



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

DM 30/2025

ALANDER ROCHA RIBEIRO

**DESCARGAS PARCIAIS NO INTERIOR DO SISTEMA DE ISOLAÇÃO DE UMA
BARRA ESTATÓRICA: AVALIAÇÃO DE CRITICIDADE E SIMULAÇÃO
DINÂMICA UTILIZANDO MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS**

BELEM – PA

2025

ALANDER ROCHA RIBEIRO

DM 30/2025

**DESCARGAS PARCIAIS NO INTERIOR DO SISTEMA DE ISOLAÇÃO DE UMA
BARRA ESTATÓRICA: AVALIAÇÃO DE CRITICIDADE E SIMULAÇÃO
DINÂMICA UTILIZANDO MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Instituto de Tecnologia da Universidade Federal do Pará como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica na Área de Sistemas de Energia Elétrica.

Linha de Pesquisa: Alta Tensão

Orientador: Prof. Dr. Marcus Vinnícius Alves Nunes

BELÉM – PA

2025

**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)**

R484d RIBEIRO, ALANDER ROCHA.
DESCARGAS PARCIAIS NO INTERIOR DO SISTEMA DE
ISOLAÇÃO DE UMA BARRA ESTATÓRICA: AVALIAÇÃO
DE CRÍTICIDADE E SIMULAÇÃO DINÂMICA UTILIZANDO
MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS / ALANDER ROCHA
RIBEIRO. — 2025.
111 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. Marcus Vinnicius Alves Nunes
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará,
Instituto de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Elétrica, Belém, 2025.

1. descargas parciais na isolação de uma barra estatórica.
2. modelagem de descargas parciais. 3. método de elementos
finitos. I. Título.

CDD 621.3191



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

**“DESCARGAS PARCIAIS NO INTERIOR DO SISTEMA DE ISOLAÇÃO DE UMA
BARRA ESTATÓRICA: AVALIAÇÃO DE CRITICIDADE E SIMULAÇÃO
DINÂMICA UTILIZANDO MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS”**

AUTOR: ALANDER ROCHA RIBEIRO

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA À BANCA EXAMINADORA APROVADA PELO COLEGIADO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA, SENDO JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA NA ÁREA DE SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA.

APROVADA EM: 02/10/2025

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Marcus Vinnícius Alves Nunes
(Orientador – PPGEE/ITEC/UFPA)

Prof. Dr. Ubiratan Holanda Bezerra
(Avaliador Interno - PPGEE/ITEC/UFPA)

Prof. Dr. Reinaldo Corrêa Leite
(Avaliador Externo ao Programa – FEEB/UFPA)

Dr. André Melo de Moraes
(Avaliador Externo – ELETROBRÁS)

VISTO:

Prof. Dr. Diego Lisboa Cardoso
(Coordenador do PPGEE/ITEC/UFPA)

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de mencionar duas pessoas que, desde o instante em que nasci, não medem esforços para me ver feliz. Um agradecimento especial a minha mãe, Marla, e a minha avó, Rita, que sempre querem meu bem e me apoiam em todos os momentos.

Também agradeço ao meu pai, Alan, que foi um grande influenciador para eu escolher a profissão que escolhi e viverá para sempre nas minhas lembranças.

Aos meus amigos mais próximos que são como irmãos. Vocês sabem quem vocês são.

A todos os meus professores da Universidade Federal do Pará que tiveram uma importância fundamental no meu desenvolvimento pessoal, acadêmico e profissional. Em especial meu orientador, Marcus Vinnícius, que desde a graduação sempre me deu um voto de confiança.

Também gostaria de agradecer ao professor Reinaldo por todo conhecimento compartilhado.

Por fim, deixo um breve agradecimento a todas as pessoas que fazem parte da minha vida e contribuem positivamente.

RESUMO

Descargas parciais no interior de cavidades na isolação de barras estatóricas são as principais causas de falhas em geradores elétricos. Por isso, é de extrema importância que se conheça o processo que rege este fenômeno. Atualmente, modelos computacionais são desenvolvidos com o intuito de se obter um entendimento profundo sobre as descargas parciais, utilizando-se assim de ferramentas digitais como suporte para evitar prejuízos grandiosos. Dessa forma, neste trabalho, um *software* de Método de Elementos Finitos será utilizado para estudar o processo de descargas parciais no interior de uma cavidade presente em uma barra estatórica. Primeiramente, uma das condições para que este fenômeno ocorra é que o campo elétrico no interior da cavidade atinja um valor mínimo conhecido como campo elétrico de ruptura. Este último será utilizado como referência para uma metodologia que será proposta com o objetivo de avaliar o tamanho crítico da cavidade, ou seja, a partir de qual tamanho de cavidade na isolação da barra estatórica torna-se possível a existência de descargas parciais. Esta metodologia consiste em utilizar o campo elétrico de ruptura, juntamente com o campo elétrico calculado numericamente no interior da cavidade e dados experimentais, para refinar os resultados. Após isso, um modelo dinâmico de descargas parciais, que leva em consideração a característica probabilística do fenômeno, e que já é consolidado na literatura, será adaptado com o objetivo de otimização de tempo e implementado em uma barra estatórica. A proposta é avaliar os níveis de magnitude de carga gerados a partir de uma cavidade de tamanho geralmente encontrada em geradores elétricos recém-fabricados.

Palavras-chave: descargas parciais na isolação de uma barra estatórica; modelagem de descargas parciais; método de elementos finitos.

ABSTRACT

Partial discharges inside cavities within the insulation of stator bars are a leading cause of failures in electrical generators. Consequently, it is of great importance to understand the process surrounding this phenomenon. Computational models are currently being developed to gain a deeper understanding of partial discharges and to use this digital tool as support to prevent significant losses. For this reason, in this work, the Finite Element Method software will be used to study the partial discharge process inside a cavity present in a stator bar. First, one of the conditions for this phenomenon to occur is that the electric field inside the cavity reaches a minimum value known as the inception field. This value will be used as a reference for a proposed methodology aimed at evaluating the critical cavity size, that is, the minimum size of a cavity in the stator bar's insulation at which the existence of partial discharges becomes possible. Following this, a dynamic partial discharge model, which is already well-established in literature and considers the probabilistic nature of the phenomenon, will be adapted for time optimization and implemented in a stator bar. The proposal is to evaluate the levels of charge magnitude generated from a cavity size typically found in newly manufactured electrical generators.

Keywords: partial discharges in the insulation of a stator bar; partial discharges modelling; finite element method.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Principais fontes de falhas em hidrogeradores.....	17
Figura 2.1 - Pulso de descarga parcial teórico em cavidades no interior de sólidos dielétricos proposto por Bailey em 1966.....	22
Figura 2.2 - Pulsos de descargas parciais medidos em osciloscópio por Boggs em uma borda afiada (esquerda) e em uma partícula flutuante em SF6 (direita).....	22
Figura 2.3 - Fotografias de canais de condução de descargas parciais em materiais dielétricos distintos. Da esquerda para a direita: no ar, em óleo e em Plástico PMMA.....	23
Figura 2.4 - Diagrama de uma cavidade no interior de um material dielétrico sólido.....	25
Figura 2.5 - Diagrama de uma cavidade após o evento de uma descarga parcial.....	26
Figura 2.6 - Estrutura de um estator que compõe um gerador elétrico.....	33
Figura 2.7 - Desenho esquemático de uma barra estatórica.....	34
Figura 2.8 - Desenho esquemático da seção transversal de uma típica barra estatórica.....	34
Figura 2.9 - Possíveis locais de descargas parciais internas na isolação de uma barra estatórica.....	35
Figura 2.10 - Fotografias microscópicas da seção transversal de uma barra estatórica (a) sem a presença de cavidade e (b) com a presença de uma cavidade no interior da isolação.....	36
Figura 2.11- Exemplos de Gráficos PRPD bidimensionais de descargas parciais no interior do sistema de isolação.....	38
Figura 2.12- Exemplo de gráfico PRPD $\phi-q-n$ de descargas parciais no interior do sistema de isolação.....	38
Figura 2.13- Circuito equivalente com três capacitâncias: (a) modelo completo e (b) modelo simplificado.....	40
Figura 3.1- Geometria 2D com simetria axial do modelo.....	53
Figura 3.2-Linhas de contorno da geometria para um objeto de teste cilíndrico com uma cavidade esférica.....	54
Figura 3.3- Movimentação das cargas na superfície da cavidade quando E_{cav} e E_s possuem sentidos opostos (esquerda) e quando possuem o mesmo sentido (direita).....	59
Figura 3.4-Fluxograma de simulação do modelo de DP.....	65
Figura 3.5-Recorte de uma parte do código original utilizado para a simulação.....	67
Figura 3.6-Recorte de uma parte do código atualizado.....	67
Figura 3.7-Geometria do modelo criada no COMSOL <i>Multiphysics</i> ®.....	69
Figura 3.8 - Malha de Elementos.....	69
Figura 3.9-Distribuição de tensão elétrica na geometria no valor máximo de amplitude.....	70
Figura 3.10-Distribuição de campo elétrico na geometria no valor máximo de amplitude.....	70
Figura 3.11-Distribuição da temperatura na geometria.....	71
Figura 3.12-Comportamento de fE_0 , E_{cav} , E_s e E_{rup} para 10 ciclos de tensão aplicada.....	72
Figura 3.13- Comportamento ampliado de fE_0 , E_{cav} , E_s e E_{rup}	73
Figura 3.14-Comportamento da temperatura para 10 ciclos de tensão aplicada.....	73
Figura 3.15-Comportamento do campo elétrico de ruptura para 10 ciclos de tensão aplicada.....	74
Figura 3.16-Magnitude de carga para 10 ciclos de tensão aplicada.....	74
Figura 3.17-Gráfico PRPD 2D para 10 ciclos de tensão aplicada.....	75
Figura 3.18- Gráfico PRPD $\phi-q-n$ para 10 ciclos de tensão aplicada.....	75

Figura 4.1-Primeira geometria de barra estatórica utilizada.....	77
Figura 4.2-Segunda geometria de barra estatórica utilizada.....	77
Figura 4.3-Posições da cavidade e definição dos parâmetros.....	78
Figura 4.4-Condição de contorno definida para o potencial elétrico.....	79
Figura 4.5-Condição de contorno definida para o aterramento.....	79
Figura 4.6-Malha de elementos criada.....	80
Figura 4.7-Distribuição de campo elétrico na primeira geometria de barra estatórica.....	81
Figura 4.8-Comparação do diâmetro crítico de cavidade na posição 1 devido a mudança na temperatura inicial	83
Figura 4.9- Comparação do diâmetro crítico de cavidade na posição 2 devido a mudança na temperatura inicial	84
Figura 4.10- Comparação do diâmetro crítico de cavidade na posição 3 devido a mudança na temperatura inicial.....	85
Figura 4.11- Comparação do diâmetro crítico de cavidade na posição 4 devido a mudança na temperatura inicial.....	86
Figura 4.12-Geometria montada com dimensão espacial 2D no plano cartesiano.....	88
Figura 4.13-Malha de elementos criada.....	89
Figura 4.14-Distribuição de tensão ao longo da geometria.....	89
Figura 4.15-Distribuição do campo elétrico ao longo da geometria.....	90
Figura 4.16-Distribuição de temperatura ao longo da geometria.....	90
Figura 4.17- Comportamento de $fE0$, $Ecav$, Es e $Erup$ para 10 ciclos de tensão aplicada com dimensão espacial 2D cartesiana.....	91
Figura 4.18-Comportamento ampliado de $fE0$, $Ecav$, Es e $Erup$ com dimensão espacial 2D cartesiana.....	91
Figura 4.19-Comportamento da temperatura para 10 ciclos de tensão aplicada com dimensão espacial 2D cartesiana.....	92
Figura 4.20- Comportamento do campo elétrico de ruptura para 10 ciclos de tensão aplicada com dimensão espacial 2D cartesiana.....	92
Figura 4.21-Magnitude de carga para 10 ciclos de tensão aplicada com dimensão espacial 2D cartesiana.....	92
Figura 4.22-Gráfico PRPD 2D para 10 ciclos de tensão aplicada com dimensão espacial 2D cartesiana.....	93
Figura 4.23-Parâmetros iniciais dos materiais e posição da cavidade para simulação do modelo da segunda geometria de barra estatórica.....	94
Figura 4.24-Malha de elementos criada para simulação do modelo da segunda geometria de barra estatórica.....	94
Figura 4.25-Distribuição de tensão elétrica ao longo da geometria da barra estatórica com cavidade.....	97
Figura 4.26-Distribuição de campo elétrico ao longo da geometria da barra estatórica com cavidade.....	97
Figura 4.27-Distribuição de campo elétrico ao longo da geometria da barra estatórica com ampliação na cavidade.....	98
Figura 4.28- Distribuição de temperatura ao longo da geometria de barra estatórica com cavidade.....	98
Figura 4.29- Comportamento de $fE0$, $Ecav$, Es e $Erup$ para 10 ciclos de tensão aplicada na geometria de barra estatórica.....	99
Figura 4.30- Comportamento ampliado de $fE0$, $Ecav$, Es e $Erup$ na geometria de barra estatórica.....	99
Figura 4.31-Comportamento da temperatura no interior da cavidade na geometria de barra estatórica.....	99
Figura 4.32-Comportamento do campo elétrico de ruptura na geometria de barra estatórica.....	100

Figura 4.33- Magnitude de carga para 10 ciclos de tensão aplicada na geometria de barra estática	100
Figura 4.34- Gráfico PRPD 2D para 10 ciclos de tensão aplicada na geometria de barra estática	100
Figura 4.35- Gráfico PRPD $\phi-q-n$ para 10 ciclos de tensão aplicada na geometria de barra estática.....	101

LISTAS DE QUADROS

Quadro 2.1 - Critérios de classificação de fenômenos físicos provenientes de uma descarga parcial	24
Quadro 2.2- Vantagens e limitações entre modelos de descargas parciais.....	44
Quadro 3.1-Dimensões espaciais disponibilizadas pelo COMSOL <i>Multiphysics</i> ®	48
Quadro 3.2-Propriedades exigidas para um material de acordo com a interface utilizada	50
Quadro 3.3-Condições de contorno definidas na geometria para cada interface física	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1-Definição dos parâmetros iniciais no COMSOL <i>Multiphysics</i> ®	55
Tabela 3.2-Valores dos parâmetros utilizados para implementação	68
Tabela 3.3-Comparação entre os resultados da simulação e os resultados das medições	76
Tabela 4.1-Campo elétrico de ruptura inicial para cavidades de tamanhos diferentes.....	80
Tabela 4.2-Diâmetro crítico para cavidade em diferentes posições com temperatura inicial igual a 20°C	82
Tabela 4.3-Diâmetro crítico para cavidade em diferentes posições com temperatura inicial igual a 100°C	82
Tabela 4.4-Comparação entre os resultados simulados e os resultados das medições.....	93
Tabela 4.5-Parâmetros que tiveram ajustes nos valores para simulação dinâmica de DPs com a segunda geometria de barra estatórica.....	95
Tabela 4.6-Dados de carga para simulação de 10 ciclos de tensão aplicada na geometria de barra estatórica	101

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
DP	Descarga Parcial
EDP	Equação diferencial parcial
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
MATLAB	<i>Matrix Laboratory</i>
MEF	Método de Elementos Finitos
PRPD	<i>Phase-Resolved Partial Discharge</i>
TEAM	Tensões térmica, elétrica, ambientais e mecânicas

LISTA DE SÍMBOLOS

C_{cav}	Calor específico da cavidade
C_{mat}	Calor específico do material dielétrico
d_{cav}	Diâmetro da cavidade
d_{mat}	Diâmetro do material dielétrico cilíndrico
e_{mat}	Espessura do material dielétrico cilíndrico
e_i	Carga elementar
E_0	Campo elétrico aplicado ao sistema de isolamento
E_{cav}	Campo elétrico na cavidade
E_{ext}	Campo elétrico de extinção
E_{rup}	Campo elétrico de ruptura
E_s	Campo elétrico na superfície da cavidade
E_{stivre}	Campo elétrico superficial de cargas livres
E_{spresa}	Campo elétrico superficial de cargas presas
f	Fator de modificação do campo na cavidade
$freq$	Frequência da tensão aplicada
I_{cav}	Corrente elétrica na cavidade
J_{cav}	Densidade de corrente na cavidade
k_{cav}	Condutividade térmica da cavidade

k_{mat}	Condutividade térmica do material dielétrico
N_{es}	Taxa de geração de elétrons por emissão superficial
N_{es0A}	Taxa de geração de elétrons por emissão superficial inicial alta
N_{es0B}	Taxa de geração de elétrons por emissão superficial inicial baixa
N_{et}	Taxa de geração de elétrons total
N_{ev}	Taxa de geração de elétrons por ionização volumétrica
p	Pressão do gás
P	Probabilidade de ocorrência de uma descarga parcial
q_{ap}	Carga aparente
q_{ind}	Carga induzida
q_{real}	Carga real
q_{slivre}	Cargas livres na superfície
Q_{cav}	Densidade de fonte de calor da cavidade
Q_{mat}	Densidade de fonte de calor do material dielétrico
T_{amb}	Temperatura ambiente
T_{cav}	Temperatura na cavidade
T_{mat}	Temperatura do material
U_{amp}	Amplitude da tensão aplicada
U_{rup}	Tensão de ruptura
V_0	Tensão de aplicação ao sistema de isolamento
V_{ef}	Volume efetivo
α	Coefficiente de estresse para a superfície da cavidade
β	Coefficiente térmico para a superfície da cavidade
Δt_0	Passo de tempo da simulação sem DP
Δt_1	Passo de tempo da simulação com DP
ϵ_0	Permissividade no vácuo
ϵ_{rcav}	Permissividade relativa da cavidade
ϵ_{rmat}	Permissividade relativa do material dielétrico
ϵ_{rs}	Permissividade relativa da superfície da cavidade
ρ_{cav}	Densidade da cavidade
ρ_{mat}	Densidade do material dielétrico
σ_{cav}	Condutividade elétrica da cavidade

σ_{cavmax}	Condutividade máxima da cavidade
σ_{mat}	Condutividade elétrica do material dielétrico
σ_s	Condutividade elétrica da superfície
σ_{smax}	Condutividade máxima da superfície
τ_{dec}	Constante de tempo exponencial de decaimento
τ_{est}	Tempo de atraso estatístico
τ_{rs}	Constante de tempo da superfície
ϕ	Função trabalho efetivo

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Contextualização	15
1.2	Justificativa	17
1.3	Objetivos.....	18
1.3.1	Objetivo geral	18
1.3.2	Objetivos específicos.....	19
1.4	Estrutura da dissertação.....	19
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	21
2.1	Introdução às descargas parciais	21
2.2	Comportamento físico de descargas parciais em cavidades esféricas	25
2.2.1	Campo elétrico	25
2.2.2	Campo elétrico de ruptura	26
2.2.3	Geração inicial de elétrons	27
2.2.4	Decaimento de cargas na superfície	29
2.2.5	Tempo de atraso estatístico.....	29
2.2.6	Temperatura e Pressão	30
2.2.7	Campo elétrico de extinção	31
2.2.8	Carga real e aparente	31
2.3	Descargas parciais no interior de barras estatóricas de geradores elétricos	33
2.4	Modelagem de descargas parciais em cavidades no interior do sistema de isolação.....	39
2.4.1	Modelo de três capacitâncias.....	39
2.4.2	Modelo de Pedersen	41
2.4.3	Modelo de Niemeyer	42
2.4.4	Modelo com Método de Elementos Finitos	43
2.4.5	Comparação entre modelos	44
2.5	Considerações finais	45
3	APROFUNDAMENTO NO MODELO DE DESCARGAS PARCIAIS COM MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS.....	47
3.1	Ferramentas utilizadas.....	47
3.1.1	Método de Elementos Finitos.....	47
3.1.2	<i>Software COMSOL Multiphysics®</i>	48

3.1.3	LiveLink™ for MATLAB®	52
3.2	Descrição do modelo para simulação dinâmica.....	52
3.2.1	Introdução.....	52
3.2.2	Definições iniciais	53
3.2.3	Descarga parcial e magnitude de carga	56
3.2.4	Aumento de temperatura	56
3.2.5	Campo elétrico de ruptura e de extinção	57
3.2.6	Decaimento de cargas na superfície da cavidade	58
3.2.7	Geração inicial de elétrons	61
3.2.8	Probabilidade de ocorrência de uma descarga parcial.....	63
3.2.9	Fluxo da simulação no MATLAB®	64
3.3	Implementação do modelo.....	66
3.4	Considerações finais	76
4	MODELAGEM EM UMA BARRA ESTATÓRICA.....	77
4.1	Estudo com a primeira geometria de barra estatórica	78
4.1.1	Metodologia para avaliação de criticidade.....	78
4.1.2	Resultados	81
4.2	Estudo com a segunda geometria de barra estatórica	87
4.2.1	Adaptação e implementação do modelo no plano cartesiano.....	87
4.2.2	Adaptação do modelo dinâmico de DPs na segunda geometria de barra estatórica ..	93
4.2.3	Resultados	96
4.3	Considerações finais	102
5	CONCLUSÃO	103
5.1	Considerações finais	103
5.2	Trabalhos futuros	104
	REFERÊNCIAS.....	105

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

Equipamentos do sistema elétrico que trabalham com média ou alta tensão possuem um sistema de isolamento robusto que tem um papel fundamental no correto funcionamento desses instrumentos. Durante o processo de fabricação e montagem, esse sistema de isolamento pode apresentar pequenos defeitos no seu interior que inicialmente não são identificáveis. Entretanto, a longo prazo, esses defeitos causarão uma degradação nas propriedades da isolamento que levarão a uma falha de isolamento e conseqüentemente a falha do equipamento. Essa degradação em defeitos geralmente é causada por um fenômeno chamado de descargas parciais (DPs). As descargas parciais começam com pequenos efeitos de descargas dentro da isolamento sem que haja um contato elétrico direto dos dois eletrodos, mas podem levar a grandes arcos que contribuem para a degradação da isolamento do equipamento e levam a uma pane geral (Wang; Shi, 2021; Borghei *et al.*, 2021; Illias, 2011).

