude do vetor  $\vec{B}$  é limitada a 0,25 T, valor este utilizado para definir  $\mu_r$  utilizando o gráfico da Figura 12.

Após o cálculo para a permeabilidade do núcleo, foram aplicadas condições de contorno nas superfícies externas do modelo. Como exibido na Figura 13 (a), para as superfícies destacadas em azul foi aplicada a condição de isolamento magnético dada por

$$\vec{n} \times \vec{A} = 0, \quad (2.56)$$

Tabela 1 – Dimensões usadas para o modelo de hidrogerador [35].

| Parâmetro                             | Valor     |
|---------------------------------------|-----------|
| Altura do hidrogerador                | 5,00 m    |
| Altura das barras estatóricas         | 3,96 m    |
| Raio do rotor                         | 3,96 m    |
| Diâmetro externo do núcleo do estator | 8,36 m    |
| Diâmetro interno do núcleo do estator | 7,64 m    |
| Número de ranhuras                    | 378       |
| Tipo de enrolamento                   | Imbricado |

Tabela 2 – Propriedades eletromagnéticas usadas para os materiais.

| Material                          | $\mu_r$ | $\epsilon_r$ | $\sigma$         |
|-----------------------------------|---------|--------------|------------------|
| Cobre [62]                        | 1,0     | 1,0          | 59,98 MS/m       |
| Mica [63]                         | 1,0     | 3,8          | 103,94 $\mu$ S/m |
| Tinta semicondutora [43]          | 1,0     | 1,0          | 20 S/m           |
| Ar [56]                           | 1,0     | 1,0          | 0,0 S/m          |
| Concreto [64]                     | 1,0     | 6,0          | 10 $\mu$ S/m     |
| Resina epóxi [65]                 | 1,0     | 10,3         | 0,0 S/m          |
| Material do núcleo magnético [66] | 1330,0  | 1,0          | 0,0 S/m          |

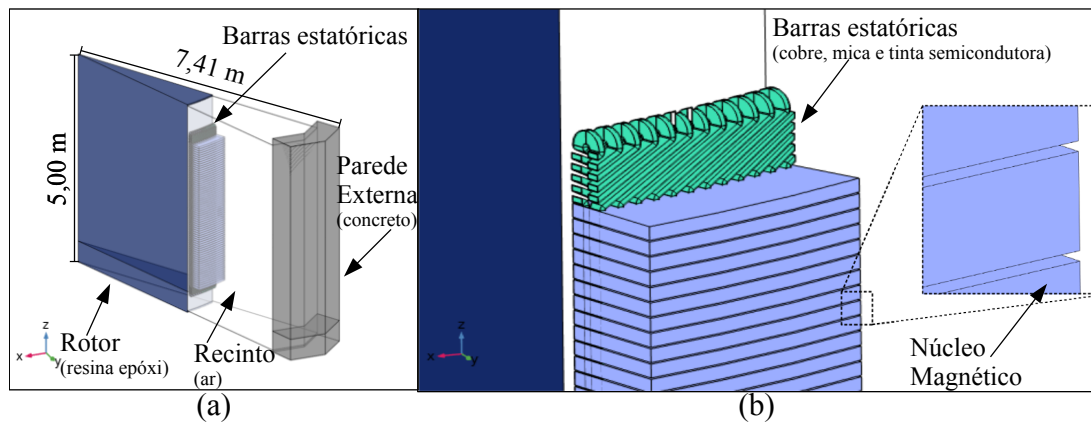


Figura 11 – Modelo de setor de gerador: (a) Modelo de setor de gerador (b) detalhe do modelo para as barras e núcleo magnético do estator.

sendo  $\vec{A}$  o vetor potencial magnético definido por  $\vec{B} = \nabla \times \vec{A}$ , permite-se que as componentes tangenciais de  $\vec{A}$  e normais de  $\vec{B}$  às paredes sejam nulas nas superfícies indicadas na Figura 13 (a).

Foi aplicada uma condição de contorno periódica nas superfícies em destaque na Figura

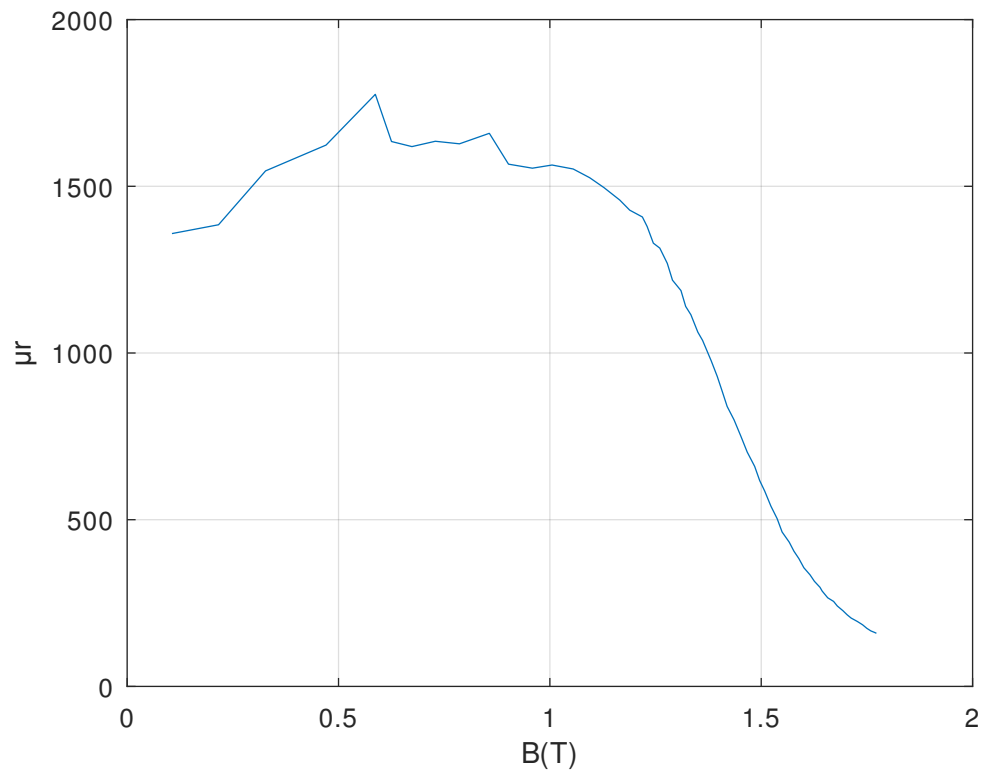


Figura 12 – Permeabilidade relativa  $\mu_r$  do núcleo magnético em função de  $|\vec{B}|$ .