Em materiais dielétricos sólidos utilizados em sistemas de isolamento de equipamentos, é comum a presença de pequenas cavidades de ar principalmente com formatos esféricos e elípticos em posições completamente imersas no material dielétrico ou mesmo entre o material dielétrico e os eletrodos. A diferença de rigidez dielétrica entre o material dielétrico sólido e o ar faz com que no interior da cavidade forme-se um campo elétrico que atinge valores maiores que o campo elétrico formado no sistema de isolamento. Para que uma descarga parcial (DP) nessa cavidade aconteça, dois critérios precisam ser cumpridos, o campo elétrico no interior da cavidade deve atingir um valor mínimo de ruptura e um elétron livre precisa estar disponível para iniciar a avalanche de elétrons e conseqüentemente gerar a descarga. Este último causa um caráter probabilístico ao fenômeno de descargas parciais (Illias, 2011; Borghei *et al.*, 2021).

Dessa forma, medição e monitoramento de descargas parciais são ferramentas extremamente importantes para avaliar a performance e assegurar a confiança de equipamentos que trabalham em tensões elevadas, visto que os dados retirados dessas medições servem para checar os riscos de falha do equipamento. A falha na isolamento e, conseqüentemente, no funcionamento do equipamento gera altos custos de manutenção ou até mesmo na necessidade de troca do instrumento. Por isso, é importante que testes e medições sejam realizados para identificar a qualidade do sistema de isolamento. Também é extremamente importante entender a

física por trás do fenômeno de descargas parciais, visto que, descargas parciais na isolação de equipamentos são formadas por uma quantidade considerável de fenômenos e efeitos físico-químicos (Haiba *et al.*, 2022; Illias, 2011; Niemeyer, 1995).

A importância de se ter um modelo matemático que exprime de forma aproximada o comportamento de uma descarga parcial se deve ao fato que esses modelos tentam ao máximo mostrar as características dos defeitos causados, os parâmetros da isolação, as condições de ensaio e as medições de descargas parciais propriamente ditas. Dessa forma, a modelagem do processo de descargas parciais é importante para auxiliar no entendimento deste fenômeno e facilitar o processo de avaliação do sistema de isolação (Illias, 2011; Niemeyer, 1995).

Há anos, modelagem de descargas parciais vem sendo abordada e vários resultados já foram obtidos. Alguns modelos propostos já foram largamente utilizados em estudos por pesquisadores. Os principais são: o modelo de três capacitâncias, o modelo de carga induzida proposto em Pedersen *et al.* (1991) e o modelo proposto em Niemeyer (1995), este último leva bastante em consideração o comportamento físico no interior da cavidade antes e depois de uma descarga parcial. Com a evolução da tecnologia, uma nova forma de modelar descargas parciais surgiu. Vários pesquisadores atualmente utilizam *softwares* de computadores para modelar o fenômeno de descargas parciais com Método de Elementos Finitos (MEF) que se mostrou extremamente útil para o estudo de geometrias mais sofisticadas e pela possibilidade de se obter e monitorar resultados dinâmicos de uma forma mais eficaz (Wang; Shi, 2021) (Haiba *et al.*, 2022) (Borghesi *et al.*, 2021).

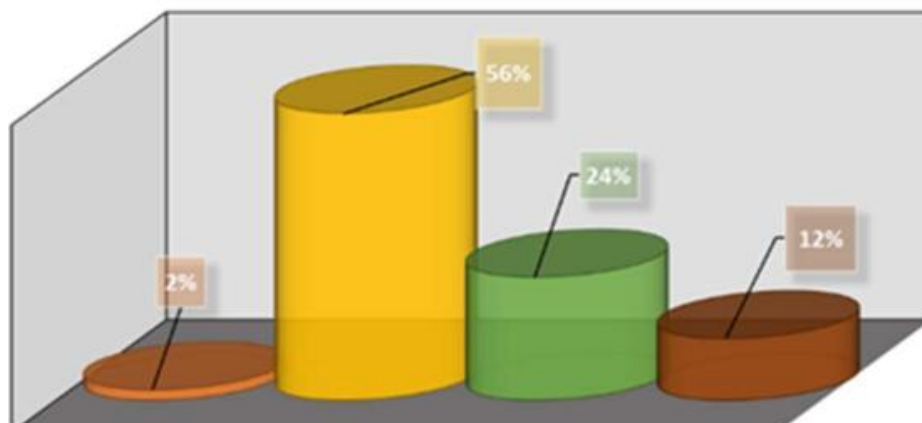
Quando se trata de modelagem de descargas parciais com a utilização de *software* de Método de Elementos Finitos (MEF), um dos primeiros modelos apresentados para simulação dinâmica de descargas parciais encontra-se em Forssen (2008), cuja simulação apresentou resultados consideráveis. A partir deste primeiro trabalho, uma proposta de modelagem dinâmica um pouco mais completa, e ainda bastante referenciada por pesquisadores na atualidade, foi apresentada por Illias (2011). Os dois trabalhos apresentam modelos que utilizam conceitos propostos anteriormente em modelagens teóricas como: emissão inicial de elétrons e decaimento de cargas na superfície. Além disso, também abordam a característica probabilística do fenômeno de descargas parciais, para simular dinamicamente o processo de descarga no interior de uma cavidade esférica presente em sistemas de isolação com dielétricos sólidos, utilizando uma integração entre o *software* de elementos finitos COMSOL *Multiphysics*® e um *script* de MATLAB®.

1.2 Justificativa

Nos últimos anos, a matriz energética mundial vem se modificando, cada vez mais utilizando fontes renováveis e, conseqüentemente, se diversificando. Grande parte das principais formas de geração de energia atualmente utilizam máquinas elétricas como em hidrelétricas, termelétricas, usinas nucleares e usinas eólicas. Isso demonstra a grande importância de geradores elétricos. Como qualquer equipamento de média e alta tensão, geradores elétricos possuem um sistema de isolamento e estão sujeitos a fenômenos de descargas parciais. O estator de geradores elétricos geralmente é a estrutura que mais conduz energia elétrica e sabe-se também que é a parte onde mais defeitos são identificados na maioria dos geradores que, por sua vez, são majoritariamente causados por descargas parciais (Cruz *et al.*, 2022). Outra estatística é exibida na figura 1.1 que mostra as fontes de falhas em hidrogeradores e, pode-se ver que quase 60% das falhas são causadas por danos na isolamento (Khan *et al.*, 2020). Atividades de descargas parciais no interior da isolamento sólida de geradores podem ser toleradas por toda a vida útil do equipamento, dependendo da magnitude das descargas. O tamanho da cavidade detém papel fundamental na intensidade dessas descargas (Turgeon *et al.*, 2011).

Figura 1.1 - Principais fontes de falhas em hidrogeradores

- Danos no rolamento
- Danos na isolamento
- Danos mecânicos
- Danos térmicos



Fonte: Adaptado de Khan *et al.* (2020)

Na última década, diversos trabalhos foram publicados utilizando os modelos propostos em Forssen (2008) e Illias (2011) como referência para realizar diversas análises tais quais: avaliar mudanças físicas do fenômeno de descargas parciais como visto em Wang e Shi (2021),

analisar descargas parciais em outras geometrias como em Haiba *et al.* (2022), avaliar o comportamento das descargas parciais na presença de mais de uma cavidade na isolação, como pode-se ver em Almehdhar e Prochazka (2024), ou até mesmo utilizando o modelo como base para propor uma nova metodologia como visto em Zhang *et al.* (2023) e Borghei *et al.* (2021). Além disso, trabalhos como Afrouzi *et al.* (2022) e Pan *et al.* (2019) exploram diversos métodos de modelagem e evidenciam a importância de modelos utilizando simulação via MEF. Esses são apenas alguns dos trabalhos que mostram que o modelo apresentado em Illias (2011) ainda é bem relevante e amplamente utilizado por pesquisadores para modelagem de descargas parciais.

Entretanto, não é tão comum encontrar na literatura estudos envolvendo descargas parciais em cavidades no interior da isolação de geradores elétricos com Método de Elementos Finitos (MEF). Em Turgeon *et al.* (2011), por exemplo, uma metodologia é proposta para definir o tamanho crítico para qual abaixo deste tamanho de cavidade, descargas parciais não seriam mais possíveis. Todavia, não há uma modelagem com Método de Elementos Finitos. Além disso, uma implementação da simulação dinâmica de descargas parciais em um gerador é feita em Ferreira (2017), porém, a adaptação apresentada não é clara em determinados pontos importantes e apresenta um extenso tempo de simulação.

Dessa forma, considera-se importante e necessário um trabalho de modelagem com Método de Elementos Finitos para estudar descargas parciais no interior de cavidades presentes na isolação de geradores elétricos, mais precisamente no estator, com foco no tamanho crítico da cavidade e simulação dinâmica otimizando o tempo de simulação. Desse modo, surgem os objetivos da presente pesquisa.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo geral

Utilizar o conhecimento de modelagem de descargas parciais com Método de Elementos Finitos para avaliar o tamanho crítico e simular dinamicamente o fenômeno de descargas parciais em uma cavidade presente no interior da isolação sólida de uma barra estatórica.

1.3.2 Objetivos específicos

Utilizar o *software* de Método de Elementos Finitos para definir o tamanho crítico da cavidade, utilizando uma abordagem determinística.

Adaptar a geometria para obtenção de resultados coerentes, com baixo tempo de simulação para o modelo dinâmico.

Simular dinamicamente o modelo de descargas parciais com o Método de Elementos Finitos em uma barra estatórica levando em consideração a característica probabilística do fenômeno.

1.4 Estrutura da dissertação

Capítulo 1: Uma introdução ao trabalho é feita mostrando a contextualização e importância da linha de pesquisa aqui presente. Além disso, a justificativa para a formação dos objetivos do trabalho é exposta para que, logo em seguida, os objetivos da dissertação sejam definidos.

Capítulo 2: Apresenta toda a fundamentação teórica e bibliográfica para o entendimento de descargas parciais em sistemas de isolamento de equipamentos e mais especificamente, em máquinas elétricas. Em seguida, é demonstrado um resumo teórico no que diz respeito a modelagem de descargas parciais, mostrando desde o início de estudos sobre este fenômeno e a evolução até os dias atuais.

Capítulo 3: Uma apresentação do modelo dinâmico de descargas parciais é feita, desde a utilização dos *softwares* COMSOL e MATLAB para modelagem utilizando Método de Elementos Finitos até a implementação do modelo original.

Capítulo 4: São apresentados os estudos e metodologias que serão utilizados para a avaliação de criticidade e para a adaptação do modelo de descargas parciais com o Método de Elementos Finitos utilizando como geometria uma barra estatórica de um gerador elétrico. Além disso, os resultados são avaliados e discutidos.

Capítulo 5: Trata-se das conclusões do trabalho onde serão mostradas as considerações finais. Alguns pontos sobre as limitações do estudo são mencionados e há comentários sobre trabalhos futuros.

Ao final, todas as referências utilizadas para a elaboração do trabalho são expostas.

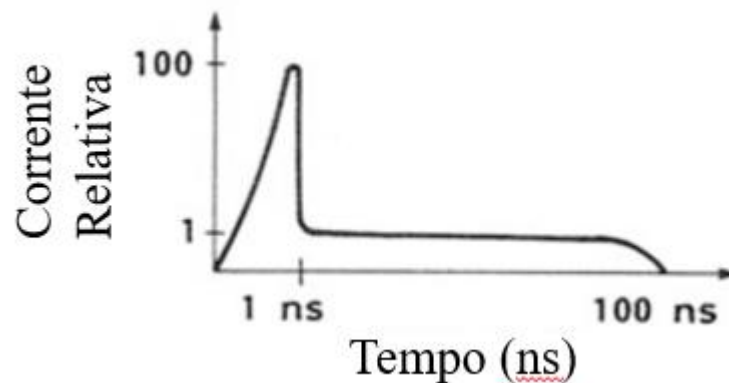
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Introdução às descargas parciais

O fenômeno de descargas parciais (DPs) é reconhecido e estudado em equipamentos de alta tensão desde a década de 1930. Entretanto, um dos livros precursores no que diz respeito ensaios e medição de descargas parciais foi Kreuger (1964), nessa década houve a introdução de materiais isolantes de origem orgânica como resina epóxi e polietileno na fabricação do sistema de isolamento de equipamentos de alta tensão. Tais materiais são bem suscetíveis a descargas parciais, portanto, a detecção, medição e localização de DPs tornou-se mais essencial (Pattanadech *et al.*, 2023).

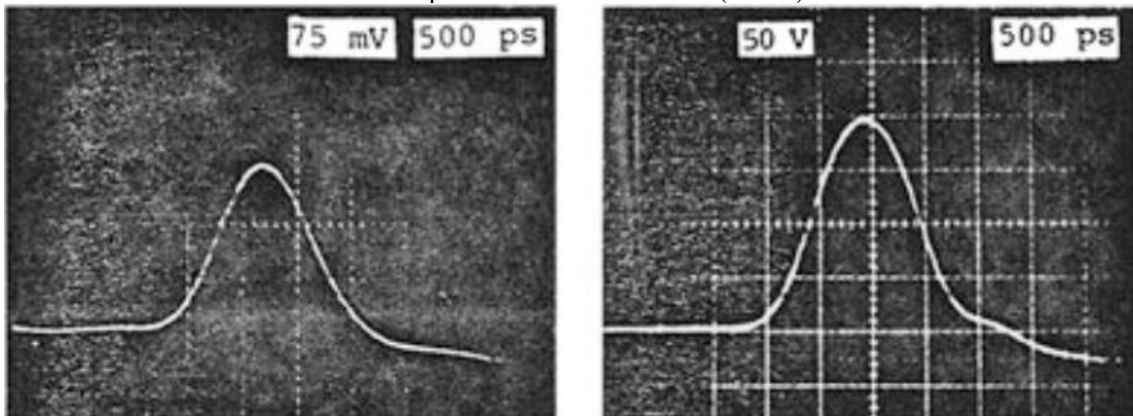
De acordo com a norma ABNT NBR IEC 6070 (2017), descargas parciais são definidas como descargas elétricas localizadas que atravessam apenas parcialmente a isolamento entre condutores e podem ou não ocorrer em localidades adjacentes a um condutor. Geralmente, essas descargas possuem forma de pulsos de tensão ou corrente com duração bem inferiores a 1 μ s e, com intensidades distintas que podem ou não ser detectadas pelas técnicas de medição atualmente utilizadas. Inicialmente, o formato de pulso de DPs foi previsto em teoria em 1966 e publicado em Bailey (1967), como é exibido na figura 2.1. Entretanto, somente na década de 1980, o pulso de descarga parcial foi comprovado experimentalmente com um osciloscópio por Boggs *et al.* (1981), figura 2.2. Sabe-se, porém, que a verdadeira forma de onda de um pulso de DP não pode ser medida pois o processo de medição é realizado nos terminais do equipamento sob teste. Dessa forma, o conteúdo do sinal de pulso é reduzido devido ao caminho que faz da cavidade ao terminal e pela propagação no próprio equipamento de medição (Hauschild; Lemke, 2014).

Figura 2.1 - Pulso de descarga parcial teórico em cavidades no interior de sólidos dielétricos proposto por Bailey em 1966



Fonte: Adaptado de Hauschild e Lemke (2014)

Figura 2.2 - Pulsos de descargas parciais medidos em osciloscópio por Boggs em uma borda afiada (esquerda) e em uma partícula flutuante em SF₆ (direita)



Fonte: Adaptado de Hauschild e Lemke (2014)

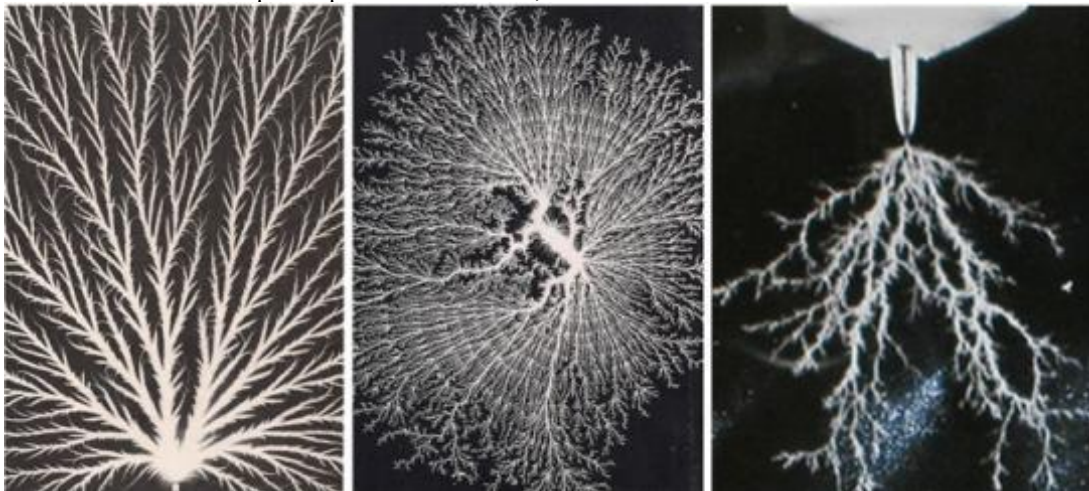
Com o aumento da tensão elétrica para transmissão de energia em longas distâncias no sistema elétrico de potência no último século, o estudo dessas imperfeições em dielétricos aumentou. Sabe-se hoje que descargas parciais são o princípio para qualquer falha total na isolamento de um equipamento. Dessa forma, o estudo do comportamento físico, a detecção e medição dessas descargas parciais tornaram-se algo imprescindível para assegurar o bom funcionamento do sistema elétrico. É fundamental que os equipamentos de média e alta tensão apresentem alta confiabilidade e eficiência e, para tal, os níveis de DPs nos testes de fábrica devem estar abaixo dos limites estabelecidos para cada equipamento (Pattanadech *et al.*, 2023; Hauschild; Lemke, 2014).

De uma forma geral, descargas parciais em sistemas de isolamento estão associadas com a ionização de moléculas de gases e são causadas por imperfeições ou defeitos no material dielétrico como bordas afiadas em contato com o ar ambiente ou até mesmo bolhas de gás em materiais isolantes líquidos ou cavidades preenchidas por gás no interior de materiais isolantes

sólidos. Esses defeitos geralmente se formam no processo de manufatura do sistema de isolamento de um equipamento. A consequência dessa imperfeição é um aumento do campo elétrico nas redondezas, fazendo com que a rigidez dielétrica seja excedida e torne-se possível a existência de uma avalanche de elétrons. O fenômeno de descargas parciais geralmente é acompanhado de emissões de som, luz, calor e reações químicas (Hauschild; Lemke, 2014).

Quando há a presença de uma imperfeição como uma cavidade no interior de um material dielétrico, por exemplo, essa cavidade é preenchida por um gás. Dessa forma, a permissividade relativa do gás sendo menor do que a permissividade relativa do material isolante faz com que o campo elétrico no interior da cavidade torne-se maior que o campo elétrico aplicado ao sistema de isolamento. Quando esse campo elétrico no interior da cavidade atinge um valor maior e rompe a rigidez dielétrica do gás, as descargas parciais passam a ser possíveis. A ocorrência constante de descargas parciais no interior de uma cavidade faz com que o material do sistema de isolamento comece a ser deteriorado por conta de processos químicos envolvendo as descargas e o material. Dessa forma, com o tempo diversos canais de condução começam a aparecer pelo material isolante. Esses canais podem ser extensos o suficiente para gerar um curto-circuito no sistema de isolamento, levando o equipamento a falha total (Illias, 2011). A figura 2.3 mostra fotografias tiradas de canais de condução de descargas parciais em diferentes ambientes.

Figura 2.3 - Fotografias de canais de condução de descargas parciais em materiais dielétricos distintos. Da esquerda para a direita: no ar, em óleo e em Plástico PMMA



Fonte: Adaptado de Hauschild e Lemke (2014)

O evento de uma DP é acompanhado de uma grande variedade de fenômenos físicos e, conseqüentemente, o comportamento de uma descarga em relação ao sistema de isolamento varia de acordo com algumas características que podem depender do material isolante, da

configuração do campo elétrico e do tipo de imperfeição. Dessa forma, o quadro 2.1 exibe um conjunto de possíveis critérios de classificação dos fenômenos físicos que acompanham o processo de DP (Pattanadech *et al.*, 2023). Descargas parciais também podem ser caracterizadas pela sua ordem de magnitude. Algumas possuem uma corrente muito baixa e geralmente não são detectadas por equipamentos com métodos básicos de medição. Mesmo assim, elas podem levar o equipamento a falhas. Entretanto, a descarga do tipo *Streamer*, que apresenta intensidades maiores que 10 pC, representam uma categoria de DPs que possuem maior facilidade para detecção por dispositivos de medição por conta da sua amplitude e são geralmente consideradas como um maior risco ao sistema de isolamento de um equipamento elétrico (Pan *et al.* 2019; Niemeyer, 1995).

Quadro 2.1 - Critérios de classificação de fenômenos físicos provenientes de uma descarga parcial

CRITÉRIOS UTILIZADOS	CLASSIFICAÇÃO
Localização da imperfeição	<ul style="list-style-type: none"> • Externa ao sistema de isolamento • Interna ao sistema de isolamento • Na superfície do sistema de isolamento
Material utilizado no sistema de isolamento	<ul style="list-style-type: none"> • Gasoso • Líquido • Sólido • Híbrido
Característica do campo elétrico	<ul style="list-style-type: none"> • Corrente Alternada • Corrente Direta • Impulso
Fenômeno físico	<ul style="list-style-type: none"> • Elétrico • Óptico • Químico • Mecânico • Acústico
Equipamento Elétrico	<ul style="list-style-type: none"> • Equipamentos de manobra • Transformadores • Máquinas elétricas • Cabos • Isoladores

Fonte: Adaptado de Pattanadech *et al.* (2023)

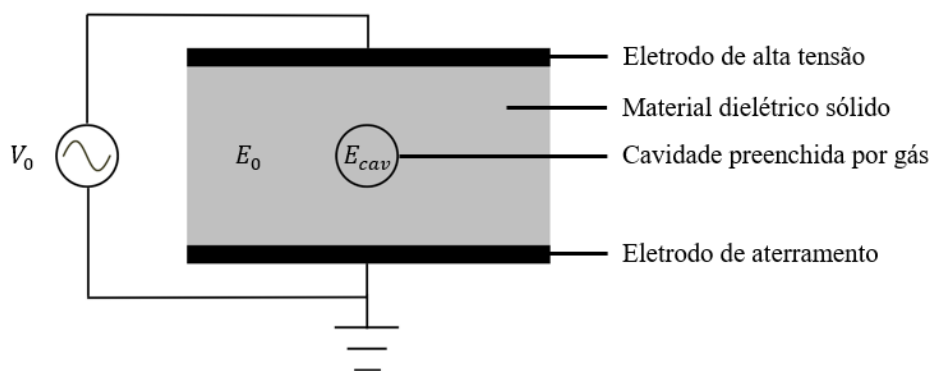
2.2 Comportamento físico de descargas parciais em cavidades esféricas

2.2.1 Campo elétrico

O campo elétrico em uma cavidade geralmente possui dois tipos de contribuições. Uma é a própria tensão de aplicação V_0 no equipamento que gera o campo elétrico no sistema de isolamento, fazendo com que haja um outro maior de mesma polaridade no interior do defeito, muito por conta da diferença de material e pressão. A segunda contribuição está associada a cargas superficiais que se alojam na fronteira da cavidade com o material isolante, após a incidência de uma DP (Niemeyer, 1995; Hauschild; Lemke, 2014)

A figura 2.4 exibe um diagrama básico de uma cavidade no interior de um material dielétrico sem a presença de DPs. Antes de haver qualquer evento de descarga parcial no interior da cavidade, o campo elétrico presente é igual ao aplicado ao sistema, multiplicado por uma constante que seria o fator de modificação f do campo na cavidade, como mostra a equação (2.1). Esse fator é maior que 1, uma vez que o campo na cavidade é maior que o campo aplicado no sistema de isolamento, e depende: da geometria da cavidade, da permissividade do material e do próprio campo elétrico aplicado (Niemeyer, 1995).

Figura 2.4 - Diagrama de uma cavidade no interior de um material dielétrico sólido



Fonte: Adaptado de Illias (2011)

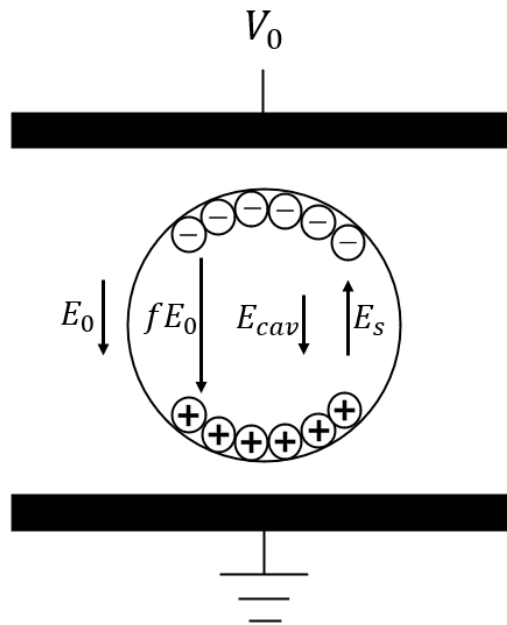
$$E_{cav} = f E_0 \quad (2.1)$$

Onde E_{cav} é o campo elétrico no interior da cavidade, f é o fator de modificação e E_0 é o campo elétrico aplicado ao sistema de isolamento.

Após uma primeira a DP, ocorre uma separação de cargas que se alojam de acordo com suas polaridades, formando uma espécie de dipolo na superfície da cavidade e originando um novo campo elétrico de polaridade oposta a E_{cav} no instante do evento. Há então a formação do campo elétrico superficial E_s (Pattanadech *et al.* 2023). Como ele surge no sentido oposto ao campo aplicado, o valor do campo elétrico na cavidade é imediatamente diminuído após o evento de uma descarga, isso pode ser expresso pela equação (2.2) e um diagrama é mostrado na figura 2.5 (Illias, 2011; Niemeyer, 1995).

$$E_{cav} = fE_0 + E_s \quad (2.2)$$

Figura 2.5 - Diagrama de uma cavidade após o evento de uma descarga parcial



Fonte: Adaptado de Illias (2011)

2.2.2 Campo elétrico de ruptura

Para que haja descargas parciais em uma cavidade esférica preenchida por gás no interior de um material isolante, duas condições iniciais devem ser supridas. Primeiramente, o campo elétrico no interior da cavidade deve superar a rigidez dielétrica do gás presente. Para esse campo elétrico é dado o nome de campo elétrico de ruptura que é definido como o valor mínimo para que uma DP ocorra e pode ser expresso pela equação (2.3) (Pan *et al.*, 2019; Almehdhar; Prochazka, 2024).

$$E_{rup} = \left(\frac{E}{p}\right)_{cr} p \left[1 + \frac{B}{(pd)^n}\right] \quad (2.3)$$

Onde E_{rup} é o campo elétrico de ruptura no interior da cavidade, p é a pressão do gás presente, d é o diâmetro da cavidade. As constantes $\left(\frac{E}{p}\right)_{cr}$, B e n são relacionadas ao processo de ionização do gás.

2.2.3 Geração inicial de elétrons

A segunda condição para a existência de DPs é que haja a presença de um elétron livre para que o processo de avalanche de elétrons se inicie. Esse elétron livre pode ser gerado a partir de duas formas principais: através de ionização do gás presente no interior da cavidade e através de emissões de elétrons das superfícies que compõem as fronteiras com o sistema de isolamento. Esses dois fenômenos são comumente chamados de ionização volumétrica e emissão superficial, respectivamente. Essa condição de elétron livre afetará principalmente o caráter probabilístico que as DPs possuem, exercendo influência no instante de tempo que a descarga vai acontecer, na quantidade de vezes que ocorrerá uma descarga e na defasagem das descargas com a tensão alternada aplicada (Niemeyer, 1995; Illias *et al.*, 2017).

A equação (2.4) expressa a taxa de geração de elétrons por ionização volumétrica em uma cavidade no interior de um material dielétrico sólido. Percebe-se que essa geração é influenciada principalmente pelas características do gás e pelo volume da cavidade. Em cavidades esféricas a proporção entre superfície e volume é pequena fazendo com que haja uma predominância grande de ionização por volume. Para uma cavidade dentro de um isolante, os elétrons livres que compõem a primeira DP majoritariamente são gerados a partir de ionização volumétrica no gás que geralmente é causada por uma ionização radioativa por fótons. Ionização na superfície do material dielétrico é desconsiderada inicialmente pois as chances são muito baixas (Pan *et al.*, 2018; Niemeyer, 1995).

$$N_v = \eta_i p V_{ef} \left(1 - \frac{\eta}{\alpha}\right) \quad (2.4)$$

Na equação (2.4), N_v é a taxa de geração de elétrons por ionização volumétrica, η_i é uma função que descreve o mecanismo de ionização radioativa, p é a pressão do gás, V_{ef} é o volume efetivo do gás exposto a radiação e ao campo elétrico e $\left(1 - \frac{\eta}{\alpha}\right)$ é um termo chamado de função de Legler que indica a probabilidade de um elétron gerar uma avalanche. Na função de Legler quando E_{cav} supera E_{rup} , α tende a ser muito maior que η e, portanto, a função tende ao valor unitário.

Quando a superfície do defeito é composta principalmente por condutores, a emissão superficial terá uma influência maior na primeira descarga parcial. Entretanto, no caso de uma cavidade dentro de um material isolante, a superfície é composta pelo próprio material dielétrico. Dessa forma, a emissão superficial de elétrons é intensificada e torna-se relevante apenas após a primeira descarga parcial. Nesse caso, após a primeira DP, elétrons ficarão presos na superfície da cavidade e podem se desprender posteriormente para gerar descargas parciais futuras. É possível determinar aproximadamente o quantitativo de elétrons que podem se desprender da superfície para influenciar em uma nova descarga parcial. Nota-se que a geração de elétrons por emissão superficial é influenciada principalmente: pelo tipo de material e a área da superfície, pela temperatura e pela intensidade do campo elétrico na superfície (Pan *et al.*, 2018; Niemeyer, 1995). Esta geração de elétrons superficiais pode ser determinada pela equação (2.5)

$$N_s = \frac{A}{e_i} S \left(1 - \frac{\eta}{\alpha}\right) e^{\left(\frac{\phi - \sqrt{\frac{e_i E_s}{4\pi\epsilon_0}}}{k_b T}\right)} \quad (2.5)$$

Onde, A é a área da superfície da cavidade, e_i é a carga elementar, S é uma função que representa a lei de emissão termoeletrica em uma superfície, $\left(1 - \frac{\eta}{\alpha}\right)$ é a função de Legler, ϕ é a função de trabalho efetivo, E_s é o campo elétrico na superfície, ϵ_0 é a permissividade no vácuo, k_b é a constante de Boltzmann e T é a temperatura.

2.2.4 Decaimento de cargas na superfície

O evento da descarga parcial, ao mesmo tempo que aumenta o quantitativo de cargas na superfície também diminui, uma vez que em uma DP, elétrons são desprendidos da superfície durante o fenômeno da emissão. Adicionalmente, esses elétrons disponíveis na superfície também diminuem conforme uma constante de tempo exponencial de decaimento τ_{dec} que expressa a velocidade com que essas cargas se tornam cada vez mais presas em camadas mais fundas da superfície e, conseqüentemente, tornam-se mais difíceis de serem emitidas para uma próxima DP. Mesmo assim, essas cargas presas mais a fundo no material ainda contribuem para o campo elétrico superficial no interior da cavidade (Niemayer, 1995; Illias, 2011).

Além disso, acredita-se que a superfície de uma cavidade onde ocorrem descargas parciais com certa ocorrência sofrem, com o tempo, uma deterioração por conta dos processos físico-químicos provenientes da descarga. Fazendo assim, com que o material na superfície comece a envelhecer e isso acarreta num aumento da condutividade na superfície desta cavidade. Esse aumento na condutividade faz com que cargas de polaridades opostas, que foram distribuídas na superfície após o evento de uma descarga parcial, comecem a se recombinar, também fazendo com que haja uma diminuição de elétrons livres e conseqüentemente, uma diminuição da taxa de geração de elétrons inicial. A partir disso, a constante de tempo da superfície da cavidade τ_{rs} seria a taxa de decaimento das cargas na superfície por recombinação. Quanto maior a condutividade da superfície, mais rápidos essas cargas irão se recombinar e então, menor será o valor da constante de tempo (Niemayer, 1995; Illias, 2011).

2.2.5 Tempo de atraso estatístico

Outro conceito importante no fenômeno de uma DP é o tempo de atraso estatístico τ_{est} , que seria o tempo de espera para que uma descarga aconteça pela primeira vez em uma cavidade após E_{rup} ser excedido. Portanto, para uma cavidade que ainda não sofreu descargas parciais, esse tempo de atraso é altamente influenciado pela geração de elétrons por ionização volumétrica. No geral, descargas parciais em cavidades esféricas no interior de materiais isolantes possuem um tempo de atraso longo para acontecerem pela primeira vez. Entretanto,

após a primeira descarga o tempo de atraso de ruptura diminui consideravelmente já que haverá cargas na superfície da cavidade que se desprenderão mais facilmente para uma nova descarga (Niemayer, 1995; Illias, 2011).

Parâmetros externos como amplitude e frequência da tensão aplicada também influenciam em τ_{est} . Quando a frequência é alta, descargas parciais consecutivas acontecem de forma mais frequente fazendo com que haja mais cargas na superfície e conseqüentemente, mais elétrons livres disponíveis para a próxima descarga. Dessa forma, nessa situação, o tempo de atraso estatístico é menor. Por outro lado, se a frequência da tensão aplicada é baixa, o tempo entre descargas consecutivas aumenta fazendo com que haja um maior decaimento de cargas na superfície e que haja menos elétrons livres para a próxima descarga (Niemayer, 1995; Illias, 2011).

Quando há um aumento da amplitude da tensão aplicada, um maior valor de tensão resulta em um acúmulo maior de cargas na superfície após uma descarga parcial, aumentando a taxa de geração de elétrons e conseqüentemente, diminuindo o tempo de atraso estatístico (Niemayer, 1995; Illias, 2011).

2.2.6 Temperatura e Pressão

Devido ao processo de ionização que acontece dentro da cavidade, há um aumento na temperatura T no interior dela e conseqüentemente, um aumento da pressão p . Como já visto na equação (2.3), o aumento da pressão, por sua vez, resulta em um aumento do campo elétrico de ruptura. Esse calor gerado pelo processo de ionização começa a ser dissipado através do material ao redor da cavidade com o passar do tempo. Há uma constante de tempo de decaimento de temperatura que depende de: tamanho e formato da cavidade, da temperatura inicial do gás no interior da cavidade e das características térmicas do material dielétrico ao redor do gás (Niemayer, 1995; Illias, 2011).

Como dito anteriormente, o aumento da pressão resulta no aumento do campo elétrico de ruptura. Em situações em que a frequência da tensão aplicada é alta, descargas parciais consecutivas são mais frequentes no tempo. O resultado disso é um grande aumento da temperatura, da pressão e, conseqüentemente, do campo elétrico de ruptura fazendo com que, às vezes, ele exceda o valor máximo possível de ser atingido. Quando isso acontece, há uma pausa no processo de descargas parciais no interior da cavidade (Niemayer, 1995; Illias, 2011).

2.2.7 Campo elétrico de extinção

Quando o valor de E_{rup} é atingido e um elétron livre é acelerado pelo campo elétrico, ele se choca com as moléculas do gás presente no interior da cavidade fazendo com que essa molécula seja ionizada, um novo elétron livre surja e o processo se repita até que haja uma grande quantidade de elétrons livres. Esse processo é chamado de avalanche de elétrons (Pattanadech *et al.* 2023; Illias, 2011). Dessa forma, descargas do tipo *Streamer* formam um canal de elétrons dentro da cavidade que se energizam e se movem por influência do campo elétrico. Durante o processo da descarga parcial, a condutividade do canal aumenta. Além disso, a temperatura no interior da cavidade aumenta por conta do processo de ionização e consequentemente, a pressão também se eleva.

O aumento da condutividade do canal da DP no interior da cavidade faz com que haja a presença de uma corrente e que o campo elétrico diminua. Com a diminuição do campo na cavidade, os elétrons perdem energia e, consequentemente, a corrente e condutividade do canal também começam a diminuir. Quando o campo elétrico na cavidade diminui a ponto de atingir um valor específico, conhecido como campo elétrico de extinção E_{ext} , o evento da DP finaliza (Pan *et al.*, 2019; Illias, 2011). Esse campo elétrico de extinção pode ser determinado através de medições em ensaios e apresenta uma forte influência da pressão no gás presente na cavidade, como pode ser visto na equação (2.6).

$$E_{ext} = E_{ext0} \frac{p}{p_0} \quad (2.6)$$

Onde, E_{ext} é o campo elétrico de extinção de uma descarga parcial, E_{ext0} é o campo elétrico de extinção inicial, p é a pressão no gás e p_0 é a pressão inicial no gás.

2.2.8 Carga real e aparente

Como dito anteriormente, uma descarga parcial causa uma diminuição no campo elétrico no interior da cavidade. Isso acontece devido a um colapso do potencial elétrico durante um evento de DP. Essa queda na magnitude da tensão causa uma separação de cargas na

superfície da cavidade esférica formando uma espécie de dipolo elétrico. Dessa forma, os valores dessas cargas podem ser relacionados segundo a equação (2.7) que representa o valor da carga real de uma DP. A intensidade da carga real reflete o dano causado e ajuda a identificar o grau de ameaça e envelhecimento que uma descarga parcial pode causar à isolação de um equipamento (Niemeyer, 1995).

$$q_{real} = \pm g \pi \varepsilon_0 d \Delta U_{DP} \quad (2.7)$$

Onde, q_{real} é o valor da carga física real que se distribui em uma cavidade esférica após uma descarga parcial, ε_0 é a permissividade no vácuo, d é o diâmetro da cavidade esférica e ΔU_{DP} é a variação na amplitude da tensão devido uma descarga parcial.

Além disso, g é um fator de proporcionalidade que depende, dentre outras coisas, do formato da cavidade e da permissividade relativa ε_r do material isolante sólido. No caso de uma cavidade esférica, esse fator pode ser expresso pela equação (2.8).

$$g = \frac{2\varepsilon_r + 1}{4} \quad (2.8)$$

As cargas que se alojam e formam uma polaridade no interior do defeito induzem outras cargas no material condutor do equipamento. Essas cargas induzidas fazem com que sinais das descargas parciais possam ser medidas nos terminais do equipamento sob ensaio. Dessa forma, um dispositivo de medição de descargas parciais é acoplado nos terminais. A medição que o dispositivo realiza é chamada de carga aparente q_{ap} e se tudo estiver correto na medição, o valor da carga aparente é igual ao valor da carga induzida (Niemeyer, 1995). Como a medição da carga real não é possível, é extremamente importante que se entenda a relação entre q_{real} e q_{ap} que, em cavidades esféricas no interior de um material dielétrico sólido, pode ser expressa pela equação (2.9).

$$\frac{q_{ap}}{q_{real}} = \left(\frac{2\varepsilon_r}{2\varepsilon_r + 1} \right) d \Delta \lambda_0 \quad (2.9)$$

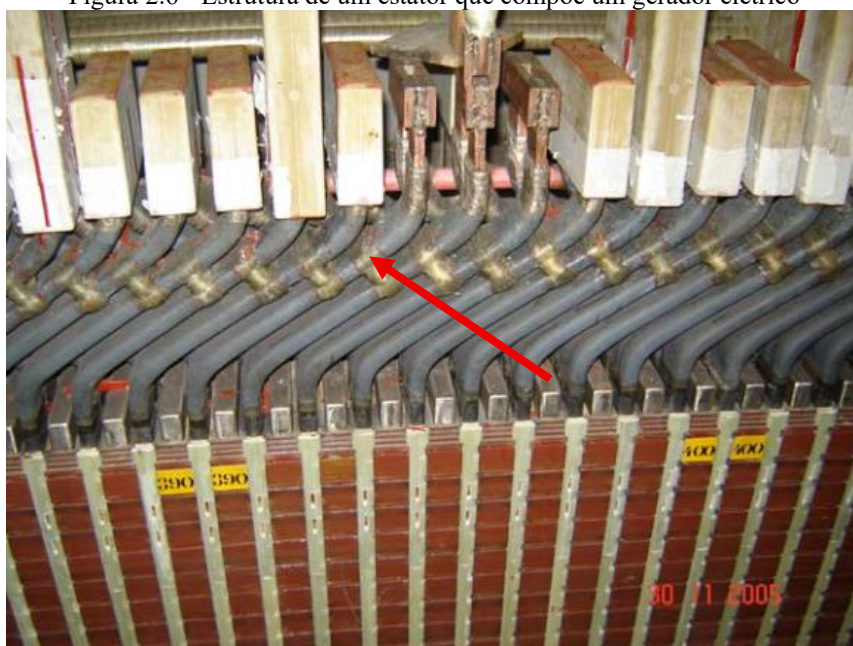
Onde, ε_r é a permissividade relativa do material isolante, d é o diâmetro da cavidade esférica e $\Delta \lambda_0$ é o gradiente da função λ_0 , demonstrada em Pedersen *et al.* (1995), que depende do eletrodo onde a carga aparente é medida e da localização da cavidade em relação ao eletrodo.

2.3 Descargas parciais no interior de barras estatóricas de geradores elétricos

Geradores elétricos utilizados no sistema elétrico de potência estão sob diversos estresses, também conhecidos como estresses TEAM, sigla utilizada para tensões Térmicas, Elétricas, Ambientais e Mecânicas que, com o tempo, causam um desgaste estrutural no equipamento. As duas principais estruturas de um gerador são o rotor e o estator, de tal forma que, o estator se caracteriza como a estrutura que apresenta mais defeitos dos quais, a maioria está associada a degradação do sistema de isolamento (Cruz *et al.*, 2022).