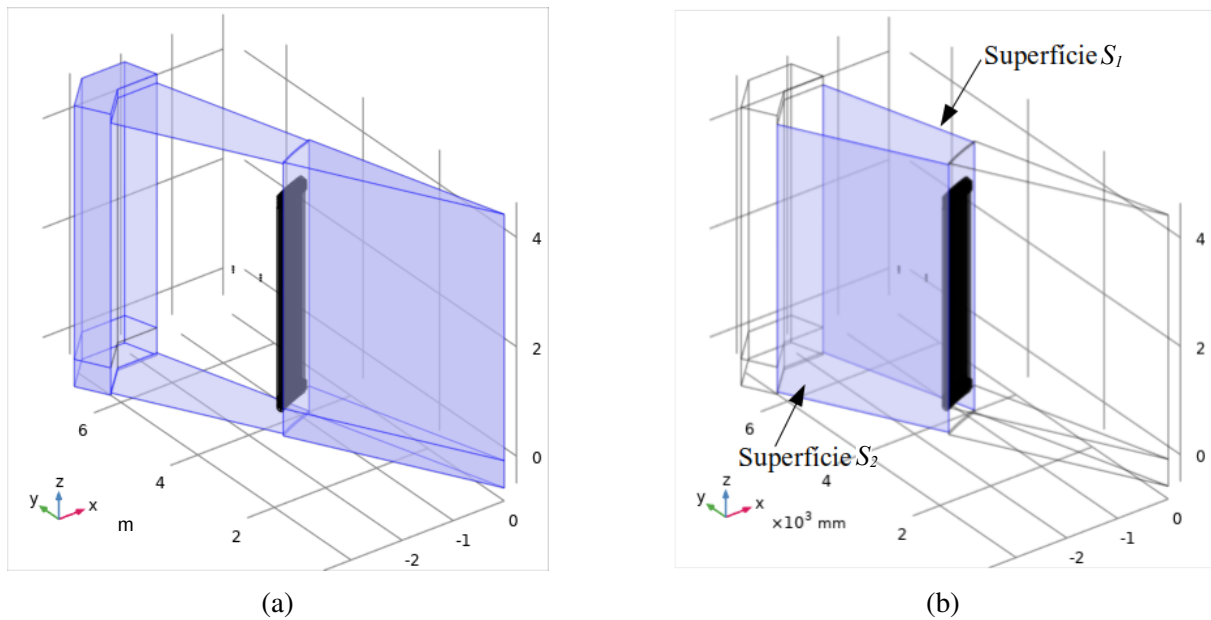


Figura 13 – Condições de contorno para as superfícies: (a) isolamento magnético e (b) condição periódica.

13 (b), correspondendo ao recinto do gerador. Para essas regiões, são obedecidas as condições

$$V_{S_1} = V_{S_2} \quad (2.57)$$

e

$$\vec{A}_{S_1} = \vec{A}_{S_2}, \quad (2.58)$$

em que  $V_{S_1}$  e  $V_{S_2}$  são respectivamente os potenciais elétricos nas superfícies  $S_1$  e  $S_2$  e  $\vec{A}_{S_1}$  e  $\vec{A}_{S_2}$  são respectivamente os potenciais magnéticos nas superfícies  $S_1$  e  $S_2$ .

## 2.7 Caracterização das Descargas Parciais

Para a introdução do fenômeno de DP, foi escolhido para a simulação o uso de uma descarga do tipo corona [67]. Essas descargas muitas vezes ocorrem na superfície das barras estatóricas e podem ser devidas a um corpo estranho à estrutura: um eletrodo formado por uma ponta fina na superfície do estator. Essas pontas podem ocorrer devido a farpas ou objetos deixados no gerador ou nas junções próximas aos terminais de saída do enrolamento, produzindo campo elétrico elevado. Por ser um fenômeno eletromagnético formado por componentes de alta frequência, essas frequências podem ser usadas para determinar o tipo de descarga [67], ou avaliar o estado da tinta semicondutora e/ou da isolamento da máquina.

Dessa forma, com os dados obtidos em [68], foi possível avaliar o espectro de frequência registrado experimentalmente para descargas parciais registradas em uma barra estatórica e extrair os principais picos de maior amplitude, sendo estes 40 MHz, 118 MHz e 209 MHz, como observado na Figura 14.

Entretanto, por causa de limitações computacionais devido ao método numérico, só foi possível realizar a simulação para a frequência de 40 MHz. Para esta frequência, foram utilizados 2.766.399 elementos, sendo necessários 96,5 GB de memória para executar a simulação. Foi utilizado o módulo *Magnetic and Electric Fields*, no domínio da frequência.

Com isso, foram realizadas simulações para 2 casos. Para um caso foi adicionado ao modelo do gerador um pequeno elemento representando o canal de descarga (0,1 mm × 0,1 mm × 1,0 mm) no topo da barra do estator com uma corrente unitária (1 A) conforme indicado na Figura 15 (Caso A), enquanto que, no outro caso, o elemento da descarga foi adicionado na região inferior da barra considerando a mesma espira, conforme mostrado na Figura 16 (Caso B). Essas simulações indicam os casos mais prováveis para posicionamento de um contaminante pontiagudo.

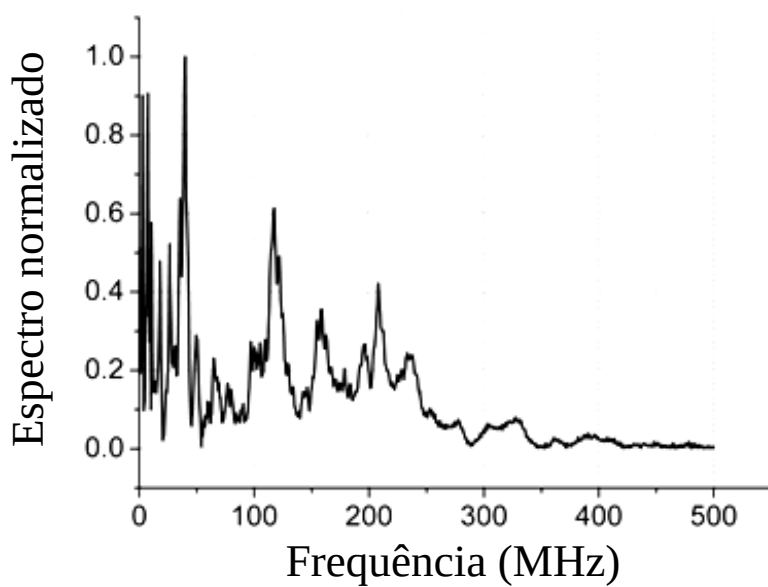


Figura 14 – Espectro médio de descargas parciais no domínio da frequência. Adaptado de [68]

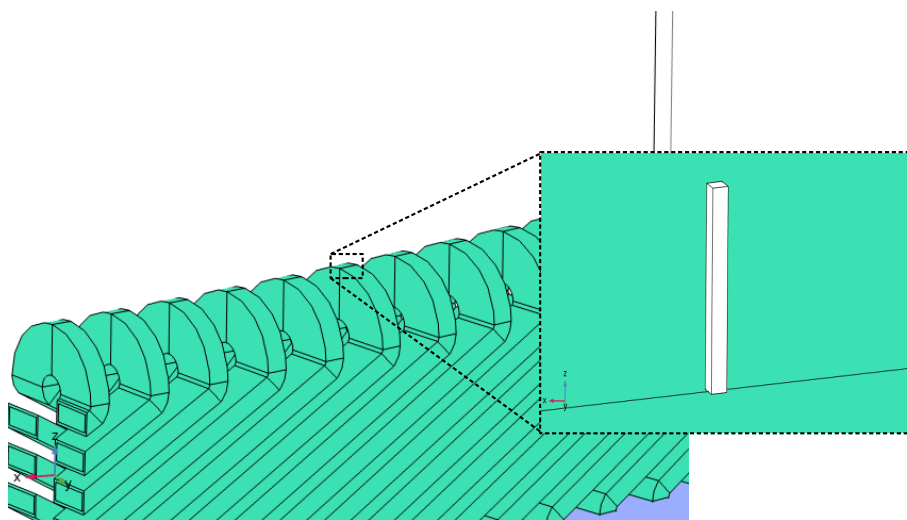


Figura 15 – Local do elemento de DP adicionado à junção superior entre as barras da espira (Caso A).

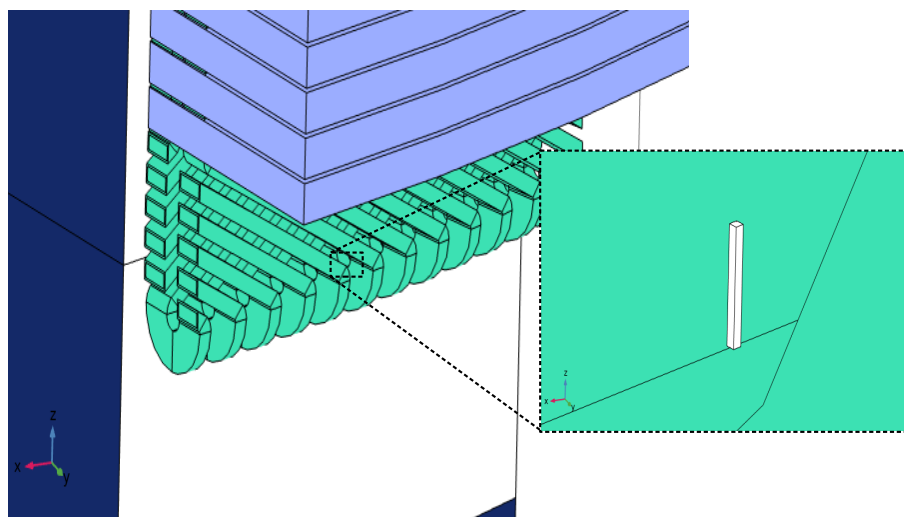


Figura 16 – Local do elemento de DP adicionado à junção inferior entre as barras da espira (Caso B).

### 3 Resultados

Nesta seção, são mostrados e discutidos os resultados obtidos para descargas parciais em estator de máquina rotativa. Para a análise da distribuição do campo elétrico, foram utilizados quatro planos de visualização, sendo dois planos normais ao eixo  $z$  na altura de ocorrência das DPs superior e inferior, um plano ortogonal ao eixo  $r$  do sistema de coordenadas cilíndricas e um último plano normal ao versor  $\hat{a}_\varphi$  (para os dois últimos casos,  $\varphi$  é correspondente à coordenada angular da DP). Os planos de análise são mostrados na Figura 17.

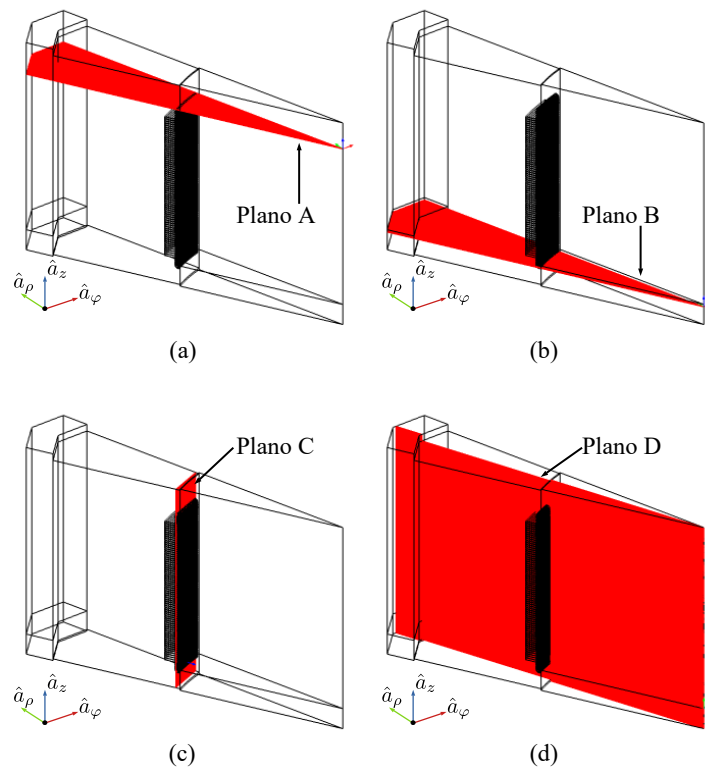


Figura 17 – Planos para visualização de resultados, (a)  $\tilde{A}$  altura da descarga para o Caso A, (b)  $\tilde{B}$  altura da descarga para o Caso B, (c) normal ao eixo radial  $r$  e (d) normal ao versor  $\hat{a}_\varphi$ . As coordenadas  $r$  e  $\varphi$  são relativas ao sistema cilíndrico padrão de coordenadas.

Para o cálculo de voltagens induzidas, foram definidos dois tipos de caminhos de integração para cada elemento do estator (barra estática): um sendo entre o piso e o ponto mais inferior da barra (tipo C1) e o outro sendo entre o piso e um ponto da barra posicionado 77mm acima da sua ponta inferior da barra estática (tipo C2), como representado na Figura 18. Após

serem definidos os caminhos de integração, foram realizadas integrais de linhas da componente do campo elétrico paralela à direção de integração. Esses cálculos foram realizados dessa forma pois se aproximam do procedimento de laboratório descrito em [62] para se obter voltagens produzidas por DPs em barras estatóricas.

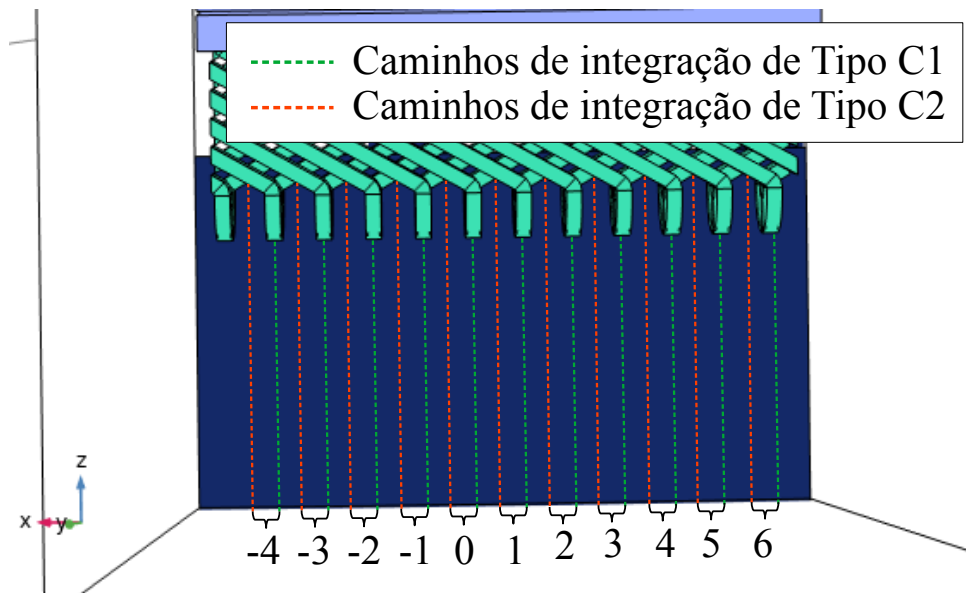


Figura 18 – Caminhos de integração usados para cálculos de voltagens entre as barras e o piso. Os números indicam as barras distintas no estator, sendo 0 a barra em que foram aplicadas as DP para ambos os casos.