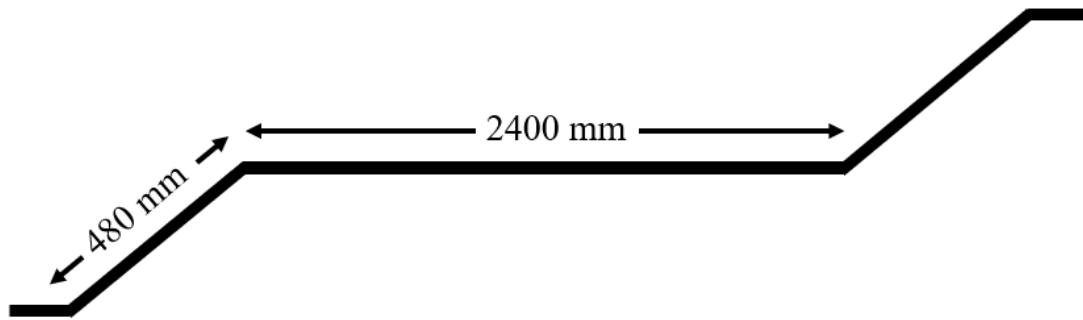
Assim como qualquer outro equipamento de média e alta tensão do sistema elétrico, o bom funcionamento de geradores elétricos está altamente ligado com a condição da isolamento, principalmente dos barramentos do estator. De uma forma geral, o sistema de isolamento em uma barra estatórica possui a função de prevenir curto-circuito, controlar a temperatura do condutor através da dissipação de calor e evitar vibrações no condutor devido a forças eletromagnéticas (Cruz *et al.*, 2022; Sonhaji *et al.*, 2024). Descargas parciais internas lentamente causam uma degradação na isolamento da barra estatórica e podem eventualmente levar o equipamento a falha (Asseri *et al.*, 2022). A figura 2.6 mostra uma fotografia tirada da estrutura de um estator na qual se pode observar as barras estatóricas. Além disso, um desenho esquemático com dimensões típicas de uma barra de um hidrogenador é mostrado na figura 2.7.

Figura 2.6 - Estrutura de um estator que compõe um gerador elétrico



Fonte: (Kawakatsu, 2009)

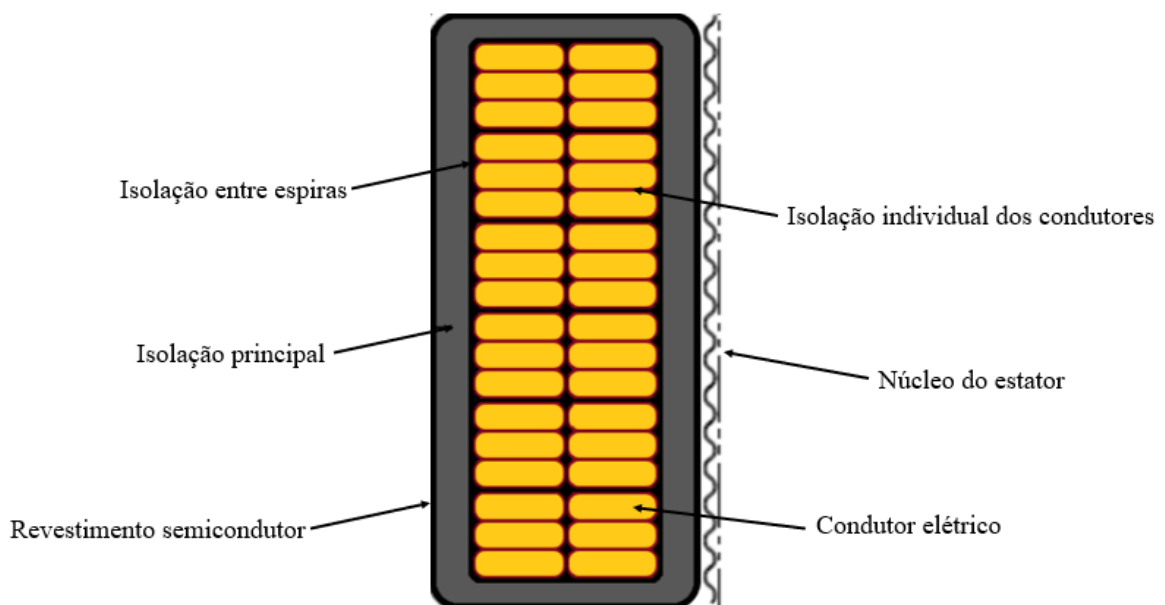
Figura 2.7 - Desenho esquemático de uma barra estatórica



Fonte: Adaptado de Kawakatsu (2009)

Examinando uma barra estatórica, de um gerador de média ou alta tensão, através de um corte na seção transversal, tem-se uma estrutura exemplificada pelo desenho esquemático na figura 2.8. Os condutores presentes na barra são isolados individualmente por uma camada fina de material isolante. Essa isolamento é necessária para diminuir o efeito pelicular nos condutores e reduzir perdas por dissipação de calor. Por outro lado, os condutores são separados em conjuntos de espiras que são divididas por outra isolamento, prevenindo curto-circuito entre espiras. Além disso, envolvendo todo os conjuntos de condutores, há a presença da isolamento principal que separa eletricamente todos os condutores do núcleo do estator. Por fim, sobre a isolamento principal há um revestimento semicondutor responsável por equalizar o potencial elétrico ao longo da barra nas ranhuras do estator (Cruz *et al.*, 2022).

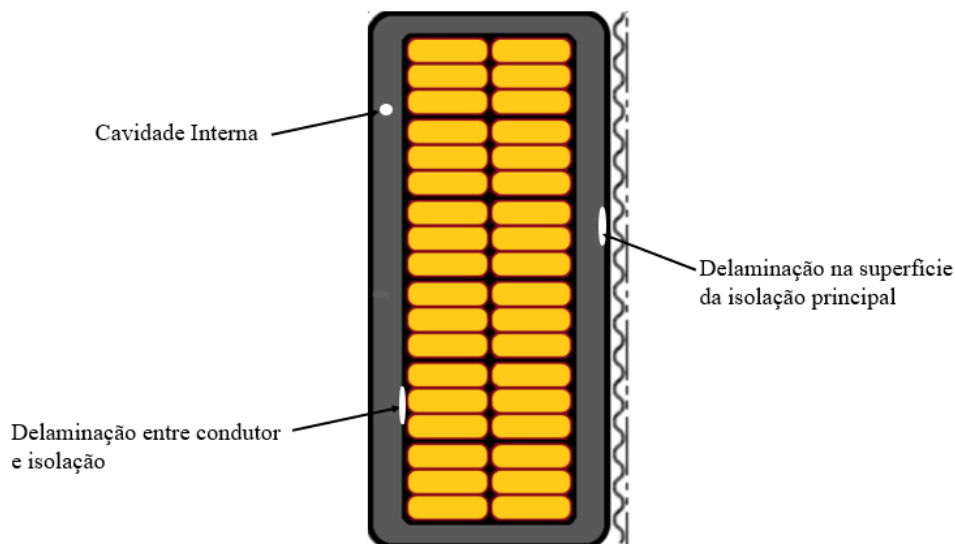
Figura 2.8 - Desenho esquemático da seção transversal de uma típica barra estatórica



Fonte: Adaptado de Cruz *et al.* (2022)

Segundo a norma IEC 60034-27-2 (2012) descargas parciais que ocorrem no interior da isolação de uma barra estatórica podem ter origem a partir de três principais formas: primeiramente através de cavidades internas que podem se formar durante o processo de manufatura do material isolante e geralmente possuem aproximadamente um formato esférico. Além disso, se houver alguma falha no processo de cura do material dielétrico, este pode apresentar delaminação na superfície da isolação principalmente devido às altas tensões mecânicas e térmicas no equipamento durante a operação. Essas delaminações geralmente apresentam formatos elipsoidais (Cruz *et al.*, 2022). Por último, uma delaminação também pode ocorrer entre o condutor e a isolação causada principalmente por estresses térmicos. A figura 2.9 mostra um desenho esquemático com os possíveis locais de ocorrência de descargas parciais internas.

Figura 2.9 - Possíveis locais de descargas parciais internas na isolação de uma barra estatórica

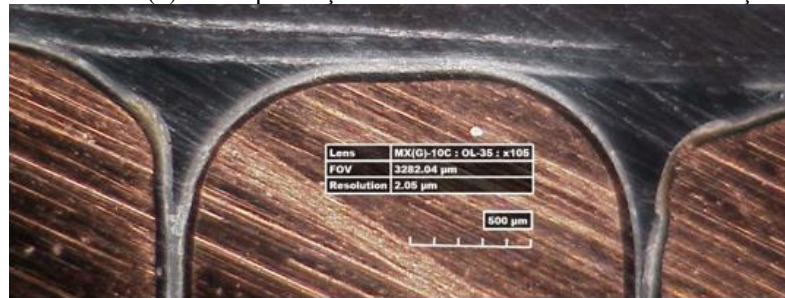


Fonte: Adaptado de Cruz *et al.* (2022)

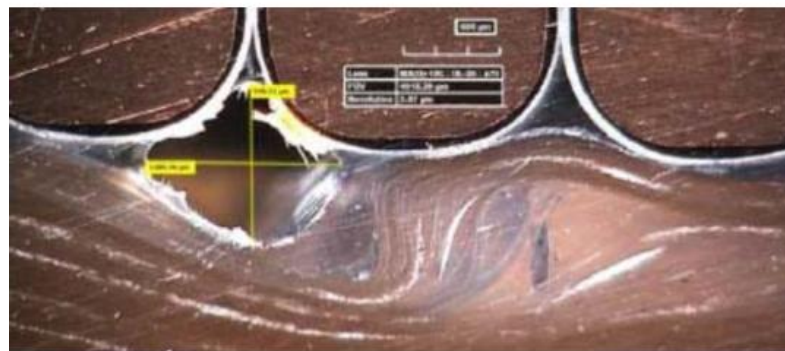
Em Cloutier-Rioux *et al.* (2019), um estudo de localização e análise de cavidades é realizado em uma barra estatórica de um gerador de 13,8 kV (tensão fase-fase) recém-fabricada que possui um sistema de isolação com resina epóxi e mica. A localização das cavidades foi feita através de uma antena eletromagnética e uma serra de precisão foi utilizada para cortar algumas amostras da barra. Essa barra em específico é formada por 64 condutores isolados e em várias amostras retiradas foram encontradas diversas cavidades existentes devido ao próprio processo de fabricação da barra. A figura 2.10 mostra duas fotografias microscópicas retiradas de duas amostras da barra estatórica, a primeira fotografia contém uma amostra que não possuía cavidades internas. Por outro lado, a segunda fotografia é de uma amostra que possuía diversas

cavidades cuja mostrada na figura é a maior entre elas com 0,95 mm de altura e 1,2 mm de largura. Nota-se que a cavidade se aproxima de um formato esférico e, nesse exemplo, está localizada entre dois condutores e a isolamento principal.

Figura 2.10 - Fotografias microscópicas da seção transversal de uma barra estatórica (a) sem a presença de cavidade e (b) com a presença de uma cavidade no interior da isolamento



(a)



(b)

Fonte: Adaptado de Cloutier-Rioux *et al.* (2019)

No que diz respeito a detecção de defeitos da isolação, a medição de descargas parciais é utilizada com mais frequência, uma vez que, descargas parciais são a maior causa de problemas nos barramentos do estator de um gerador (Asseri *et al.*, 2022; Majid *et al.*, 2024). Dessa forma, testes são realizados em qualquer gerador elétrico com o objetivo de se obter informações sobre as condições do seu sistema de isolação elétrico (Cloutier-Rioux *et al.*, 2019). Sensores para detecção e medição de DPs fornecem a localização de falhas no sistema de isolação, noção do processo de degradação da isolação e determinam possíveis intervenções ou tarefas programadas de manutenção necessárias no equipamento (IEC 60034-27-2, 2012).

Como mostrado anteriormente, as propriedades físicas do processo de uma descarga parcial apresentam fenômenos de origem ópticos, químicos, elétricos, acústicos etc. Dessa forma, há uma grande variedade de técnicas que utilizam desses fenômenos para detecção e medição de DPs. Entretanto, técnicas que utilizam medição e análise de sinais elétricos são as mais utilizadas em pesquisas e amplamente exploradas comercialmente, principalmente para descargas parciais internas (Cruz *et al.*, 2022).

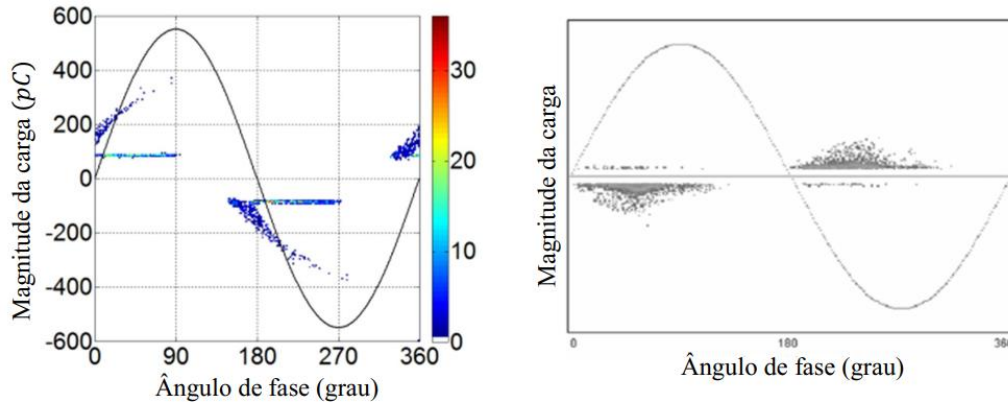
Ensaio de descargas parciais em barramentos estatóricas podem ser divididos em medições *off-line* e *on-line*. Quando um gerador não está em uso no sistema elétrico, ele pode ser energizado por uma fonte separada para que vários testes sejam realizados, inclusive nas barras estatóricas do equipamento, caracterizando o processo de medição *off-line*. Por outro lado, a medição *on-line* se dá quando o gerador elétrico está em operação no sistema elétrico de potência. Nesse caso, a medição é realizada quando a barra estatórica está sob todos os estresses normais de funcionamento (IEC 60034-27-1, 2017).

Os sensores elétricos mais comuns para detecção e medição de descargas parciais são os sensores com acoplamento de capacitores. Nesse caso, capacitores são acoplados em cada fase do gerador e os sinais de pulsos de descargas parciais são direcionados para um analisador (Cruz *et al.*, 2022). Nesse processo, o que se quer é que o sinal seja menos atenuado possível por isso é importantíssima a escolha da largura da banda de frequência de detecção do sensor. É importante mencionar que a distância do local da DP para o sensor também influencia na atenuação do sinal (IEC 60034-27-2, 2012).

Após a medição realizada pelos sensores, os dados colhidos precisam ser analisados e separados em padrões de comportamento para que se tenha uma interpretação das descargas parciais que ocorrem na barra estatórica. O método de análise de descargas parciais *Phase-Resolved Partial Discharge* (PRPD) é muito utilizado para mapear este padrão de comportamento das DPs e, conseqüentemente, identificar os riscos a isolação do gerador (Asseri *et al.*, 2022). Basicamente, o equipamento de medição mede a magnitude da carga aparente, geralmente em pC , de cada descarga assim como o ângulo de fase da tensão aplicada onde cada descarga aconteceu. Há um contador guardando todas essas informações e mapeando todas as descargas em um determinado número de ciclos de tensão. Ao final, todos esses ciclos são expostos em um gráfico de tensão aplicada onde o ângulo de fase varia apenas de 0° a 360° com o intuito de sintetizar a magnitude e a fase das descargas de cada ciclo para apenas um ciclo. Com isso, tem-se um gráfico PRPD bidimensional (2D). Os pontos marcados no gráfico PRPD 2D também podem possuir uma diferença visual em cores que reflete a quantidade de vezes que fenômenos de descargas com mesmas magnitudes e fases específicas aconteceram. Há um gráfico PRPD em três dimensões (3D), também chamado de gráfico $\phi-q-n$, onde no eixo Z a diferença de cores também é representada por uma escala que representa o número de descargas com a magnitude e fase específicas (Illias, 2011; Stone *et al.*, 2022). A figura 2.11 mostra dois exemplos de gráficos PRPD 2D onde se nota que há uma simetria entre os semiciclos de tensão, típico para descargas internas à isolação. Além disso, a figura 2.12 mostra

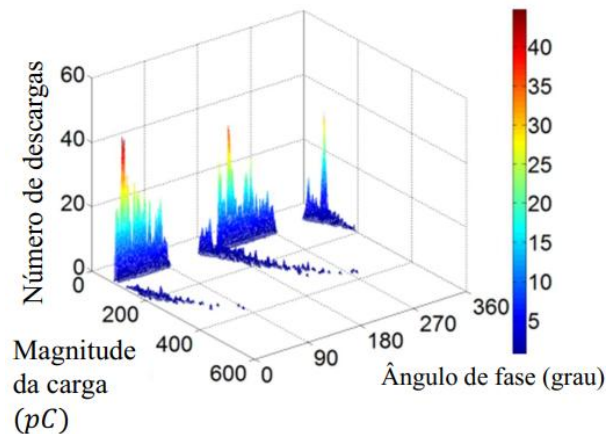
um exemplo de um gráfico PRPD agora em três dimensões, onde é importante mencionar que os valores de magnitude de carga estão exibidos através dos seus valores absolutos.

Figura 2.11- Exemplos de Gráficos PRPD bidimensionais de descargas parciais no interior do sistema de isolamento



Fonte: Adaptado de Illias (2011) e Cruz *et al.* (2022)

Figura 2.12- Exemplo de gráfico PRPD $\phi-q-n$ de descargas parciais no interior do sistema de isolamento



Fonte: Adaptado de Illias (2011)

Atualmente, com a tecnologia impulsionando equipamentos digitais em interface com computadores, a medição e pós-processamento de dados de descargas parciais tornou-se mais acessível e, certamente mais comercial. De tal forma que a interpretação de gráficos PRPD tornou-se mais fácil e em muitos casos, não há a necessidade de pesquisadores de descargas parciais experientes para realizar a análise dos dados (Stone *et al.*, 2022).

2.4 Modelagem de descargas parciais em cavidades no interior do sistema de isolamento

Com o avanço do conhecimento sobre a física das descargas parciais, assim como melhorias no processo de medição e monitoramento, modelos podem ser criados e estudados. Através dos anos, diversos trabalhos foram publicados referentes a modelagem de DPs e muitos resultados estão de acordo quando comparados com dados experimentais. Dessa forma, modelos tornaram-se uma grande fonte de conhecimento sobre o processo de progressão de descargas parciais em um equipamento e auxiliam na prevenção possíveis falhas no sistema de isolamento (Afrouzi *et al.*, 2022).

De uma forma geral, a modelagem e simulação de descargas parciais trazem uma nova perspectiva de estudo do fenômeno, ajudando a entender a influência de certos parâmetros como: localização e tamanho da cavidade, amplitude e frequência da tensão aplicada e, tipo de gás presente no interior da cavidade (Pan *et al.*, 2020). Além disso, também é levado muito em consideração quais os principais materiais que fazem fronteira com o defeito uma vez que eles influenciam na formação da descarga parcial pois ela pode ter uma origem predominantemente causada pelo gás no interior da cavidade ou uma origem predominantemente causada por emissões de elétrons da superfície. No caso de uma cavidade imersa no sistema de isolamento de um equipamento, o material dielétrico exerce grande influência (Niemeyer, 1995).

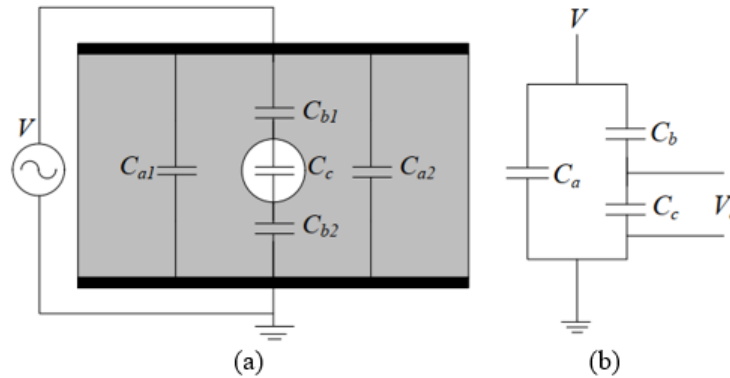
Abaixo será feito um pequeno resumo sobre as principais técnicas para modelagem de descargas parciais para cavidades no interior de um sistema de isolamento sólido.

2.4.1 Modelo de três capacitâncias

Trata-se de um modelo que expressa a cavidade dentro de um material isolante através de um circuito elétrico com 3 capacitâncias como é mostrado na figura 2.13. No modelo completo (a) tem-se um circuito energizado por uma tensão elétrica V com as capacitâncias C_{a1} e C_{a2} , que representam a capacitância do material isolante no qual a cavidade está imersa e seu valor equivalente é representado por C_a no modelo simplificado (b). Por outro lado, C_{b1} e C_{b2} representam a capacitância do material isolante que está em série com a cavidade em (a) cuja

capacitância equivalente é representada por C_b em (b). Além disso, a capacitância C_c representa a cavidade que é atravessada por uma tensão V_c (Afrouzi *et al.*, 2022).