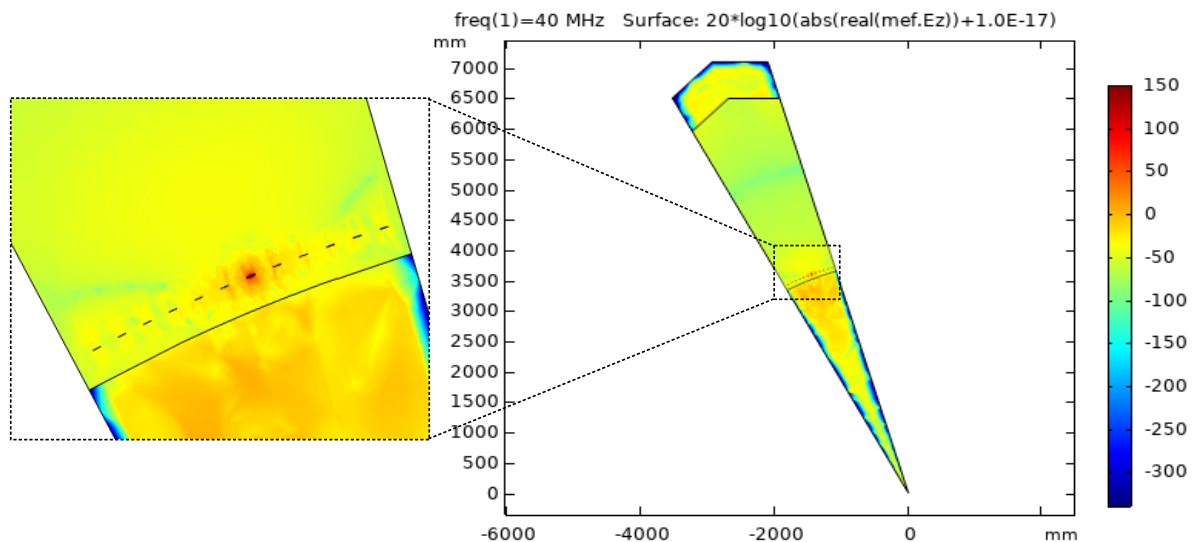


Figura 19 – Distribuição da parte real  $E_z$  no plano A, escala em Decibéis (Caso A).

Com isso, para o caso da descarga na junção superior (caso A), foram traçadas as distribuições da parte real da componente  $z$  do campo  $\vec{E}$ , como observado nas Figuras 19-24. Os

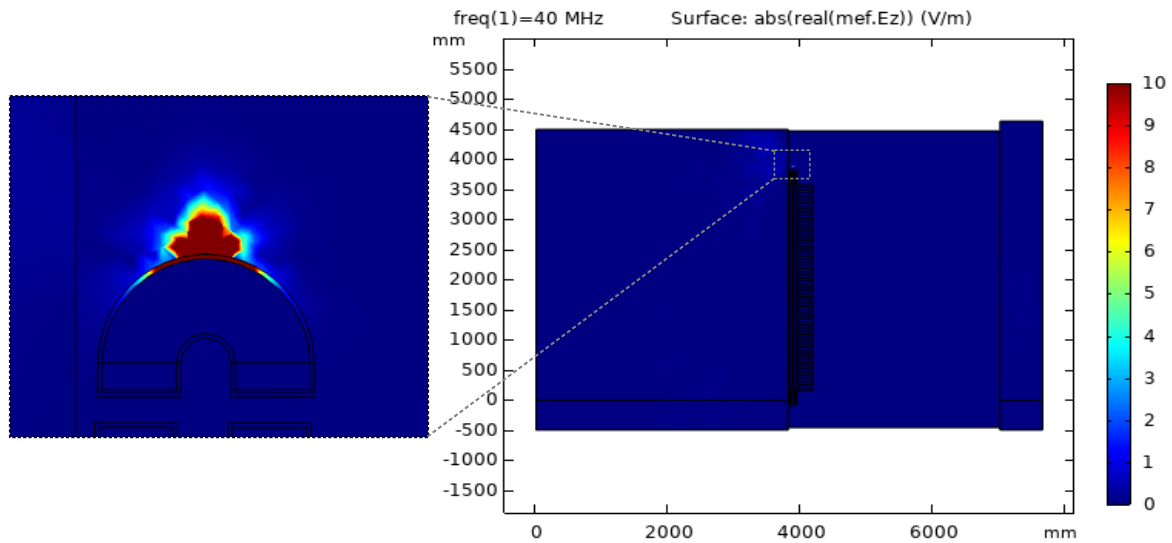


Figura 20 – Distribuição da parte real de  $E_z$  no plano D, escala de 0 a 10 V/m (Caso A).

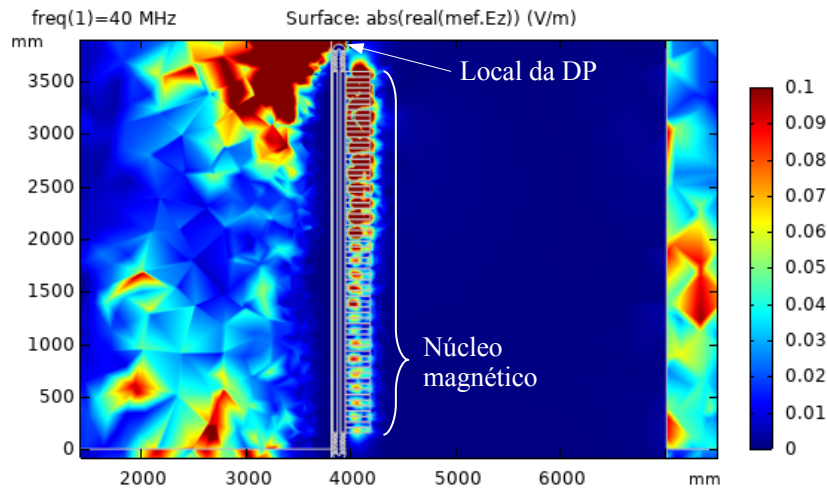


Figura 21 – Distribuição da parte real de  $E_z$  no plano D, escala de 0 a 0,1 V/m (Caso A).

valores máximos da escala foram ajustados para melhor visualização, sendo 8,83 MV/m a maior intensidade de campo registrada no modelo. Observam-se na Figura 22 as voltagens calculadas entre os diferentes pontos das espiras e o piso.

Para o caso da descarga na junção inferior das barras (caso B), as distribuições de  $E_z$  estão exibidas nas Figuras 23-25 sendo a maior intensidade de campo registrada no modelo igual a 9,12 MV/m. São exibidas na Figura 26 as voltagens calculadas entre as barras estáticas e a referência no piso.

Observando os resultados obtidos, são aparentes os efeitos que a posição da DP e a

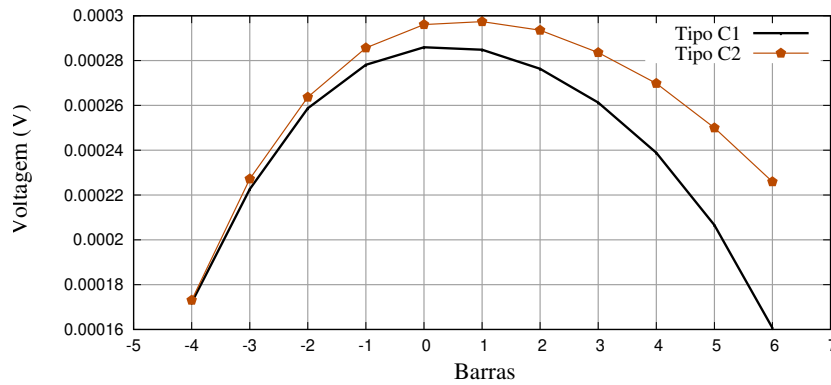


Figura 22 – Tensões calculadas entre as barras do estator e o piso (Caso A).

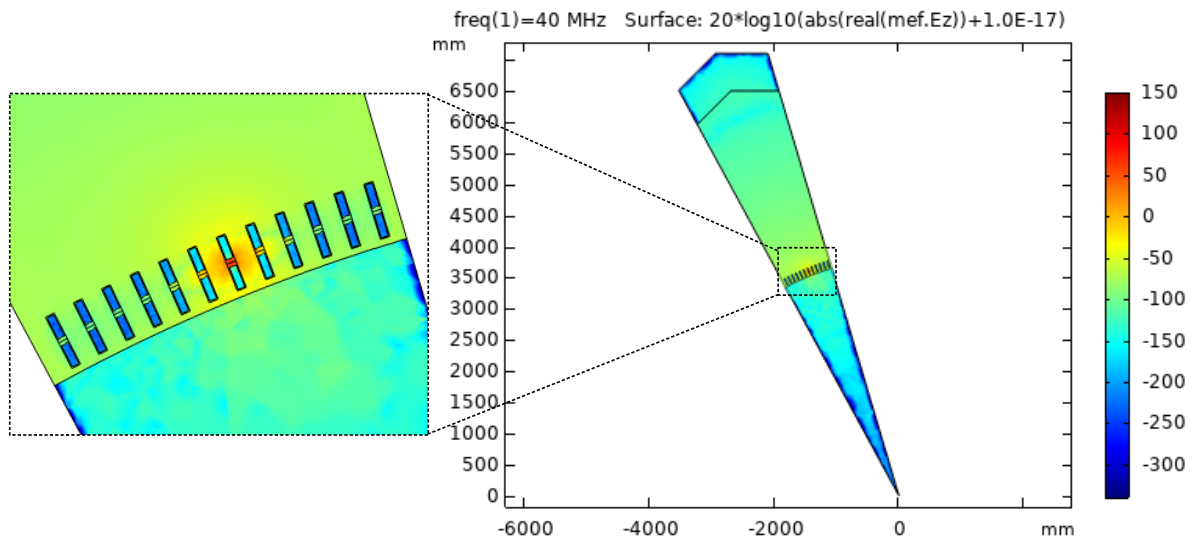


Figura 23 – Distribuição da parte real de  $E_z$  no plano B, escala em Decibéis (Caso B).

geometria da máquina causam na distribuição de campo elétrico no gerador. Comparando-se as distribuições para os dois casos, nota-se uma distribuição de campo mais intensa para o caso de descarga na junção superior quando comparada com o caso na junção inferior. Este fenômeno se deve em parte ao fato de que o gerador, e em especial o estator, é constituído por diversas partes metálicas que limitam a propagação do campo eletromagnético e produzem elevada reflexão das ondas, especialmente no caso B. Como se observa nas Figuras 15 e 20, para a DP superior, há poucos objetos que refletem o campo nas proximidades da descarga, enquanto que a DP inferior,

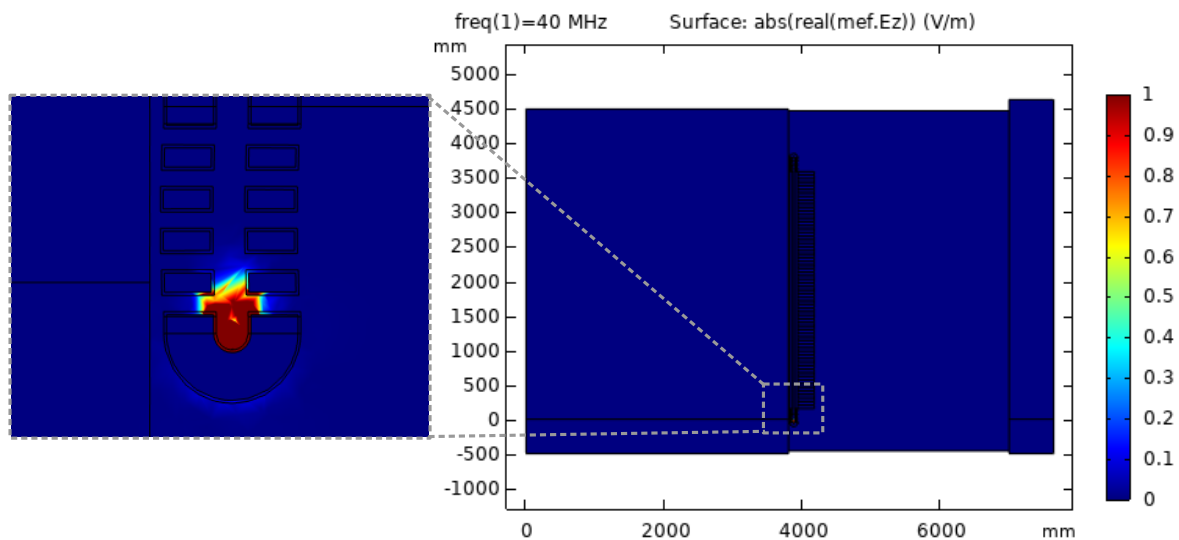


Figura 24 – Distribuição da parte real de  $E_z$  no plano D, escala de 0 a 1 V/m (Caso B).

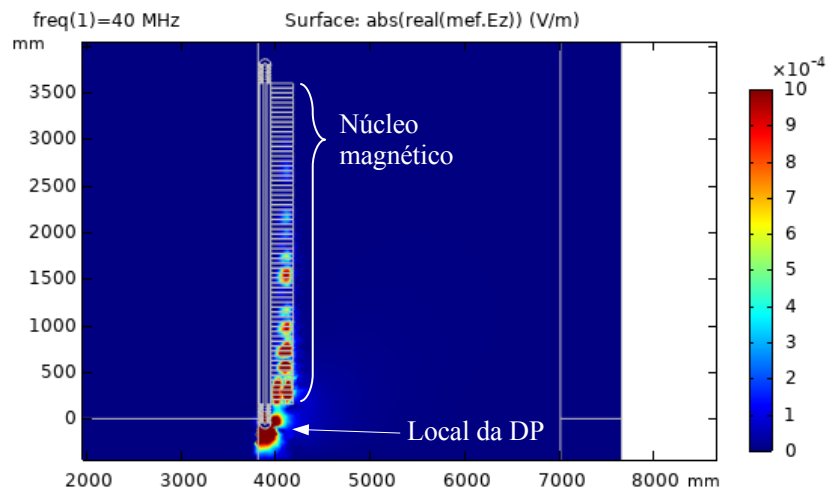


Figura 25 – Distribuição da parte real de  $E_z$  no plano D, escala de 0 a 1 mV/m (Caso B).

como visto na Figura 16, ocorre na região côncava entre as espiras, de forma que a propagação do seu campo é dificultada pelos condutores internos das barras estatóricas, que propiciam uma blindagem eletromagnética parcial nas proximidades da região onde a DP é excitada, como visto na 24.