Figura 2.13- Circuito equivalente com três capacitâncias: (a) modelo completo e (b) modelo simplificado



Fonte: Adaptado de Afrouzi *et al.* (2022)

Nesse caso, o fenômeno de uma descarga parcial é representado por um curto-circuito em C_c fazendo com que uma rápida corrente seja conduzida no circuito devido a uma mudança de tensão entre V e C_b . A descarga se inicia quando V_c atinge um determinado valor de ruptura e finaliza quando V_c torna-se menor que um determinado valor de extinção. Antes da ocorrência de uma DP, a tensão V_c é expressa pela equação (2.10).

$$V_c = \frac{C_b}{C_b + C_c} V \quad (2.10)$$

Por outro lado, a carga aparente e carga real podem ser calculadas pelas equações (2.11) e (2.12), respectivamente, onde ΔV representa a variação de tensão na cavidade durante a descarga parcial.

$$q_{ap} = C_b \Delta V \quad (2.11)$$

$$q_{real} = \left(C_c + \frac{C_a C_b}{C_a + C_b} \right) \Delta V \quad (2.12)$$

O circuito com três capacitâncias trata-se de um modelo simples e que cumpre um bom papel para explicar o evento de uma descarga parcial, principalmente academicamente. Entretanto, o modelo possui uma grande limitação ao não considerar as influências que a superfície da cavidade exerce no fenômeno. Portanto, trata-se de um modelo determinístico (Achillides *et al.*, 2008).

2.4.2 Modelo de Pedersen

Esse modelo foi introduzido primeiramente em Pedersen *et al.* (1991) onde o conceito de carga induzida foi proposto. Basicamente, com a descarga parcial, cargas são distribuídas em um formato de dipolo elétrico na superfície da cavidade fazendo com que haja uma carga induzida no eletrodo do sistema energizado (Du *et al.*, 2019). Neste modelo, uma crítica é feita ao modelo de três capacitâncias pois o fenômeno de descargas parciais não pode ser visto como um problema de circuito e sim um problema de campo elétrico e uma cavidade no interior de um dielétrico sólido não pode ser expressa como um capacitor pois ela não possui eletrodos metálicos (Ribeiro *et al.*, 2022). A carga induzida no eletrodo devido a essa distribuição na cavidade pode ser representada pela equação (2.13).

$$q = -\vec{\mu} \cdot \vec{\nabla}\lambda = -\left(\int_S \vec{r}\sigma dS\right) \cdot \vec{\nabla}\lambda \quad (2.13)$$

Onde, q é a magnitude da carga induzida no eletrodo devido a distribuição de cargas na cavidade, $\vec{\mu}$ é o momento dipolar induzido devido às cargas depositadas na superfície da cavidade, \vec{r} é o vetor raio ao longo da superfície S , σ é a densidade de cargas depositadas na superfície da cavidade e λ é uma função escalar que depende da posição dS e é obtida pela equação de Laplace.

No caso de uma cavidade esférica ou elipsoidal, a carga aparente pode ser expressa pela equação (2.14).

$$q = -K\Omega\varepsilon(E_{rup} - E_{ext}) \vec{\nabla}\lambda_0 \quad (2.14)$$

Onde, K é uma constante que depende do tamanho e geometria da cavidade, Ω é o volume da cavidade, ε é a permissividade do material dielétrico, E_{rup} é o campo elétrico de ruptura para uma descarga parcial, E_{ext} é o campo elétrico de extinção para uma descarga parcial e λ_0 é a solução da equação de Laplace no local da cavidade. Nesse caso, para resolver a equação de Laplace, a condição de contorno é $\lambda_0 = 1$ no eletrodo de medição e $\lambda_0 = 0$ no outro eletrodo.

A influência da descarga parcial na carga induzida também pode ser observada através dos parâmetros de tensão elétrica e carga medidos no eletrodo antes e após uma DP. Antes da

descarga parcial a tensão e carga no eletrodo são V e q , respectivamente. Entretanto, após o evento de uma DP, nota-se uma diminuição ΔV na tensão elétrica enquanto a carga sofre um aumento Δq , por influência da capacitância C do sistema de medição. Dessa forma, a carga induzida no eletrodo também pode ser expressa pela equação (2.15).

$$q_{ind} = C\Delta V + \Delta q \quad (2.15)$$

O modelo de Pedersen apresentou muito avanços em pesquisas sobre descargas parciais em cavidades no interior de materiais dielétricos e exemplos de aplicações podem ser encontradas em Leite (2021) e Lemke (2012). Entretanto, ele só pode ser utilizado no caso em que a distribuição do campo elétrico é uniforme pois é assumido que toda a cavidade é afetada pela DP. Em cavidades maiores, onde a distribuição do campo não é uniforme, a distribuição de cargas na superfície da cavidade não pode ser modelada (Afrouzi *et al.*, 2022).

2.4.3 Modelo de Niemeyer

Este modelo foi proposto em Niemeyer (1995) e trata-se de um modelo geral focado em descargas parciais do tipo *Streamer* em gases, que produzem correntes um pouco maiores e mais fáceis de serem detectadas por equipamentos de medição. Além disso, o modelo é fundamental para o estudo atual de modelagem de descargas parciais pois ele introduziu conceitos matemáticos importantes para o fenômeno como geração inicial de elétrons, o processo de formação da descarga e a magnitude da carga real de uma DP (Illias, 2011). Também foram definidos diversos parâmetros importantes que são categorizados de acordo com a influência que recebem da geometria da cavidade, das propriedades dos materiais envolvidos na descarga, como permissividade relativa e pressão do gás no interior da cavidade e, por último, parâmetros que são influenciados pelos materiais que fazem fronteira do defeito que no caso de uma cavidade no interior do sistema de isolamento, seria o próprio material dielétrico (Ribeiro *et al.*, 2022).

Além disso, para a definição dos parâmetros são consideradas as características mais marcantes e desconsideradas pequenos detalhes. Por exemplo, a dimensão da cavidade é sempre tida como muito pequena comparada ao tamanho do sistema de isolamento onde o campo elétrico fonte está sendo aplicado e por isso, nessa modelagem, o campo elétrico ao redor do defeito é

considerado uniforme. Por outro lado, a parametrização torna-se mais complicada para ser calculada quando há uma forte influência de fenômenos químicos e físicos como o processo de emissão de elétrons da superfície. Nesse caso, certos parâmetros geralmente são definidos por testes experimentais (Niemeyer, 1995).

Resumidamente, o modelo apresentou bons resultados para cavidades quando simulado e comparado com dados experimentais. Entretanto, apresenta inconsistências com relação à algumas das equações propostas que apresentam parâmetros que são imensuráveis e ajustados de forma livre para obtenção de bons resultados (Afrouzi *et al.*, 2022).

2.4.4 Modelo com Método de Elementos Finitos

De uma forma geral, na modelagem utilizando MEF, o campo elétrico é calculado numericamente. Dessa forma, torna-se possível uma simulação onde o campo elétrico no interior da cavidade não é uniforme, sofrendo influência do eletrodo e da distribuição de cargas na superfície da cavidade após o evento de uma DP. Além disso, no software de análise com MEF é possível calcular o campo elétrico e a temperatura simultaneamente. Por outro lado, a utilização desse modelo tem um alto custo de tempo para simulação pois as malhas precisam ser bem refinadas para obtenção de melhores resultados (Illias *et al.*, 2017).

Um trabalho inicial utilizando MEF para modelagem de descargas parciais foi apresentado em Forssen e Edin (2005). Nesse modelo, a geometria do sistema de isolamento com a cavidade é criada em um *software* de elementos finitos e uma simulação é rodada dinamicamente em cada passo de tempo alterando alguns parâmetros do sistema utilizando um *script* no MATLAB, através de uma interface entre os dois *softwares*. Para simular o processo de descarga parcial, o modelo altera a condutividade elétrica no interior da cavidade e utiliza elementos finitos para calcular o campo elétrico. Da mesma forma, para calcular a carga medida em um ensaio de medição de descargas parciais, a simulação calcula a integral da corrente no eletrodo de aterramento do sistema na geometria e com isso chega ao valor de carga aparente. Além disso, para simular o processo de condução de cargas na superfície da cavidade após uma descarga parcial, o modelo altera o valor da condutividade da superfície de acordo com o tamanho e geometria da cavidade e conforme as descargas parciais acontecem na simulação (Illias, 2011).

Esse primeiro conceito apresentou bons resultados. Entretanto, em Illias (2011), é apresentado um modelo de análise com MEF um pouco modificado. Nesse novo modelo há uma preocupação maior no parâmetro de taxa de geração de elétrons inicial, que é extremamente importante para o fenômeno, visto que esse parâmetro traz uma característica probabilística para a descarga parcial.

Para esse trabalho, será utilizado como base o modelo de descargas parciais através de MEF introduzido em Illias (2011) e aprimorado em Illias *et al.* (2017), que será detalhado no capítulo 3.

2.4.5 Comparação entre modelos

Baseando-se em diversos trabalhos publicados comparando os modelos mencionados, nota-se que o modelo que utiliza análise através de elementos finitos é o mais completo pela facilidade em se obter valores de campo elétrico, carga real e carga aparente em uma geometria com a presença de uma cavidade com descargas parciais. Entretanto, devido ao grau de complexidade do modelo, muitos parâmetros precisam ser definidos. O quadro 2.2 apresenta uma comparação entre os modelos citados, destacando suas vantagens e limitações.

Quadro 2.2- Vantagens e limitações entre modelos de descargas parciais

MODELOS DE DESCARGAS PARCIAIS	VANTAGENS	LIMITAÇÕES
Modelo de Três Capacitâncias	<ul style="list-style-type: none"> • É um modelo simples e claro • Fácil de implementar em equipamentos elétricos • Pode ser utilizado para simular várias DPs 	<ul style="list-style-type: none"> • Utilizado apenas quando a superfície da cavidade é considerada equipotencial • Não considera a distribuição de cargas na superfície após uma DP
Modelo de Pedersen	<ul style="list-style-type: none"> • Introduziu o conceito de carga induzida associada ao evento de descarga parcial em uma cavidade. • Tratou a descarga parcial como um problema de campo elétrico 	<ul style="list-style-type: none"> • Somente pode ser utilizado quando a distribuição de campo elétrico na cavidade é uniforme • Não considera a distribuição de cargas na superfície após uma DP

Modelo de Niemeyer	<ul style="list-style-type: none"> • Apresentou fundamentação matemática importante para qualquer modelo atual • Considerou a geração inicial de elétrons e propôs equações para emissão superficial e ionização volumétrica 	<ul style="list-style-type: none"> • Possui algumas suposições não justificadas que se baseiam muito em mudanças de acordo com dados experimentais • Assume que alguns parâmetros importantes são constantes como a condutividade da superfície da cavidade
Modelo com MEF	<ul style="list-style-type: none"> • Aumentou o conhecimento sobre o comportamento do campo elétrico antes de uma DP • Apresenta resultados precisos de carga aparente através da integração no tempo da corrente • Apresenta uma boa aproximação de uma geometria em três dimensões • Proporciona uma grande variedade de possíveis estudos através da vasta definição de domínios e condição de contorno. 	<ul style="list-style-type: none"> • Necessita de uma grande quantidade de parâmetros e informações • Necessita de um poder de processamento maior devido e apresenta um alto custo de tempo para simulação

Fonte: Adaptado de Afouzi *et al.* (2022)

2.5 Considerações finais

Este capítulo teve como objetivo a fundamentação teórica de todos os principais pontos que serão abordados nessa dissertação. Primeiramente, foi introduzido o conceito de descargas parciais, onde comentou-se quais as origens desse defeito e quais problemas podem causar em equipamentos elétricos. Além disso, o comportamento físico de descargas parciais em cavidades esféricas foi descrito de uma forma um pouco mais detalhada pois é de total importância para o objetivo deste trabalho. Para isso, conceitos importantes como: campo

elétrico de ruptura, geração inicial de elétrons, decaimento de cargas na superfície, campo elétrico de extinção e cargas real e aparente foram definidos.

Também foi foco deste capítulo, o processo de descargas parciais especificamente em barras estáticas de geradores elétricos. De forma resumida, foram apresentadas as principais fontes de descargas parciais nestes equipamentos, e as principais formas de medição e análise de dados. Por último, também foi feito um resumo dos principais modelos de descargas parciais existentes na literatura, assim como uma comparação entre eles. O modelo utilizando Método de Elementos Finitos foi introduzido, entretanto, será detalhado no próximo capítulo.

3 APROFUNDAMENTO NO MODELO DE DESCARGAS PARCIAIS COM MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

3.1 Ferramentas utilizadas

3.1.1 Método de Elementos Finitos

Leis da física geralmente são matematicamente expressas através de Equações Diferenciais Parciais (EDPs), principalmente quando envolvem geometrias complexas. Essas EDPs, por sua vez, não são resolvidas analiticamente através de modelos numéricos simples. Dessa forma, o Método de Elementos Finitos (MEF) serve para discretizar EDPs em várias equações algébricas mais simples onde o resultado será uma aproximação da solução real. O MEF foi utilizado pela primeira vez em 1956 e até hoje é considerado um dos melhores e mais importantes métodos principalmente para solucionar diversos problemas de engenharia. Basicamente, a ideia é solucionar um problema complicado substituindo por um mais simples (Erhunmwun; Ikponmwosa, 2017).

Na realidade, essa discretização é feita através da divisão da geometria do problema em pequenos elementos triangulares que resultam em uma construção de malha de elementos. Cada elemento preserva as características do domínio específico a qual ele pertence dentro da geometria. Dessa forma, a malha geralmente apresenta diferenças em relação ao tamanho dos elementos onde um melhor refinamento é necessário em: locais onde se esperam valores mais críticos, pontos onde há uma maior variação de valores, locais onde a geometria é mais complexa e, locais onde as condições de contorno são aplicadas (Erhunmwun; Ikponmwosa, 2017).

A utilização do MEF é dividida em uma série de procedimentos necessários para a resolução de um problema, enumerados abaixo.

1. Definir a Equação Diferencial Parcial que governa o comportamento físico e estabelecer as condições de fronteira.
2. O domínio do problema é subdividido em vários pequenos elementos. A escolha da quantidade de elementos é muito importante para a solução do problema de tal forma

que, a discretização em mais elementos resulta em elementos menores e melhora o resultado do método aplicado em uma EDP.

3. Após a divisão dos elementos, a equação algébrica que será resolvida para cada elemento é definida. A natureza da equação é a mesma para todos os elementos e apresentará mudanças apenas com relação ao tamanho e propriedades deles.
4. As equações algébricas para cada elemento são colocadas juntas em um sistema dar a solução para todo o domínio da geometria.
5. Algumas dessas equações são definidas para elementos que fazem parte de condições de contorno do problema e possuem valores já conhecidos. Dessa forma, o próximo passo é definir todos esses pontos fazendo que o sistema de equações globais diminua.
6. Finalmente o sistema global de equações pode ser solucionado para diferentes pontos do domínio de acordo com cada elemento.
7. Os resultados aproximados são apresentados em tabelas ou gráficos.

3.1.2 *Software COMSOL Multiphysics®*

Neste trabalho, o Método de Elementos Finitos será utilizado através do *software* COMSOL *Multiphysics®* para resolver problemas físicos envolvendo eletricidade e transferência de calor. De uma forma geral, o *software* apresenta um ambiente completo de modelagem e simulação onde é possível: a criação da geometria e definição de suas propriedades, ajuste de todas as condições de contorno, criação da malha de elementos e, resolução do problema. Também é possível resolver mais de um problema físico simultaneamente através da função *Multiphysics*.

A maioria dos problemas físicos no mundo real são tridimensionais. Entretanto, em algumas situações é possível utilizar outras dimensões espaciais para encontrar resultados equivalentes. Dessa forma, o COMSOL *Multiphysics®* possibilita a escolha das seguintes dimensões espaciais para criação da geometria expostas no quadro 3.1

Quadro 3.1-Dimensões espaciais disponibilizadas pelo COMSOL *Multiphysics®*

DIMENSÃO ESPACIAL	CARATERÍSTICAS
Modelos 1D em coordenadas cartesianas	<ul style="list-style-type: none"> • A visão da geometria é de uma única linha reta que representa a única variação espacial

	<ul style="list-style-type: none"> • É assumido que as outras dimensões não apresentam variações
Modelos 1D em coordenadas cilíndricas com simetria axial	<ul style="list-style-type: none"> • A visão é de uma única linha reta na direção radial de uma geometria com simetria axial • É assumido que as outras dimensões não apresentam variações
Modelos 2D em coordenadas cartesianas	<ul style="list-style-type: none"> • A visão é de um corte na seção transversal de uma geometria em 3D, representada no plano x-y • É assumido que não há variação ao longo do eixo z • A geometria ao longo do eixo z pode ser interpretada como tendo uma unidade comprimento • As condições de contorno são definidas em linhas • A espessura da geometria pode ser adicionada através de um valor de profundidade dando uma característica 3D ao modelo
Modelos 2D em coordenadas cilíndricas com simetria axial	<ul style="list-style-type: none"> • Utilizada quando uma geometria em 3D pode ser construída através da revolução no seu próprio eixo
Modelos 3D	<ul style="list-style-type: none"> • Utilizada para criar geometrias completas em três dimensões • Apresenta uma resolução muito mais complexa

Fonte: Adaptado de COMSOL *Multiphysics® Reference Manual*

Para a escolha da física utilizada na simulação, o COMSOL *Multiphysics®* apresenta diversos grupos que envolvem estudos com: eletricidade e magnetismo, transferência de calor, acústica, mecânica, entre outros. No que diz respeito a estudos de eletricidade e magnetismo há o grupo *AC/DC* que, por sua vez, apresenta duas interfaces que serão utilizadas neste presente trabalho.

A primeira interface é a *Electrostatics* utilizada para solucionar problemas envolvendo mais especificamente distribuição de potencial elétrico, campo elétrico e densidade de fluxo elétrico em um meio dielétrico sem a presença de cargas livres. Nesse caso, a Lei de Gauss para campo elétrico é utilizada para se chegar na equação (3.1), que é solucionada utilizando o potencial elétrico como uma variável dependente. Nesta equação, ϵ é a permissividade elétrica do material dielétrico e V é o potencial elétrico (Afrouzi *et al.*, 2022).

$$-\nabla \cdot (\epsilon \nabla V) = 0 \quad (3.1)$$

A segunda interface importante pertencente ao grupo *AC/DC* é a *Electric Currents*. Essa interface é mais utilizada para solucionar problemas envolvendo distribuição de potencial elétrico, campo elétrico e corrente elétrica em meios condutores, de tal forma que a equação (3.2), proveniente da Lei de Ohm para conservação de corrente, é resolvida com o potencial elétrico como uma variável dependente (Illias *et al.*, 2017).

$$-\nabla \cdot (\sigma \nabla V) - \nabla \cdot \frac{\partial}{\partial t} (\varepsilon \nabla V) = 0 \quad (3.2)$$

Onde, σ é a condutividade elétrica do meio condutor, V é o potencial elétrico e ε é a permissividade elétrica.

Além disso, o COMSOL *Multiphysics*® também disponibiliza o grupo *Heat Transfer* que possui a interface *Heat Transfer in Solids* utilizada para solucionar problemas envolvendo variação de temperatura e pressão por transferência de calor devido condução, convecção e radiação. A EDP solucionada é a equação (3.3), proveniente da Lei de Fourier (Illias, 2011).

$$\rho C \left(\frac{\partial T}{\partial t} \right) - \nabla \cdot (k \nabla T) = Q \quad (3.3)$$

Onde, ρ é a densidade do material, C é o calor específico T é a temperatura, k é a condutividade térmica do material e Q é a densidade de fonte de calor.

Quando uma geometria é criada no COMSOL *Multiphysics*® ela apresentará um domínio global, que por sua vez pode ou não conter diversos outros subdomínios de acordo com a complexidade da geometria. Dessa forma, é possível definir os materiais e suas propriedades para cada subdomínio, sendo que as propriedades do material exigidas dependem da interface de estudo e estão diretamente ligadas às equações que serão solucionadas. O quadro 3.2 expõe as propriedades do material de acordo com a interface física escolhida no COMSOL *Multiphysics*®.

Quadro 3.2-Propriedades exigidas para um material de acordo com a interface utilizada

INTERFACE	PROPRIEDADES EXIGIDAS	UNIDADE
<i>Electrostatics</i>	Permissividade relativa (ε_r)	Adimensional
<i>Electric Currents</i>	Condutividade elétrica (σ)	S/m
	Permissividade relativa (ε_r)	Adimensional
<i>Heat Transfer in Solids</i>	Condutividade térmica (k)	W/(m.K)

	Densidade do material (ρ)	Kg/m ³
	Calor específico (C)	J/(kg.K)

Fonte: Adaptado de COMSOL Multiphysics Reference Manual

Além disso, o *software* também permite a criação de condições de contorno na geometria, elas também podem variar de acordo com a interface utilizada como potencial elétrico, aterramento e isolamento elétrica para interfaces envolvendo eletricidade, além de quantidade de calor e temperatura para interfaces que solucionam problemas de transferência de calor.

Outra característica importante para análise utilizando MEF é a criação das malhas de elementos. No COMSOL *Multiphysics*®, os elementos podem ser definidos igualmente por todo o domínio global definindo apenas o grau de refinamento sendo que quanto mais refinada for a malha, haverá mais elementos de tamanhos menores. Também é possível customizar a criação da malha de acordo com as características da geometria, especificando o tamanho e localização dos elementos levando em consideração pontos e valores críticos que serão estudados. É importante lembrar que quanto maior a quantidade de elementos presente no domínio global, maior será o processamento computacional necessário e, portanto, maior será o tempo de simulação.

O último ponto importante para a simulação no *software* de Método de Elementos Finitos é a definição do tipo de estudo que se deseja realizar. Basicamente, seria a forma com que cada equação será solucionada e avaliada. Quando se quer fazer uma análise em regime permanente, onde não há variação no tempo, utiliza-se o estudo *Stationary*. Por outro lado, quando se deseja solucionar problemas que possuem variáveis dependente do tempo, utiliza-se o estudo *Time Dependent*. Outro exemplo seria o estudo *Frequency Domain*, onde o que interessa para o estudo é a variação de acordo com a frequência. O COMSOL *Multiphysics*® disponibiliza diversos outros estudos e formas de solucionar um problema de acordo com a necessidade do usuário.