Enquanto isso, ao observar o resultado dos cálculos das voltagens para as barras utilizando os caminhos de integração tipo C1 e tipo C2, nota-se que, com exceção das barras mais próximas da espira com DP, as barras para o caso com a descarga superior tiveram voltagens maiores do que no caso B, apesar da proximidade da descarga na junção inferior no segundo caso. Isso se deve à influência do núcleo magnético, que concentra os campos eletromagnéticos em si,

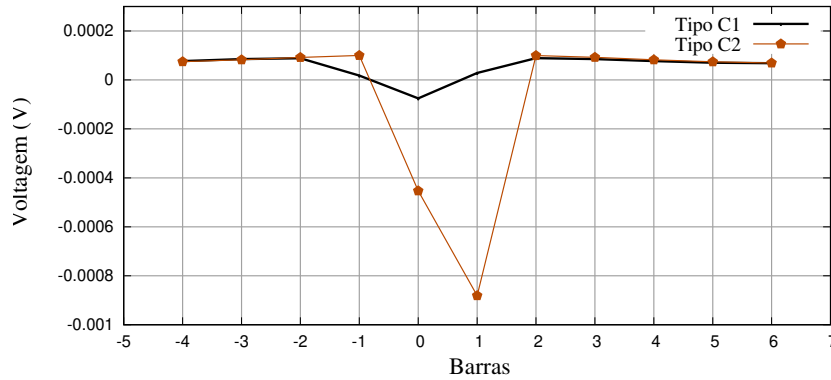


Figura 26 – Tensões calculadas entre as barras do estator e o piso (Caso B).

auxiliando na propagação da onda ao longo de sua estrutura, como se observa na Figura 21. Dessa forma, o campo eletromagnético se propaga por esta estrutura do lado superior para o lado inferior da espira, aumentando as tensões induzidas calculadas para o Caso A. Comparando a Figura 21 e a Figura 25, devido ao interior metálico da espira, verifica-se o efeito de blindagem parcial para o caso B, de forma que a onda passa por múltiplas reflexões para chegar na região de cálculo das tensões.

Para o Caso B, ao comparar o cálculo das tensões utilizando os dois tipos de caminho de integração C1 e C2 na Figura 26, as tensões calculadas para as barras 0 e 1 com os caminhos de integração do tipo C2 apresentam uma intensidade maior do que é observado no outro tipo. Isso se deve ao fato de que os caminhos C2 estão mais expostos à onda eletromagnética gerada pela descarga.

## 4 Conclusões

Neste estudo, foi desenvolvido um modelo 3D inédito para calcular e observar as distribuições de campo eletromagnético e voltagens induzidas por descargas parciais em um hidrogerador. As simulações foram feitas considerando uma pequena seção de 12 graus angulares da máquina por meio de um *software* baseado no método de elementos finitos no domínio da frequência. Foram analisados e comparados os efeitos eletromagnéticos relativos a duas posições de ocorrência de descarga parcial do tipo corona. As simulações realizadas, ainda que limitadas a uma frequência de 40 MHz devido a restrições computacionais, revelaram aspectos cruciais sobre a interação entre as descargas parciais e a estrutura do hidrogerador.

Por meio destas simulações, foi possível observar os efeitos que tanto a posição da falha como o próprio gerador produzem nos resultados, influenciando a distribuição e a intensidade dos campos eletromagnéticos e os valores calculados de voltagem para cada caso. Como foi observado no caso A, a concentração e propagação do campo EM no núcleo magnético observada serviu para guiar o campo gerado para regiões mais afastadas da região de descarga, podendo servir como estudo, no futuro, para a localização de falhas nas barras estatóricas. É importante observar que a propagação da onda no núcleo magnético influencia de forma significativa os resultados obtidos. Em particular, a concentração dos campos no núcleo magnético e o efeito de blindagem causado pelas barras do estator destacam-se como fenômenos críticos. Esses achados oferecem uma base para aprimorar métodos de localização de falhas e desenvolver estratégias de manutenção mais eficazes.

Também foi possível observar, no caso B, que as linhas de integração do campo elétrico, mesmo quando escolhidas próximas entre si para o cálculo das voltagens, podem influenciar consideravelmente os resultados obtidos. Isso é esperado, uma vez que os campos não são conservativos e variam intensamente no espaço. Como se pôde verificar ao comparar as curvas de voltagem dos caminhos de integração vizinhos e paralelos dos tipos C1 e C2, observa-se que a intensidade da voltagem calculada nos caminhos do tipo C2, entre as barras excitadas e suas barras vizinhas, é maior do que aquela obtida para os caminhos do tipo C1.

Para o caminho de integração do tipo C1, nota-se que o campo elétrico produzido pela descarga é fortemente reduzido pelo metal que compõe a barra estatórica na região do caminho de integração. Por outro lado, relativamente aos caminhos do tipo C2, observa-se que há visada direta entre os caminhos de integração associados às barras mais próximas da fonte e a própria fonte. Essas conclusões reforçam o potencial do modelo para simular condições reais e apoiar o

desenvolvimento de tecnologias de monitoramento e mitigação de riscos.

O presente trabalho abre diversas possibilidades para avanços futuros. Um primeiro passo seria a validação dos resultados obtidos por meio do uso de antenas no ambiente físico para captação de medidas experimentais de campo elétrico, o que fortaleceria a confiabilidade das simulações realizadas e permitiria ajustes mais precisos nos modelos desenvolvidos. Estudos subsequentes podem investigar outros tipos de descargas parciais observadas e incorporar modelos químicos e mecânicos, com o objetivo de capturar interações mais complexas no ambiente do hidrogerador. Além disso, a expansão do modelo para incluir seções maiores do estator e simulações de descargas múltiplas permitiria uma análise mais abrangente das condições operacionais típicas. Outra linha de pesquisa promissora seria a aplicação dessas técnicas de simulação numérica na detecção de descargas parciais em outras máquinas elétricas, como geradores síncronos de grande porte utilizados em usinas termoelétricas e eólicas, possibilitando uma avaliação mais ampla da integridade dos sistemas de isolamento. Por fim, a implementação de técnicas de aprendizado de máquina para a análise dos dados simulados poderia automatizar a detecção de padrões associados a diferentes tipos de falhas, contribuindo para sistemas de manutenção preditiva mais eficientes e confiáveis.