Após a realização do estudo, é disponibilizada uma grande variedade de formas de visualização envolvendo a geometria além de análises envolvendo desde a exposição de tabelas com valores até plotagem de gráficos.

3.1.3 LiveLink™ for MATLAB®

O *software* utilizado neste trabalho para análise utilizando Método de Elementos Finitos, COMSOL *Multiphysics*®, também apresenta a ferramenta *LiveLink™ for MATLAB®* que conecta e estende o ambiente de modelagem através de uma interface com o *software* MATLAB® e suas funções por *script*. Essa ferramenta de integração permite ao usuário as seguintes funcionalidades:

- O *LiveLink™ for MATLAB®* apresenta uma interface de programação do COMSOL *Multiphysics*® onde todas as funções disponibilizadas no *software* de MEF podem ser acessadas por comandos adicionados ao ambiente de programação do MATLAB®.
- É possível utilizar as diversas funções de comando do MATLAB® para criar rotinas que influenciarão nas definições do modelo criado no COMSOL *Multiphysics*®.
- As funções do MATLAB® também podem ser utilizadas para analisar resultados de simulações fornecidas pelo COMSOL *Multiphysics*® de tal forma que esses resultados podem ser acessados facilmente através da interface de programação.
- Com as funcionalidades do MATLAB® também é possível criar diversas interfaces de usuários possibilitando que outras pessoas tenham acesso ao modelo criado exibindo apenas algumas informações e configurações escolhidas.
- O *LiveLink™ for MATLAB®* também possibilita a criação de um servidor onde qualquer usuário que tiver acesso a este servidor também terá acesso a modelos e interfaces presentes.

3.2 Descrição do modelo para simulação dinâmica

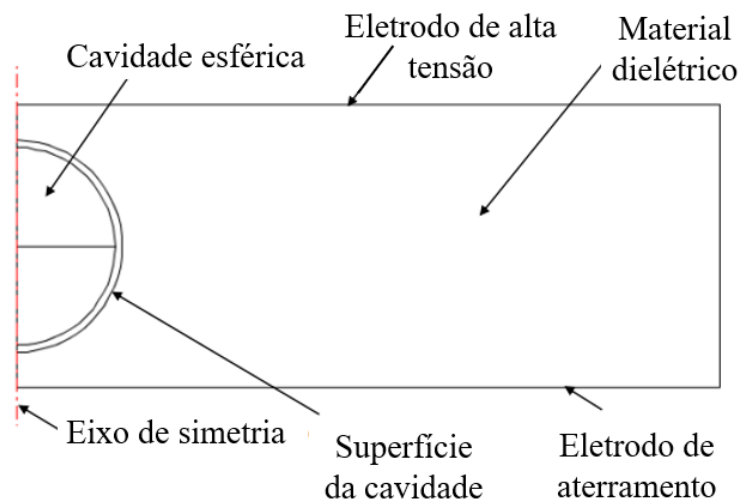
3.2.1 Introdução

O modelo introduzido em Illias (2011) e, também apresentado em Illias *et al.* (2017) que será utilizado como referência nesse trabalho apresenta uma geometria com dimensão espacial 2D com simetria axial que foi escolhida para diminuir a quantidade de elementos de

malha utilizados e conseqüentemente, diminuir o tempo de simulação. As características da geometria foram definidas para simular um objeto de teste cilíndrico feito com resina epóxi com uma cavidade esférica no interior. Algumas amostras com cavidades de tamanhos diferentes foram manufaturadas e testadas e a validação do modelo é feita através da comparação entre os resultados de testes experimentais e a simulação computacional.

Pela figura 3.1, que apresenta a geometria utilizada, destaca-se a criação de três subdomínios: a cavidade esférica, o material dielétrico e a superfície da cavidade. Dessa forma, a ferramenta *LiveLink™ for MATLAB®* é utilizada para executar uma simulação dinâmica onde as interfaces físicas *Electric Currents* e *Heat Transfer in Solids* do COMSOL *Multiphysics®* são utilizadas simultaneamente através da função *Multiphysics* para resolver as equações de potencial elétrico e temperatura em um instante de tempo e depois, esse instante de tempo é incrementado para que os parâmetros sejam calculados novamente. O *script* no MATLAB® também permite simular a característica probabilística para o acontecimento ou não de uma DP.

Figura 3.1- Geometria 2D com simetria axial do modelo



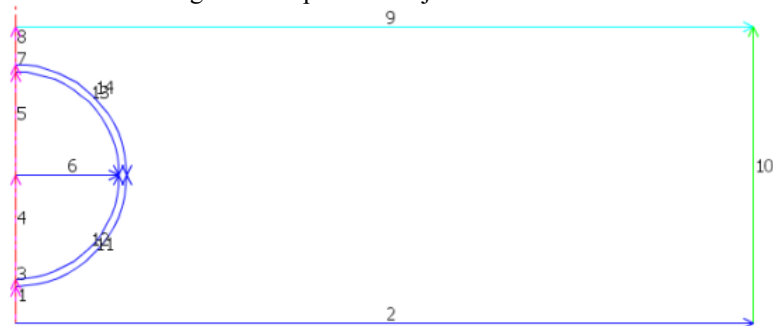
Fonte: Adaptado de Illias (2011)

3.2.2 Definições iniciais

Inicialmente são definidas as condições de contorno e os valores iniciais dos parâmetros exigidos para cada interface física no COMSOL *Multiphysics®*. A figura 3.2 mostra as linhas

de contorno existentes e o quadro 3.3 exhibe as condições de contorno definidas nas interfaces *Electric Currents* e *Heat Transfer in Solids*.

Figura 3.2-Linhas de contorno da geometria para um objeto de teste cilíndrico com uma cavidade esférica



Fonte: Adaptado de Illias (2011)

Quadro 3.3-Condições de contorno definidas na geometria para cada interface física

LINHAS DE CONTORNO	<i>G N G E V T K E " E W T</i>	<i>J G C V " V T C P U H U Q N K F U</i>
9	Potencial elétrico	Isolação térmica
2	Aterramento	Isolação térmica
10	Isolação elétrica	Isolação térmica
1,3,4,5,7,8	Eixo de simetria	Eixo de simetria

Fonte: Adaptado de Illias (2011)

Na interface *Electric Currents*, quando um potencial elétrico é definido como uma condição de fronteira, a expressão $V = U_{amp} \cdot \text{sen}(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t)$ é necessária para a simulação. Sendo U_{amp} e f a amplitude e frequência da tensão aplicada, respectivamente. Da mesma forma, quando se define o aterramento como uma condição de fronteira, a expressão $V = 0$ é implementada. Além disso, na interface *Heat Transfer in Solids* o valor de temperatura inicial T_0 em cada subdomínio também é necessário para a simulação.

Como já mostrado no quadro 3.2, para realizar um estudo no COMSOL *Multiphysics*®, cada interface exige a definição de alguns parâmetros que serão escolhidos de acordo com o material em cada subdomínio. Entretanto, na interface *Heat Transfer in Solids* também é adicionado o parâmetro de densidade de fonte de calor Q .

Dessa forma, o tabela 3.1 exhibe os nomes dos parâmetros iniciais e seus valores para a simulação que são definidos no *software* de MEF. Os valores são definidos de acordo com os materiais representados em cada subdomínio sendo a resina epóxi utilizada como o material dielétrico e é considerando o ar como o gás presente na cavidade. Também é importante lembrar que para uma cavidade no interior de um material dielétrico sólido, a superfície é composta pelo próprio material dielétrico. Portanto, o subdomínio da superfície da cavidade inicialmente

é definido com os mesmos parâmetros utilizados nas definições do material dielétrico (Illias, 2011).

Tabela 3.1-Definição dos parâmetros iniciais no COMSOL *Multiphysics*®

Parâmetro	Símbolo	Valor inicial	Unidade
Permissividade relativa do material dielétrico	ϵ_{rmat}	4,4	Adimensional
Permissividade relativa da superfície da cavidade	ϵ_{rs}	4,4	Adimensional
Permissividade relativa da cavidade	ϵ_{rcav}	1	Adimensional
Condutividade elétrica do material dielétrico	σ_{mat}	1×10^{-13}	S/m
Condutividade elétrica inicial da superfície da cavidade	σ_{s0}	1×10^{-13}	S/m
Condutividade elétrica inicial da cavidade	σ_{cav0}	0	S/m
Condutividade térmica da cavidade	k_{cav}	0,0258	W/m/K
Condutividade térmica do material dielétrico	k_{mat}	0,19	W/m/K
Calor específico da cavidade	C_{cav}	1006	J/(kg.K)
Calor específico do material dielétrico	C_{mat}	1000	J/(kg.K)
Densidade da cavidade	ρ_{cav}	1,1808	kg/m ³
Densidade do material dielétrico	ρ_{mat}	1250	kg/m ³
Densidade de fonte de calor da cavidade	Q_{cav}	0	W/m ³
Densidade de fonte de calor do material dielétrico	Q_{mat}	0	W/m ³

Fonte: Adaptado de Illias (2011)

Após a criação da geometria e definições iniciais no COMSOL *Multiphysics*®, a malha de elementos deve ser criada levando em consideração que os pontos principais da geometria fazem parte da cavidade e localidades próximas. Dessa forma, a malha é bem mais refinada na cavidade e ao seu entorno do que em pontos mais distantes, onde não há tantos valores críticos. A consequência disso é um ganho no tempo de simulação. Além disso, no modelo também é utilizada a opção de estudo *Time Dependent* pois se deseja simular um comportamento com a variação no tempo e, para isso, é necessário definir um valor de passo de simulação Δt .

Para a simulação dinâmica do modelo, além dos parâmetros apresentados neste subtópico, outros parâmetros associados ao comportamento físico de uma descarga parcial precisam ser definidos para que a implementação possa ocorrer. Esses parâmetros, por sua vez, serão utilizados através de um script com o auxílio da ferramenta *LiveLink™ for MATLAB*®.

3.2.3 Descarga parcial e magnitude de carga

Com o intuito de representar a descarga no interior da cavidade durante a simulação dinâmica, transforma-se a cavidade em um ambiente não condutor para condutor através da alteração do parâmetro de condutividade elétrica σ_{cav0} no subdomínio da cavidade, que inicialmente é zero, para um valor máximo σ_{cavmax} no instante de uma descarga parcial. Durante o processo de DP, há o crescimento de uma corrente $I_{cav}(t)$ no interior da cavidade que cresce até um valor máximo. Ao mesmo tempo, o campo elétrico na cavidade $E_{cav}(t)$ começa a diminuir. Após um determinado espaço de tempo, a corrente também começa a diminuir juntamente com o campo elétrico. Quando o campo elétrico na cavidade se torna menor que o campo elétrico de extinção para aquela cavidade, a condutividade elétrica volta a ser definida como zero e o processo de descarga finaliza (Illias *et al.*, 2017; Afrouzi *et al.*, 2022).

A interface física *Electric Currents*, utilizando a equação (3.2), também permite calcular a corrente em um determinado contorno da geometria e, como uma simulação dinâmica é realizada, as cargas real e aparente geradas a partir de uma DP também podem ser calculadas pelo modelo através da equação (3.4). Dessa forma, a carga real q_{real} é calculada com a integral no tempo da corrente no interior da cavidade pela linha de contorno 6 e a carga aparente q_{ap} é calculada com a integral no tempo da corrente no eletrodo de aterramento pela linha de contorno 2.

$$q_{DP} = \int_t^{t+dt} I(t)dt \quad (3.4)$$

3.2.4 Aumento de temperatura

O modelo também leva em consideração a mudança de temperatura que ocorre na cavidade após uma descarga parcial por conta da liberação de energia no processo de ionização de elétrons. Para simular esse processo dinamicamente, o parâmetro densidade de fonte de calor da cavidade Q_{cav} é alterado de zero para um valor maior durante uma descarga parcial. Quando Q_{cav} é aumentado, a temperatura no interior da cavidade também aumenta. O valor da

temperatura na cavidade $T_{cav}(t)$ é calculado numericamente pela interface *Heat Transfer in Solids* utilizando a equação (3.3). Após o evento da descarga, o valor de Q_{cav} é colocado em zero novamente.

Como explicado anteriormente, durante o processo de descarga uma corrente flui no interior da cavidade. No modelo, a descarga é considerada como tendo um formato cilíndrico. Dessa forma, a energia liberada durante o processo de descarga pode ser calculada pela equação (3.5), onde $Q_{cav}(t)$ é a densidade de fonte de calor e os valores de campo elétrico $E_{cav}(t)$ e densidade de corrente $J_{cav}(t)$ no interior da cavidade são calculados numericamente pelo COMSOL *Multiphysics*®.

$$Q_{cav}(t) = E_{cav}(t) J_{cav}(t) \quad (3.5)$$

Com o aumento da temperatura no interior da cavidade, conseqüentemente também há um aumento da pressão. É considerado que o volume da cavidade é constante e o gás no interior dela é um gás ideal. Dessa forma, nessas condições a pressão $p(t_n)$ em um determinado ponto da cavidade aumenta na mesma proporção que a temperatura $T_{cav}(t_n)$ no passo de tempo n de acordo com a equação (3.6).

$$p(t_n) = \left[\frac{p(t_{n-1})}{T_{cav}(t_{n-1})} \right] T_{cav}(t_n) \quad (3.6)$$

3.2.5 Campo elétrico de ruptura e de extinção

Sabe-se, pela equação (2.3), que o campo elétrico de ruptura E_{rup} varia de acordo com a pressão no interior da cavidade p e com o diâmetro d da cavidade. Entretanto, no modelo em questão onde a validação é feita através de comparação com testes experimentais, o campo elétrico de ruptura inicial E_{rup0} é assumido como sendo o mesmo registrado nos ensaios com as amostras e seu valor aumenta em função do aumento da temperatura T_{cav} no centro da cavidade de acordo com a equação (3.7), onde κ e χ são constantes determinadas a partir dos experimentos.

$$E_{rup}(t) = \kappa + \chi T_{cav}(t) \quad (3.7)$$

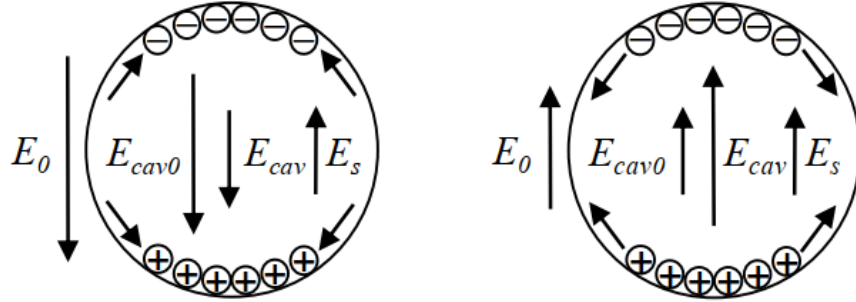
Por outro lado, tem-se que o campo elétrico de extinção é aproximadamente proporcional a pressão no interior da cavidade de acordo com a equação (2.6). Sendo que, para este modelo, o valor do campo elétrico de extinção inicial E_{ext0} também é definido por meio dos dados experimentais.

3.2.6 Decaimento de cargas na superfície da cavidade

Após uma descarga parcial, sabe-se que cargas se alojam nas extremidades da cavidade paralelas ao campo aplicado ao sistema de isolamento $E_0(t)$ formando um campo elétrico superficial $E_s(t)$, cujo sentido é oposto a $E_0(t)$ no momento da descarga. Essas cargas, por sua vez, influenciam no processo de formação de uma próxima descarga. Entretanto, com o passar do tempo, há um processo de decaimento dessas cargas alojadas na parede da cavidade fazendo com que a magnitude de $E_s(t)$ diminua. Dessa forma, no modelo é simulado um decaimento de cargas na superfície da cavidade através da alteração da condutividade elétrica da superfície σ_s e esse processo é considerado dependente do campo elétrico na cavidade $E_{cav}(t)$ e do campo elétrico na superfície da cavidade $E_s(t)$ (Illias, 2011).

O diagrama mostrado na figura 3.3 representa de forma simples a movimentação das cargas na superfície. Devido a oposição dos dois campos no interior da cavidade após uma DP, as cargas alojadas na superfície tendem a permanecer nas extremidades superior e inferior da cavidade. Como não há movimento dessas cargas, a recombinação torna-se mais difícil e, portanto, o decaimento de cargas é baixo. Entretanto, em um outro momento, o campo elétrico muda seu sentido com o decorrer do tempo fazendo com que o campo na cavidade $E_{cav}(t)$, fique no mesmo sentido que o campo superficial $E_s(t)$. Quando isso acontece, as cargas que foram dispostas nas extremidades superiores e inferiores da cavidade começam a se movimentar pela superfície fazendo com que a recombinação se torne mais fácil. Nessa situação, a condutividade da superfície da cavidade σ_s é aumentada para simular o movimento e decaimento de cargas (Illias, 2011).

Figura 3.3- Movimentação das cargas na superfície da cavidade quando E_{cav} e E_s possuem sentidos opostos (esquerda) e quando possuem o mesmo sentido (direita)



Fonte: Adaptado de Illias (2011)

O valor de $E_s(t)$ é extremamente importante para o modelo uma vez que ele é diretamente proporcional a taxa de geração inicial de elétrons e gera influência na probabilidade de ocorrência de uma próxima DP. Dessa forma, na simulação, $E_s(t)$ é calculado utilizando a equação (3.8) onde $E_{cav0}(t)$ é o campo elétrico inicial na cavidade, quando não há cargas na superfície, e $E_{cav}(t)$ é o campo elétrico na cavidade em um instante de tempo após a primeira descarga. $E_{cav}(t)$ é calculado numericamente em um ponto no centro da cavidade (Ferreira, 2017).

$$E_s(t) = E_{cav}(t) - E_{cav0}(t) \quad (3.8)$$

Como já mencionado anteriormente, imediatamente após um evento de descarga parcial, cargas são depositadas na superfície da cavidade. Entretanto, algumas dessas cargas são presas na superfície e outras ficam livres para se movimentar ao longo da parede da cavidade. Dessa forma, a magnitude de $E_s(t)$ é composta por dois campos elétricos superficiais. As cargas presas dão origem ao campo $E_{spresa}(t)$ e as cargas livres geram o campo $E_{slivre}(t)$.

O modelo em questão leva em consideração que a movimentação de cargas e recombinação acontece apenas com cargas livres. Portanto, $E_s(t)$ deve ser maior que $E_{spresa}(t)$, indicando que há cargas livres dando origem ao campo $E_{slivre}(t)$. É possível, através do COMSOL *Multiphysics*®, calcular a quantidade de cargas livres $q_{slivre}(t_{DP})$ na superfície da cavidade no instante final t_{DP} de uma descarga parcial através da equação (3.9).

$$q_{slivre}(t_{DP}) = \int_S [D_{zsup}(t_{DP}) - D_{zinf}(t_{DP})] dS \quad (3.9)$$

Onde, $D_{zsup}(t_{DP})$ e $D_{zinf}(t_{DP})$ são as densidades de fluxo elétrico, numericamente calculadas, na parte superior e inferior da superfície da cavidade, respectivamente. A partir do valor de $q_{slivre}(t_{DP})$, $E_{slivre}(t_{DP})$ pode ser calculado através de uma regra de três matemática dando origem a equação (3.10).

$$E_{slivre}(t_{DP}) = \left| \frac{q_{slivre}(t_{DP})}{q_{DPtotal}(t_{DP})} \right| E_s(t_{DP}) \quad (3.10)$$

Onde, $q_{DPtotal}(t_{DP})$, é a carga total real de uma ou mais DPs que dá origem ao campo elétrico superficial $E_s(t)$ e é calculada pela equação (3.11). Nesse caso, $(q_{PD})_i$ é a carga o evento i e m é quantidade total de descargas.

$$q_{DPtotal}(t_{DP}) = \sum_{i=1}^m (q_{PD})_i \quad (3.11)$$

Utilizando o valor de $E_{slivre}(t_{DP})$, o valor de $E_{spresa}(t_{DP})$ é calculado a partir da equação (3.12).

$$E_{spresa}(t_{DP}) = E_s(t_{DP}) - E_{slivre}(t_{DP}) \quad (3.12)$$

Dessa forma, na simulação do modelo, duas condições são impostas para que haja o aumento da condutividade da superfície. Primeiro, o campo elétrico na cavidade $E_{cav}(t)$, deve ter o mesmo sentido que o campo elétrico superficial $E_s(t)$, gerado por cargas que se alojam na superfície devido a uma descarga anterior. Além disso, $E_s(t)$ deve ser maior que $E_{spresa}(t)$. Ou seja, quando $E_s(t)$ diminui para o mesmo valor de $E_{spresa}(t)$, decaimento de cargas na superfície da cavidade finaliza. Quando as duas condições não são cumpridas, a condutividade da superfície σ_s retorna para o seu valor inicial σ_{s0} (Illias, 2011; Ferreira, 2017).