## 5 Publicações durante o Mestrado

- N. M. Lopes, G. G. Girotto, V. Dmitriev, R. M. S. de Oliveira, L. D. S. Alcantara, and M. F. Fernandes, "Cálculo de Campos Eletromagnéticos Excitados por Descarga Parcial em Estator de Hidrogerador". In: *20º Simpósio Brasileiro de Micro-ondas e Optoeletrônica (MOMAG 2022)*, 2022, Natal - Brasil.
- N. M. Lopes, G. G. Girotto, V. Dmitriev, R. M. S. de Oliveira, L. D. S. Alcantara, M. F. Fernandes, "Compatibilidade Eletromagnética em Hidrogerador: Cálculo de Campos e de Voltagens Induzidas Oscilando a 60 Hz". In: *20º Simpósio Brasileiro de Micro-ondas e Optoeletrônica (MOMAG 2022)*, 2022, Natal - Brasil.
- R. M. S. de Oliveira, G. G. Girotto, L. D. S. Alcantara, N. M. Lopes, V. Dmitriev, "Ozone transport in 311 MVA hydrogenerator: Computational fluid dynamics modelling of three-dimensional electric machine". *Energies*, v. 16, n. 24, p. 8072, 2023.
- R. M. S. de Oliveira, et al. "Analysis of ozone production reaction rate and partial discharge power in a dielectric-barrier acrylic chamber with 60 Hz high-voltage electrodes: CFD and experimental investigations." *Energies*, v. 16, n. 19, p. 6947, 2023.
- R. M. S. de Oliveira, N. M. Lopes, and J. A. S. do Nascimento. "A 1D-FDM Transmission Line Model for Partial Discharge Current Simulations Validated Against Needle-Plate HVDC Laboratory Experiments: Calculations of Ionized Air Conductivity." *Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications*, v. 24, n. 1, p. e2025287804, 2025.

## Referências

- [1] M. T. Tolmasquim, A. Guerreiro, and R. Gorini, “Matriz energética brasileira: uma perspectiva,” *Novos estudos CEBRAP*, pp. 47–69, 2007.
- [2] D. da Silva Pereira *et al.*, “Diversificação de fontes geradoras da matriz elétrica brasileira: uma revisão sistemática,” *Meio Ambiente (Brasil)*, vol. 3, no. 1, 2021.
- [3] A. Haddad and D. F. Warne, *Advances in high voltage engineering*. IET, 2004, vol. 40.
- [4] W. McDermid, “IEEE guide for the measurement of partial discharges in AC electric machinery,” in *2012 IEEE International Symposium on Electrical Insulation*. IEEE, 2012, pp. 659–660.
- [5] K. Thakor and P. Shah, “Partial Discharge Detection Techniques: A Review,” *Int. Res. J. Eng. Technol*, vol. 7, pp. 885–890, 2020.
- [6] N. Hozumi, T. Okamoto, and T. Imajo, “Discrimination of partial discharge patterns using a neural network,” *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, vol. 27, no. 3, pp. 550–556, 1992.
- [7] T. Hoshino, S. Maruyama, and T. Sakakibara, “Simulation of propagating electromagnetic wave due to partial discharge in GIS using FDTD,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 24, no. 1, pp. 153–159, 2008.
- [8] R. M. d. Oliveira, J. F. Modesto, V. Dmitriev, F. S. Brasil, and P. R. d. Vilhena, “Spectral method for localization of multiple partial discharges in dielectric insulation of hydro-generator coils: Simulation and experimental results,” *Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications*, vol. 15, no. 3, pp. 170–190, 2016.
- [9] H. Ehya and J. Faiz, *Electromagnetic Analysis and Condition Monitoring of Synchronous Generators*. Piscataway, NJ: John Wiley & Sons, 2023.
- [10] C. Hudon, M. Belec, and M. Levesque, “Study of slot partial discharges in air-cooled generators,” *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 15, no. 6, pp. 1675–1690, 2008.

- [11] G. Stone and C. Maughan, "Vibration Sparking and Slot Discharge in Stator Windings," in *Conference Record of the 2008 IEEE International Symposium on Electrical Insulation*, 07 2008, pp. 148–152.
- [12] I. Standard *et al.*, "High-voltage test techniques: partial discharge measurements," *IEC-60270*, pp. 13–31, 2000.
- [13] C. Hudon, M. Belec, and M. Levesque, "Using Ozone Measurements to Diagnose Partial Discharge in Generators," *Renewable Energy World*, vol. 27, pp. 1–7, 2008.
- [14] C. Millet, D. N. Nguyen, L. Lepine, M. Belec, D. Lessard-Deziel, and C. Guddemi, "Case study - high ozone concentration in hydro generators," in *2009 IEEE Electrical Insulation Conference*, 2009, pp. 178–182.
- [15] L. Vouligny, C. Hudon, and D. N. Nguyen, "Design of MIDA, a Web-Based Diagnostic Application for Hydroelectric Generators," in *2009 33rd Annual IEEE International Computer Software and Applications Conference*, vol. 2, 2009, pp. 166–171.
- [16] G. Stone and H. Sedding, "Detection of stator winding stress relief coating deterioration in conventional and inverter fed motors and generators," in *2016 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (CMD)*, 2016, pp. 270–273.
- [17] N. Dehlinger and G. Stone, "Surface partial discharge in hydrogenerator stator windings: Causes, symptoms, and remedies," *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 36, no. 3, pp. 7–18, 2020.
- [18] P. Moore, I. Portugues, and I. Glover, "A nonintrusive partial discharge measurement system based on rf technology," in *2003 IEEE Power Engineering Society General Meeting (IEEE Cat. No. 03CH37491)*, vol. 2. IEEE, 2003, pp. 628–633.
- [19] T. Ozaki, K.-i. Abe, and T. Umemura, "Partial discharge detection using ferrite antenna," in *Conference Record of the 1992 IEEE International Symposium on Electrical Insulation*. IEEE, 1992, pp. 371–374.
- [20] M. Fratila, A. Benabou, A. Tounzi, and M. Dessoude, "Iron Loss Calculation in a Synchronous Generator Using Finite Element Analysis," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 32, no. 2, pp. 640–648, 2017.
- [21] Deaconu, Sorin Ioan, Topor, Marcel, Tutelea, Lucian Nicolae, Nuca, Ilie, and Burduniuc, Marcel, "Wind or Hydro Homo-Heteropolar Synchronous Generators: Equivalent Magnetic

- Circuit and FEM Analysis,” *MATEC Web Conf.*, vol. 210, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1051/matecconf/201821002008>
- [22] H. Syaeful Alam, I. Djunaedi, and D. Soetraprawata, “Thermal Study for Power Upgrading of 400 MW Generator Using Numerical Simulation,” *International Journal of Materials, Mechanics and Manufacturing*, vol. 5, pp. 191–195, 08 2017.
- [23] J. Zhao, Y. Liu, and X. Xu, “Comparisons of Concentrated and Distributed Winding PMSM in MV Power Generation,” in *2018 XIII International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, 2018, pp. 2437–2443.
- [24] C. Carounagarane, T. Chelliah, and D. Khare, “Analysis on Thermal Behavior of Large Hydrogenerators Operating With Continuous Overloads,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, pp. 1–1, 12 2019.
- [25] W. J. K. Raymond, H. A. Illias, H. Mokhlis *et al.*, “Partial discharge classifications: Review of recent progress,” *Measurement*, vol. 68, pp. 164–181, 2015.
- [26] S. Tenbohlen, S. Coenen, M. Djamali, A. Müller, M. H. Samimi, and M. Siegel, “Diagnostic measurements for power transformers,” *Energies*, vol. 9, no. 5, p. 347, 2016.
- [27] M. Yaacob, M. A. Alsaedi, J. Rashed, A. Dakhil, and S. Atyah, “Review on partial discharge detection techniques related to high voltage power equipment using different sensors,” *Photonic sensors*, vol. 4, pp. 325–337, 2014.
- [28] J. Chen and J. H. Davidson, “Ozone Production in the Positive DC Corona Discharge: Model and Comparison to Experiments,” *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, vol. 22, pp. 495–522, 2002.
- [29] C. Hudon and M. Belec, “Partial discharge signal interpretation for generator diagnostics,” *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 12, no. 2, pp. 297–319, 2005.
- [30] G. Stone and R. Wu, “Examples of stator winding insulation deterioration in new generators,” in *2009 IEEE 9th International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials*, 08 2009, pp. 180–185.
- [31] M. Istad, M. Runde, and A. Nysveen, “A review of results from thermal cycling tests of hydrogenerator stator windings,” *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 26, no. 3, pp. 890–903, 2011.

- [32] A. Mukhtaruddin, M. Isa, M. R. Adzman, S. I. S. Hasan, M. N. K. H. Rohani, and C. C. Yii, "Techniques on partial discharge detection and location determination in power transformer," in *2016 3rd International Conference on Electronic Design (ICED)*. IEEE, 2016, pp. 537–542.
- [33] W. Sikorski and W. Ziomek, "Detection, recognition and location of partial discharge sources using acoustic emission method," *Acoustic Emission*, pp. 49–74, 2012.
- [34] A. de Barros, A. Galai, A. Ebrahimi, and B. Schwarz, "Practical Modal Analysis of a Prototyped Hydrogenerator," *Vibration*, vol. 4, no. 4, pp. 853–864, Nov 2021. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.3390/vibration4040048>
- [35] G. H. I. do Brasil S.A, "Usina Elétrica Campos Novos - dimensionamento eletromagnético," *Manual técnico*, 2004.
- [36] P. Breeze, *Power generation technologies*. Newnes, 2019.
- [37] Š. Tkáč, "Hydro power plants, an overview of the current types and technology," *Selected Scientific Papers-Journal of Civil Engineering*, vol. 13, no. s1, pp. 115–126, 2018.
- [38] N. S. Roy, D. Singh, and Raghvendra, "Hydropower plants and their process of electricity production," *Journal of Nuclear Energy Science Power Generation Technology*, vol. 11, no. 6, 2022.
- [39] V. Group, "Voith: Functioning of a hydropower generator (en)," 2019. [Online]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=pa1ryuQV7Mk>
- [40] S. J Chapman, *Electric Machinery Fundamentals*. McGraw-Hill, 2004.
- [41] M. Znidarich, "Hydro generator stator cores part 1-constructional features and core losses," in *2008 Australasian Universities Power Engineering Conference*. IEEE, 2008, pp. 1–8.
- [42] T. Wildi, *Electrical machines, drives, and power systems*. Pearson Educación, 2006.
- [43] G. C. Stone, I. Culbert, E. A. Boulter, and H. Dhirani, *Electrical insulation for rotating machines: design, evaluation, aging, testing, and repair*. John Wiley & Sons, 2014, vol. 83.
- [44] E. Bim, *Máquinas elétricas e acionamento*. Elsevier, 2012, vol. 3.
- [45] R. Sigmond, "The residual streamer channel: Return strokes and secondary streamers," *Journal of applied physics*, vol. 56, no. 5, pp. 1355–1370, 1984.

- [46] E. M. Bazelyan and Y. P. Raizer, *Spark discharge*. Routledge, 2017.
- [47] E. L. DE, S. B. SE, E. G. NL, M. M. AT, E. P. NL, T. S. DE, W. H. DE, J. R. FR, and G. R. IT, “Guide for electrical partial discharge measurements.”
- [48] G. C. Stone, A. Cavallini, G. Behrmann, and C. A. Serafino, *Practical partial discharge measurement on electrical equipment*. John Wiley & Sons, 2023.
- [49] G. Stone and R. Wu, “Examples of stator winding insulation deterioration in new generators,” in *2009 IEEE 9th International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials*. IEEE, 2009, pp. 180–185.
- [50] G. Stone, C. Maughan, D. Nelson, and R. Schultz, “Impact of slot discharges and vibration sparking on stator winding life in large generators,” *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 24, no. 5, pp. 14–21, 2008.
- [51] G. Stone and C. Maughan, “Vibration sparking and slot discharge in stator windings,” in *Conference Record of the 2008 IEEE International Symposium on Electrical Insulation*. IEEE, 2008, pp. 148–152.
- [52] M. Belec, S. Li, D. Nguyen, L. Lepine, C. Guddemi, D. Lessard-Deziel, T. Schwartz, and L. Lamarre, “Investigation and diagnosis of a 184-MVA air-cooled generator heavily affected by slot partial discharge activity,” in *2007 Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing Expo*. IEEE, 2007, pp. 85–90.
- [53] C. Sumeder, “Statistical lifetime of hydro generators and failure analysis,” *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 15, no. 3, pp. 678–685, 2008.
- [54] H. Illias, T. S. Yuan, H. Mokhlis, G. Chen, P. L. Lewin *et al.*, “Partial discharge patterns in high voltage insulation,” in *2012 IEEE international conference on power and energy (PECon)*. IEEE, 2012, pp. 750–755.
- [55] J. Dymond, N. Stranges, K. Younsi, and J. E. Hayward, “Stator winding failures: contamination, surface discharge, tracking,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 38, no. 2, pp. 577–583, 2002.
- [56] M. Sadiku, *Elements of Electromagnetics*. New York: Oxford University Press, 2015.
- [57] R. Courant *et al.*, “Variational methods for the solution of problems of equilibrium and vibrations,” *Lecture notes in pure and applied mathematics*, pp. 1–1, 1994.

- [58] Cardoso, José Roberto, *Electromagnetics through the finite element method: A simplified approach using Maxwell's equations*. CRC Press, 2016.
- [59] A. Reece and T. Preston, *Finite element methods in electrical power engineering*. Oxford University Press, 2000.
- [60] P. P. Silvester and R. L. Ferrari, *Finite elements for electrical engineers*. Cambridge university press, 1996.
- [61] J.-M. Jin, *The finite element method in electromagnetics*. John Wiley & Sons, 2015.
- [62] C. Multiphysics, "Introduction to COMSOL Multiphysics®," *COMSOL Multiphysics, Burlington, MA, accessed Feb*, vol. 9, no. 2018, p. 32, 1998.
- [63] H. D. Young, R. A. Freedman, T. Sandin, and A. L. Ford, *University physics*. Addison-Wesley Reading, MA, 1996, vol. 9.
- [64] J. Davis, Y. Huang, S. Millard, and J. Bungey, "Determination of dielectric properties of insitu concrete at radar frequencies," *Non-Destructive Testing in Civil Engineering*, 2003.
- [65] G. Tsangaris, G. Psarras, and A. Kontopoulos, "Dielectric permittivity and loss of an aluminum-filled epoxy resin," *Journal of non-crystalline solids*, vol. 131, pp. 1164–1168, 1991.
- [66] M. Znidarich, "Hydro generator stator cores part 2-core losses, degradation mechanisms, testing and specification," in *2008 Australasian Universities Power Engineering Conference*. IEEE, 2008, pp. 1–9.
- [67] A. J. C. Sena, R. M. S. de Oliveira, and J. A. S. do Nascimento, "Frequency resolved partial discharges based on spectral pulse counting," *Energies*, vol. 14, no. 21, p. 6864, 2021.
- [68] V. Dmitriev, R. M. S. de Oliveira, F. S. Brasil, P. R. M. Vilhena, J. F. M. Modesto, and R. F. Zampolo, "Analysis and Comparison of Sensors for Measurements of Partial Discharges in Hydrogenerator Stator Windings," *Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications*, vol. 14, no. 2, pp. 197–216, 2015.