O valor da condutividade da superfície σ_s , que será definido para que o decaimento de cargas aconteça, é calculado dinamicamente a partir da equação (3.13). Sabe-se que esse valor é fortemente dependente do ambiente existente em contato com a superfície da cavidade. Por isso, no modelo é utilizado os valores de campo elétrico $E_{nas}(t)$ e temperatura $T_{nas}(t)$ em um ponto na superfície, que são calculados numericamente pelo *software* de MEF. Quanto maior esses dois parâmetros, haverá mais energia cinética e, portanto, mais movimento das cargas

fazendo com que haja mais recombinação. Além disso, α e β são os coeficientes de estresse e térmico para a superfície da cavidade, respectivamente.

$$\sigma_s(t) = \sigma_{s0} e^{(\alpha|E_{nas}(t)| + \beta T_{nas}(t))} \quad (3.13)$$

Como $\sigma_s(t)$ é calculado dinamicamente em função de $E_{nas}(t)$, ele pode atingir um valor muito elevado, o que pode levar o processo de descargas parciais a ser extinto de forma precoce no modelo. Dessa forma, é necessário que o valor da condutividade na superfície seja limitado a um valor máximo σ_{smax} para que o modelo não apresente problemas de convergência numérica. O valor de σ_{smax} é definido de acordo com as condições do modelo através da comparação com os resultados experimentais (Illias, 2011; Ferreira, 2017).

3.2.7 Geração inicial de elétrons

Após o campo elétrico no interior da cavidade $E_{cav}(t)$ exceder o campo elétrico de ruptura $E_{rup}(t)$, para que se inicie o processo de descarga parcial é necessário um elétron livre que iniciará o processo de avalanche e formação do canal de condução (Niemeyer, 1995). A quantidade de elétrons livres influenciará na fase e na magnitude da descarga, assim como na quantidade de descargas em um ciclo e a quantidade total de carga após um ciclo. Dessa forma, no modelo é considerado o parâmetro de taxa de geração de elétrons total $N_{et}(t)$ que seria o somatório da taxa de geração de elétrons superficial $N_{es}(t)$ com a taxa de geração de elétrons volumétrica N_{ev} como mostrado na equação (3.14). Em uma cavidade onde ainda não houve descargas parciais, $N_{es}(t)$ é considerado zero pois não há elétrons alojados na superfície da cavidade. Por isso, inicialmente há apenas N_{ev} , que é admitido como tendo um valor constante. Entretanto, após a primeira DP ocorrer no interior da cavidade, $N_{et}(t)$ passa a sofrer influência também de $N_{es}(t)$ (Haiba *et al.*, 2022; Pan *et al.*, 2019; Illias, 2011).

$$N_{et}(t) = N_{es}(t) + N_{ev} \quad (3.14)$$

De uma forma simples, o valor de $N_{es}(t)$ pode ser definido como o número de elétrons livres gerados por unidade de tempo através de emissão superficial. Portanto, inicialmente é considerado no modelo um valor N_{es0} que seria o número de elétrons livres gerados por unidade

de tempo quando o campo elétrico na cavidade é igual ao campo elétrico de ruptura inicial E_{rup0} . A partir disso, através de uma proporção com a equação (3.15), calcula-se o número de elétrons livres gerados por unidade de tempo através de emissão superficial no instante de tempo final de uma descarga parcial t_{DP} (Pan *et al.*, 2019; Illias, 2011).

$$N_{DP} = N_{es0} \left| \frac{E_{cav}(t_{DP})}{E_{rup0}} \right| \quad (3.15)$$

O valor de N_{es0} é constante durante o processo da DP e definido através dos dados experimentais. Entretanto, nesse modelo ele pode apresentar dois valores distintos inicialmente. É assumido que se houver uma mudança na polaridade de $E_{cav}(t)$ entre duas descargas parciais o valor de N_{es0} é definido com um valor mais baixo N_{es0B} , isso acontece pois fisicamente é mais difícil desprender elétrons de superfícies negativas do que positivas. Por outro lado, para duas DPs que ocorrem na mesma polaridade de $E_{cav}(t)$, N_{es0} é definido com um valor mais alto N_{es0A} . Resumidamente, essa mudança no modelo faz com que seja mais fácil haver descargas seguidas de mesma polaridade do que descargas seguidas de polaridades inversas e essa característica está de acordo com os dados experimentais (Illias, 2011).

O valor de N_{DP} ainda não é igual ao valor de $N_{es}(t)$ pois como é visto na equação (2.5), a geração de elétrons por emissão superficial sofre uma variação exponencial dependente do campo elétrico e da temperatura. Além disso, existe a influência do decaimento de cargas que também é exponencial. Dessa forma, para simplificar alguns parâmetros, a equação (3.16) foi utilizada no modelo para calcular $N_{es}(t)$. Nesta equação é mostrada a influência da constante de tempo de decaimento de carga na superfície τ_{dec} , pois ao longo do tempo, cargas que se alojaram na superfície começam a ficar presas em camadas cada vez mais fundas, deixam de ser possíveis elétrons livres e, conseqüentemente, ocasionam a diminuição da taxa de geração de elétrons superficial (Haiba *et al.*, 2022; Illias, 2011; Ferreira, 2017).

$$N_{es}(t) = N_{DP} e^{\left[-\frac{(t-t_{DP})}{\tau_{dec}} \right]} e^{\left| \frac{E_{cav}(t) T_{mat}}{E_{rup0} T_{amb}} \right|} \quad (3.16)$$

Onde, $N_{es}(t)$ é a taxa de geração de elétrons superficial, N_{DP} é o número de elétrons livres gerados por unidade de tempo através de emissão superficial no instante de tempo final de uma descarga parcial t_{DP} , τ_{dec} é a constante efetiva de decaimento de cargas, T_{amb} é a temperatura ambiente e T_{mat} é a temperatura do material.

A taxa de geração de elétrons volumétrica N_{ev} é considerada como sendo um valor sempre disponível para qualquer DP. Como já visto na equação (2.4), a geração de elétrons por ionização volumétrica depende da pressão na cavidade, do volume eficaz do gás presente e da tensão amplitude da tensão aplicada além de outros parâmetros físicos. Para simplificar, no modelo, optou-se por definir N_{ev} como um valor constante durante a simulação que é definido através da comparação com dados experimentais e varia de acordo com as condições iniciais da cavidade e características do ensaio (Pan *et al.*, 2019; Niemeyer, 1995; Illias, 2011).

3.2.8 Probabilidade de ocorrência de uma descarga parcial

Como já explicado anteriormente, o fenômeno de DP no interior de uma cavidade em um material isolante sólido apresenta uma característica estocástica que, conseqüentemente produz um tempo de atraso estatístico para cada evento. Esse atraso influencia na taxa de repetição de DPs em um determinado espaço de tempo, assim como, na magnitude de carga e ângulo de fase para cada descarga. Dessa forma, para reproduzir essa característica importantíssima do fenômeno, a taxa de geração de elétrons total $N_{et}(t)$ é utilizada para calcular um parâmetro de probabilidade de ocorrência $P(t)$ de acordo com a equação (3.17). Onde, Δt_0 representa o passo de tempo da simulação definido para o período sem DP (Haiba *et al.*, 2022; Illias, 2011).

$$P(t) = N_{et}(t)\Delta t_0 \quad (3.17)$$

O valor de P é calculado em cada passo de simulação a partir do momento que E_{cav} atinge o valor de E_{rup} . Esse valor é então comparado com um valor aleatório entre 0 e 1 gerado pelo *software* MATLAB®. Sempre que o valor de P calculado é maior que o valor aleatório, a simulação inicia o processo de descarga parcial.

3.2.9 Fluxo da simulação no MATLAB®

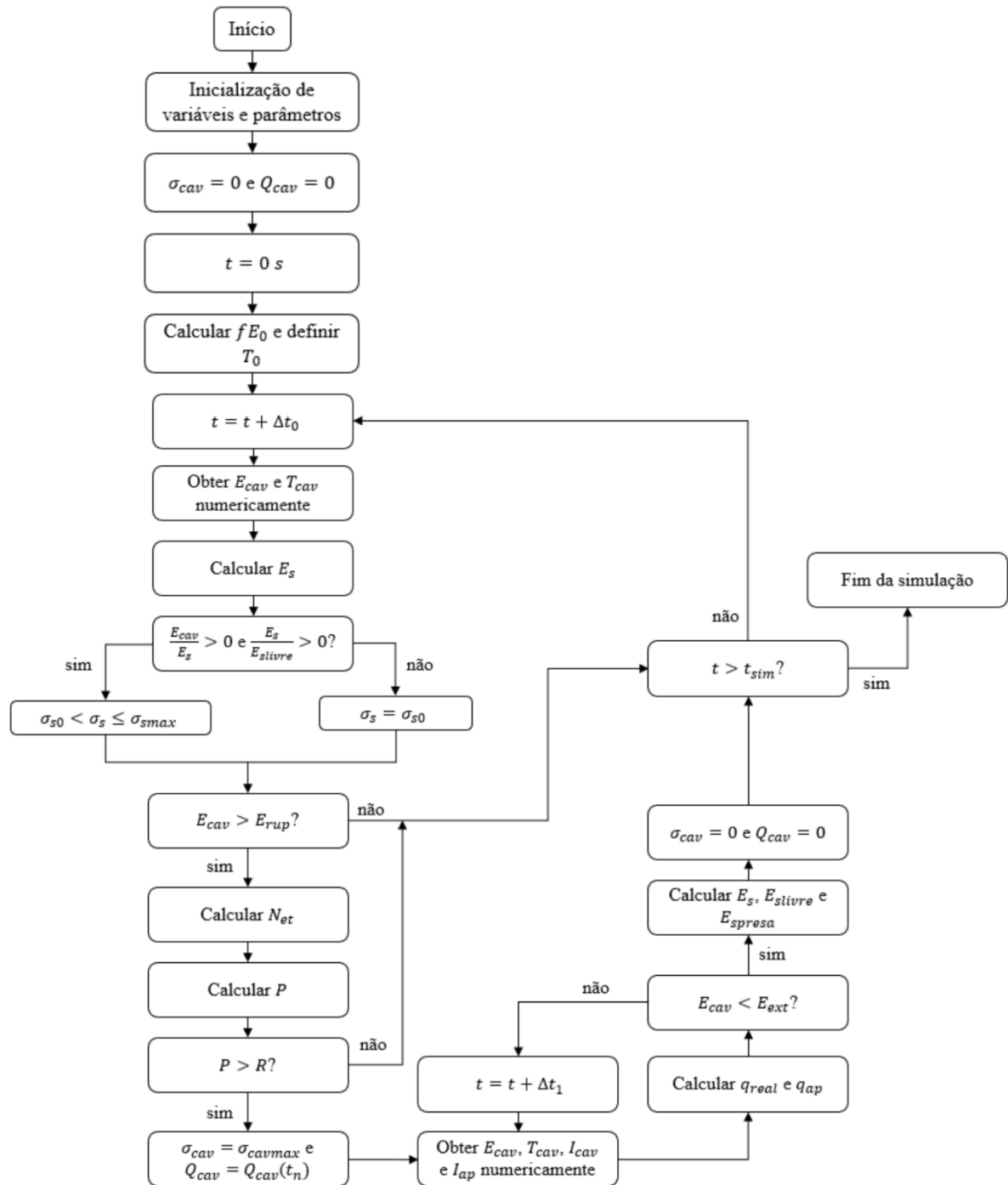
De uma forma geral, a simulação do modelo acontece de acordo com o fluxograma mostrado na figura 3.4. Primeiramente, o *script* no MATLAB® inicializa diversas variáveis e define valores a parâmetros iniciais que serão utilizados na simulação. São definidos parâmetros importantes como amplitude e frequência da tensão aplicada, quantidade de ciclos que se deseja simular, entre outros. Nesse processo, a interface entre MATLAB® e COMSOL *Multiphysics*® é estabelecida e o modelo é preparado para a simulação. No início da simulação, quando $t = 0$, os valores de condutividade σ_{cav} e densidade de fonte de calor Q_{cav} na cavidade são definidos como zero e a temperatura na cavidade T_{cav} é definida com um valor inicial T_0 igual a temperatura ambiente. Após isso, o *software* de MEF calcula o valor de fE_0 que é igual ao valor de E_{cav} antes de qualquer processo de DP ocorrer no interior da cavidade (Haiba *et al.*, 2022; Ferreira, 2017; Illias, 2011).

Inicialmente, o *script* simula o modelo em cada espaço de tempo incrementando um valor de passo de simulação Δt_0 , utilizado quando não há DP, e em cada passo de simulação os valores de E_{cav} e T_{cav} são calculados numericamente no modelo. Além disso, o valor do campo elétrico superficial E_s também é calculado que será zero antes de qualquer DP ocorrer na cavidade. Esse processo se repete enquanto o valor de E_{cav} for menor que o valor do campo elétrico de ruptura E_{rup} .

Quando o valor de E_{cav} supera o valor de E_{rup} , a primeira condição para que haja descargas parciais é concluída. Dessa forma, o valor da taxa de geração de elétrons total $N_{et}(t)$ é calculado, assim como o valor da probabilidade P . Este último valor é comparado com um valor aleatório R , gerado pelo próprio *software* MATLAB®.

Quando o valor de P é maior que R , σ_{cav} e Q_{cav} são definidos com valores maiores que zero para que haja um aumento de corrente e temperatura no interior da cavidade e o processo de DP seja simulado. Durante o processo da descarga, o passo de tempo da simulação é reduzido para um valor Δt_1 e em cada passo são calculados numericamente os valores de E_{cav} , T_{cav} que sofrem grandes variações devido a DP. Além disso, o COMSOL *Multiphysics*® também é utilizado para calcular os valores de corrente no interior da cavidade I_{cav} e no eletrodo de aterramento I_{ap} . Essas correntes são utilizadas para calcular as cargas real q_{real} e aparente q_{ap} geradas pela descarga.

Figura 3.4-Fluxograma de simulação do modelo de DP



Fonte: Adaptado de Ferreira (2017)

A simulação do processo de DP se estende enquanto o valor de E_{cav} for maior que o valor do campo elétrico de extinção E_{ext} . Quando isso não ocorrer mais, σ_{cav} e Q_{cav} são definidos como zero novamente para o processo de descarga finalize e o valor do passo tempo da simulação volta a ser Δt_0 . Após isso, os valores dos campos elétricos superficiais E_s , E_{slivre} e E_{spresa} são calculados pelo MATLAB®.

Durante todo o processo de simulação, as duas condições para decaimento de cargas na superfície da cavidade são testadas em cada passo de simulação e quando são verdadeiras, a condutividade elétrica da superfície σ_s é aumentada para simular o decaimento. O fluxo de simulação global acontece até que todos os ciclos de tensão aplicada sejam concluídos. Ou seja, quando o tempo final da simulação t_{sim} é alcançado, a simulação finaliza.

3.3 Implementação do modelo

Como dito anteriormente, o modelo de descargas parciais para a simulação dinâmica utilizado como base nessa dissertação foi proposto inicialmente em Illias (2011). Trata-se de um modelo utilizando o método de elementos finitos através do *software* COMSOL *Multiphysics*® em interface com o *software* MATLAB® para gerar um *script* que possibilita que a simulação de descargas parciais seja feita de forma dinâmica. Para que o modelo possa ser replicado em outros trabalhos, em Illias (2011) também é disponibilizado o código do *script* de MATLAB® completo em um de seus anexos.

Dessa forma, inicialmente este código foi copiado por inteiro para ser executado. Todavia, dois problemas foram identificados. Primeiramente, notou-se que o *script* apresentava alguns erros de digitação na utilização de algumas variáveis e principalmente em algumas equações importante para a simulação. Entretanto, o que mais dificultou a implementação para a simulação foi a desatualização no que diz respeito à interface de programação com o *software* COMSOL *Multiphysics*®. Por conta da data na qual o *script* foi criado pelo autor, foi utilizado uma versão anterior do *software*. Entretanto, a versão utilizada nesta dissertação foi a 5.5, uma versão mais atualizada.

A interface de programação possibilitada pela ferramenta *LiveLink*™ for MATLAB® é de extrema importância para a simulação dinâmica do modelo de descargas parciais. Dessa forma, foi necessária uma atualização de todo o código no que diz respeito à interface com o COMSOL *Multiphysics*®. Para isso, o manual de usuário *LiveLink*™ for MATLAB® *User's Guide* foi utilizado e o *script* completo foi atualizado. Para exemplificar a mudança realizada, a figura 3.5 apresenta um recorte de uma parte do código original onde a interface de programação é utilizada retirada, de Illias (2011). Por outro lado, a figura 3.6 apresenta um recorte do código atualizado com as mesmas funcionalidades.

Figura 3.5-Recorte de uma parte do código original utilizado para a simulação

```

appl.mode.class = 'QuasiStatics';
appl.mode.type = 'axi';
appl.name = 'emqvw';
appl.module = 'ACDC';
appl.sshape = 2;
appl.assignsuffix = '_emqvw';
clear prop
prop.elemdefault='Lag2';
prop.analysis='transsmallcurr';
appl.prop = prop;
clear bnd
bnd.eltype = {'ax','V0','cont','V','nJO'};
bnd.magtype = {'A0','A0','cont','A0','A0'};
bnd.V0 = {0,0,0,'MaxVolt*sin(2*pi*freq*t)',0};
bnd.ind = [1,2,1,1,1,3,1,1,4,5,3,3,3];
appl.bnd = bnd;
clear equ
equ.sigma = {'Smat','Ss','Scav0'};
equ.epsilonr = {'Ermat','Ers','Ercav'};
equ.shape = 1;
equ.ind = [1,2,3,3];
appl.equ = equ;
appl.var = {'nu','freq'};
fem.appl{1} = appl;

```

Fonte: Adaptado de Illias (2011)

Figura 3.6-Recorte de uma parte do código atualizado

```

model.component('compl').physics.create('ec', 'ConductiveMedia', 'geom1');
model.component('compl').physics('ec').create('pot1', 'ElectricPotential', 1);
model.component('compl').physics('ec').feature('pot1').selection.set(9);
model.component('compl').physics('ec').prop('EquationForm').set('form', 'Transient');
model.component('compl').physics('ec').feature('pot1').set('V0', 'MaxVolt*sin(2*pi*freq*t)');
model.component('compl').physics('ec').create('gnd1', 'Ground', 1);
model.component('compl').physics('ec').feature('gnd1').selection.set(2);
model.component('compl').material('mat1').propertyGroup('def').set('electricconductivity', 'Smat');
model.component('compl').material('mat2').propertyGroup('def').set('electricconductivity', 'Ss');
model.component('compl').material('mat3').propertyGroup('def').set('electricconductivity', 'Scav0');
model.component('compl').material('mat1').propertyGroup('def').set('relpermittivity', 'Ermat');
model.component('compl').material('mat2').propertyGroup('def').set('relpermittivity', 'Ers');
model.component('compl').material('mat3').propertyGroup('def').set('relpermittivity', 'Ercav');

```

Fonte: Do autor

Em Illias (2011), para comprovar a eficiência e assertividade do modelo, é realizada a comparação de resultados de medição em ensaios de laboratório com os resultados do modelo apresentado. Para isso, algumas amostras foram criadas com tamanhos de cavidades diferentes para que elas sejam testadas e comparadas com resultados da simulação de tal forma que alguns parâmetros do modelo são definidos a partir dessa comparação. Nesta dissertação, para mostrar que o modelo foi implementado após a atualização do *script*, foram utilizados exatamente os mesmos valores de parâmetros apresentados em uma das comparações realizadas em Illias (2011) onde os valores iniciais de alguns parâmetros já foram apresentados na tabela 3.1 e os valores dos parâmetros restantes estão expostos na tabela 3.2.

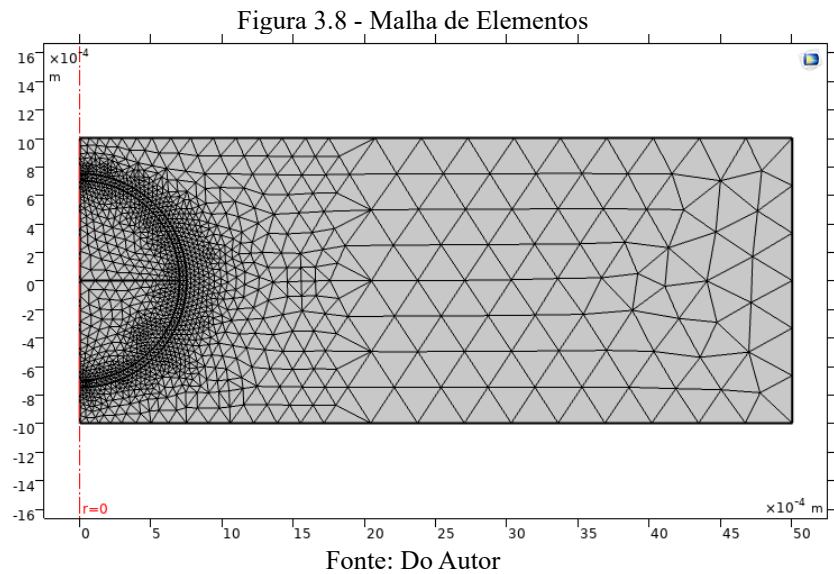
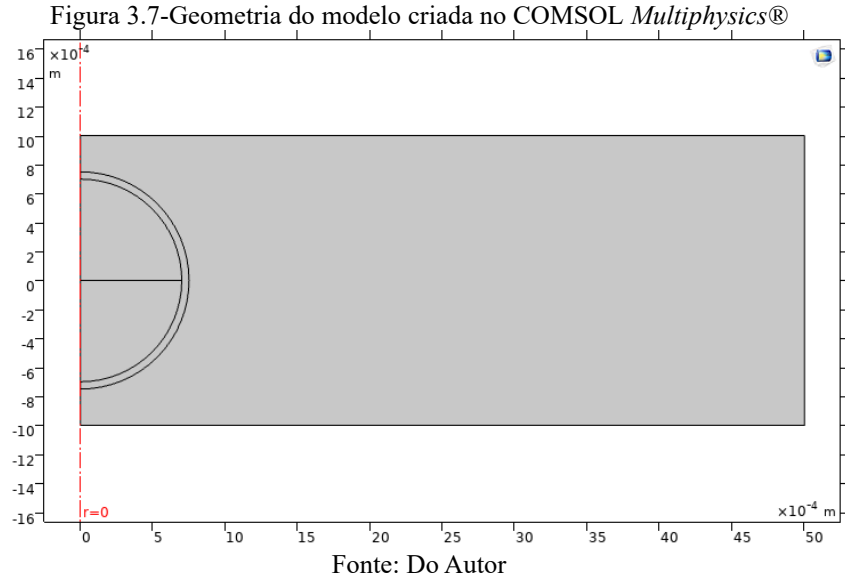
Tabela 3.2-Valores dos parâmetros utilizados para implementação

Parâmetro	Símbolo	Valor	Unidade
Amplitude da tensão aplicada	U_{amp}	20	kV
Frequência da tensão aplicada	f	50	Hz
Temperatura ambiente	T_{amb}	293	K
Temperatura do material	T_{mat}	293	K
Pressão inicial na cavidade	p_0	101	kPa
Diâmetro da cavidade	d_{cav}	1,4	mm
Espessura do material dielétrico cilíndrico	e_{mat}	2	mm
Diâmetro do material dielétrico cilíndrico	d_{mat}	10	mm
Espessura da superfície da cavidade	e_s	0,05	mm
Passo de tempo da simulação sem DP	Δt_0	$1/500f$	s
Passo de tempo da simulação com DP	Δt_1	1	ns
Condutividade máxima da cavidade durante a DP	σ_{cavmax}	5×10^{-13}	S/m
Máxima condutividade da superfície	σ_{smax}	2×10^{-9}	S/m
Coefficiente de estresse	α	10	mm/kV
Coefficiente térmico	β	1/293	1/K
Constante de tempo de decaimento de carga	τ_{dec}	2	ms
Campo elétrico de ruptura inicial	E_{rup0}	3,4	kV/mm
Campo elétrico de extinção inicial	E_{ext0}	0,89	kV/mm
Taxa de geração inicial de elétrons por emissão superficial	N_{es0A} N_{es0B}	3000 150	1/s 1/s
Taxa de geração de elétrons volumétrica	N_{ev}	85	1/s

Fonte: Adaptado de Illias (2011)

Para essa primeira simulação, os valores de amplitude da tensão aplicada U_{amp} , frequência da tensão aplicada f , temperatura ambiente T_{amb} , temperatura do material T_{mat} , diâmetro da cavidade d_{cav} , espessura do material dielétrico cilíndrico e_{mat} e diâmetro do material dielétrico cilíndrico d_{mat} foram escolhidos de acordo com uma das comparações realizadas em Illias (2011) para uma determinada amostra. Além disso, a espessura e_s é utilizada na geometria para simular a influência da superfície da cavidade ao processo de DP. A partir desses primeiros parâmetros, a geometria pode ser criada e os materiais podem ser definidos juntamente com as condições de contorno. A figura 3.7 mostra a geometria montada no *software*

de elementos finitos. Além disso, a malha de elementos criada pode ser vista na figura 3.8 cujos elementos possuem tamanhos diferentes para diminuir o tempo de simulação.



Antes de iniciar a simulação principal do modelo, dois gráficos bidimensionais foram criados para mostrar a distribuição de tensão e de campo elétrico ao longo da geometria quando a tensão aplicada atinge o seu valor de amplitude máxima U_{amp} igual a 20 kV. Esses gráficos podem ser visualizados nas figuras 3.9 e 3.10, respectivamente. Ressalta-se que essas são as distribuições no objeto de teste em seu estado inicial, antes de qualquer DP ocorrer.

Figura 3.9-Distribuição de tensão elétrica na geometria no valor máximo de amplitude

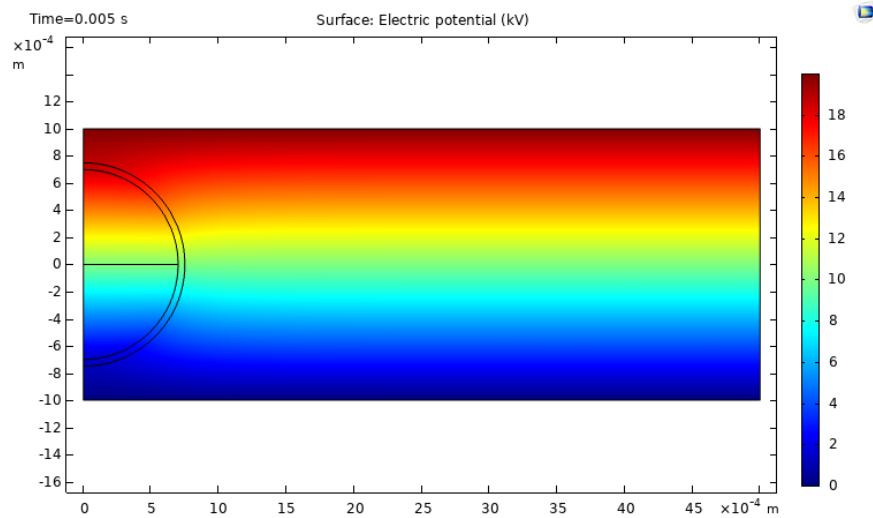
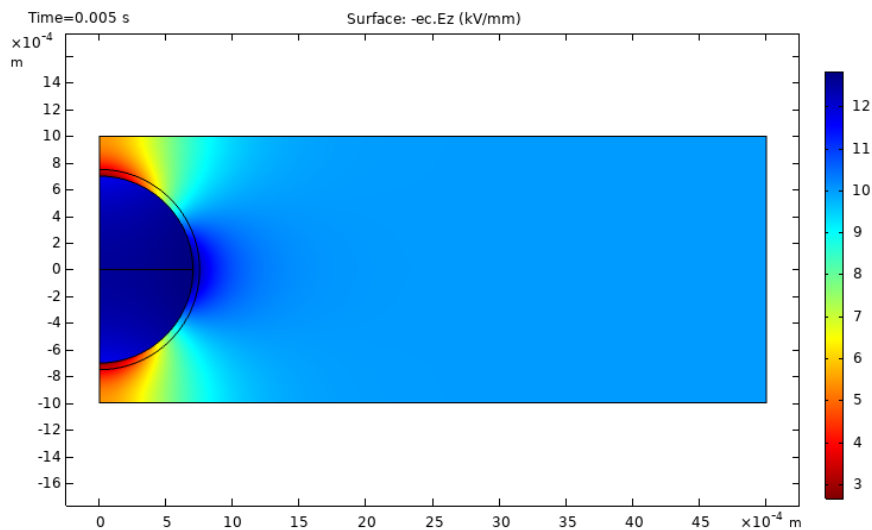


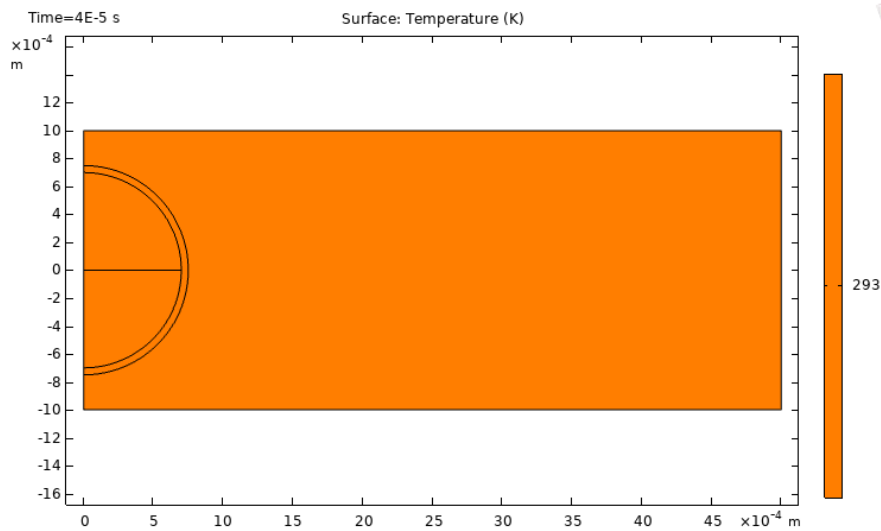
Figura 3.10-Distribuição de campo elétrico na geometria no valor máximo de amplitude



Pela figura 3.10, é possível identificar a o aumento de campo elétrico no interior da cavidade devido a diferença de rigidez dielétrica do material dielétrico e do ar presente na cavidade. Além disso, também é válido ressaltar a uniformidade do campo elétrico E_0 , aplicado ao sistema de isolamento, em pontos na lateral da cavidade. Nesses pontos, E_0 apresenta um valor de 10 kV/mm que está diretamente relacionado com o valor de tensão aplicada de 20 kV e com a espessura do material dielétrico e_{mat} igual a 2 mm para essa amostra.

A figura 3.11 também mostra a distribuição inicial de temperatura ao longo da geometria. Antes de haver qualquer DP, a temperatura na cavidade T_{cav} é igual a temperatura do material dielétrico T_{mat} que por sua vez, apresenta o mesmo valor da temperatura T_{amb} definida para o teste igual a 293 K, aproximadamente 20°C.

Figura 3.11-Distribuição da temperatura na geometria



Fonte: Do Autor

Para a simulação dinâmica de descargas parciais no modelo, o passo de tempo sem DP Δt_0 foi definido igual 0,04 ms visto que a frequência f foi escolhida como 50 Hz para esse teste. Esse valor de Δt_0 foi definido para manter o tempo de simulação dentro do adequado e ainda assim, obter-se alta precisão com relação ao ângulo de fase de uma possível DP. Além disso, quando uma DP ocorre, o passo de tempo para a simulação é reduzido para Δt_1 igual a 1 ns, visto que a descarga é um evento transitório extremamente rápido e deseja-se que o valor de magnitude de carga seja o mais próximo possível do medido nos ensaios experimentais.

O valor de condutividade máxima da cavidade σ_{cavmax} no momento de uma DP igual a 5×10^{-13} é definido através da comparação entre resultados de equações de condutividade no plasma juntamente com os resultados de magnitude de carga medidos nos ensaios experimentais, uma vez que o valor deste parâmetro está diretamente ligado com a intensidade da DP.

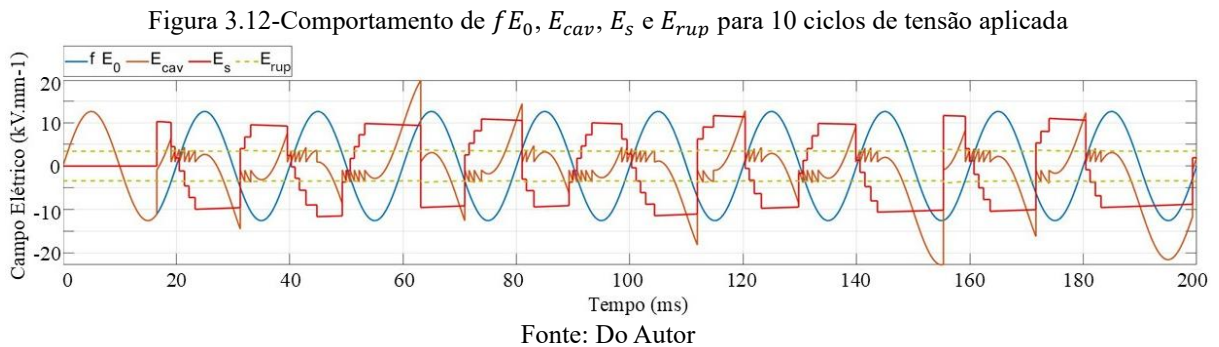
Para o processo de decaimento de cargas na superfície da cavidade, sabe-se que σ_s aumenta seu valor de acordo com a equação (3.13). Por isso, o coeficiente de estresse α é definido com o valor de 10 mm/kV e o coeficiente térmico β com o valor de $1/293 \text{ K}^{-1}$ ou aproximadamente $1/20 \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, para que o valor de σ_s não se eleve rapidamente em direção ao valor máximo σ_{smax} . Por sua vez σ_{smax} , também é definido experimentalmente e influencia no valor máximo de magnitude de carga durante o processo de simulação.

O valor da constante de tempo de decaimento de cargas τ_{dec} igual a 2 ms é definido com base na literatura que leva em consideração o material que compõe a superfície da cavidade, resina epóxi, e a temperatura ambiente. Além disso, como já comentado

anteriormente, os campos elétricos de ruptura inicial E_{rup0} e extinção inicial E_{ext0} são definidos através das medições dos valores de tensão aplicada nos instantes de início e fim da primeira DP durante os ensaios experimentais.

É importante ressaltar que os parâmetros iniciais para a taxa de geração de elétrons N_{es0A} , N_{es0B} e N_{ev} não retratam valores físicos reais do processo de DP. Dessa forma, eles são apenas valores representativos definidos para a modelagem. Entretanto, a escolha errada de valores para esses parâmetros pode resultar em uma diferença significativa entre os resultados medidos e simulados. Dessa forma, seus valores são definidos através de uma análise refinada sempre buscando adequar os resultados da simulação com os dados experimentais.

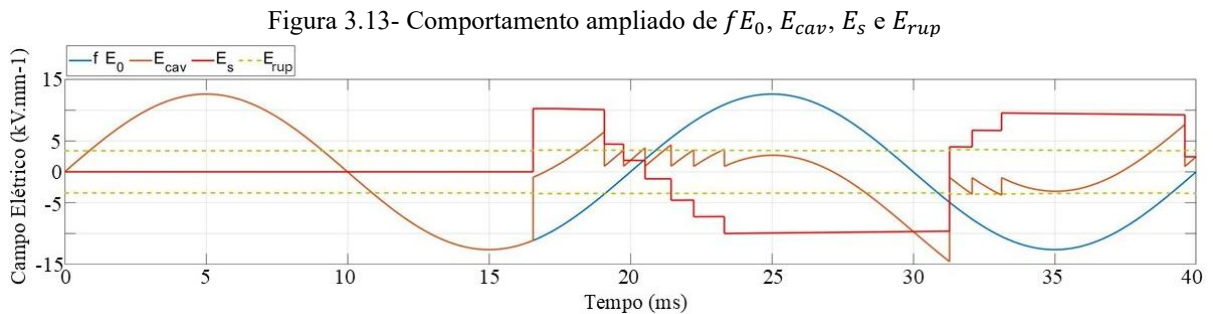
Com todos parâmetros definidos, a simulação foi executada para 10 ciclos de tensão aplicada e durou aproximadamente 7 h com o processamento computacional disponível para o trabalho. Após a finalização, o *software* MATLAB® foi utilizado para criação de alguns gráficos importantes para a análise. Dessa forma, na figura 3.12 são mostrados, para todos os ciclos simulados: o comportamento do campo elétrico inicial no centro da cavidade fE_0 quando não há presença de descargas parciais, o campo elétrico dinâmico no centro da cavidade E_{cav} devido a ocorrência de DPs, o campo elétrico superficial E_s que se forma após a primeira DP e campo elétrico de ruptura E_{rup} .



Nesse primeiro gráfico é possível identificar o tempo de atraso estatístico que a primeira DP possui devido a menor taxa de geração inicial de elétrons no início da simulação. A primeira descarga parcial ocorre apenas no final do primeiro ciclo de tensão onde é possível enxergar a primeira queda brusca no valor de E_{cav} e E_s passando a existir. Nota-se também, que após a primeira DP ocorrer, uma sequência de outras descargas ocorrem em valores bem próximos de E_{rup} . Isso acontece, pois a taxa de geração inicial de elétrons é maior devido a contribuição superficial, causando a diminuição no tempo de atraso estatístico das descargas.

Além disso, também é possível ver a contribuição que E_s causa em E_{cav} , pois no instante de tempo em que os dois campos possuem a mesma polaridade, E_{cav} apresenta valores muito maiores. Por outro lado, quando os dois campos apresentam polaridades inversas, o valor de E_{cav} é reduzido significativamente.

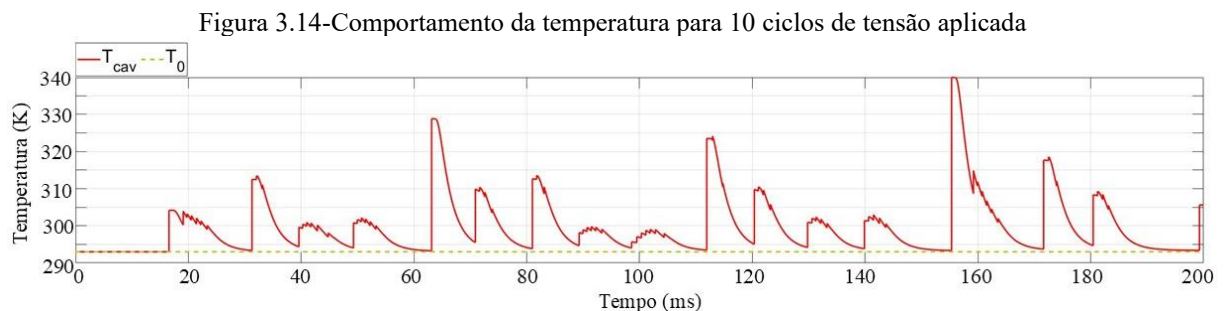
O mesmo gráfico ampliado é mostrado na figura 3.13. Nela é possível ver que, antes da primeira DP, quando a tensão aplicada atinge seu valor de amplitude máxima U_{amp} igual a 20 kV e o campo elétrico no sistema de isolamento E_0 atinge o valor de 10 kV/mm, o campo elétrico no interior da cavidade E_{cav} apresenta um valor de aproximadamente 12,5 kV/mm para uma cavidade de 1,4 mm de diâmetro.



Fonte: Do Autor

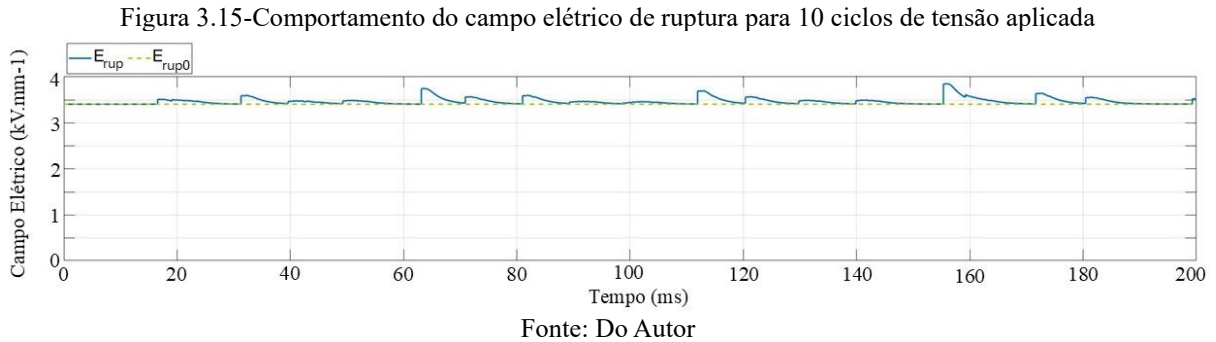
Também é importante ressaltar o decrescimento suave que E_s sofre ao longo do tempo a partir do momento que E_{cav} apresenta polaridade igual. Isso acontece devido ao decaimento de cargas na superfície da cavidade.

A figura 3.14 apresenta o gráfico de variação de temperatura no interior da cavidade T_{cav} . Nota-se que no momento de uma DP, a temperatura no interior da cavidade sofre um aumento que é proporcional ao valor absoluto de E_{cav} no instante inicial da descarga. Ou seja, quanto maior o valor do campo elétrico em que uma descarga ocorre, maior a quantidade de calor liberado no processo. Também é possível ver que quando há um espaço de tempo maior entre duas DPs, a temperatura diminui rapidamente para o seu valor inicial T_0 .

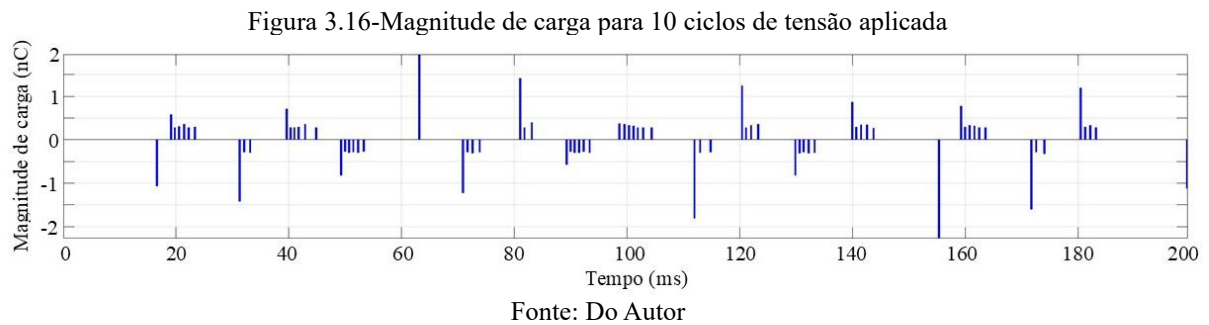


Fonte: Do Autor

Como mencionado anteriormente, o aumento da temperatura acarreta o aumento proporcional da pressão no interior da cavidade. Conseqüentemente, o campo elétrico de ruptura E_{rup} também sofre uma variação de acordo com o processo de DPs como é visto na figura 3.15

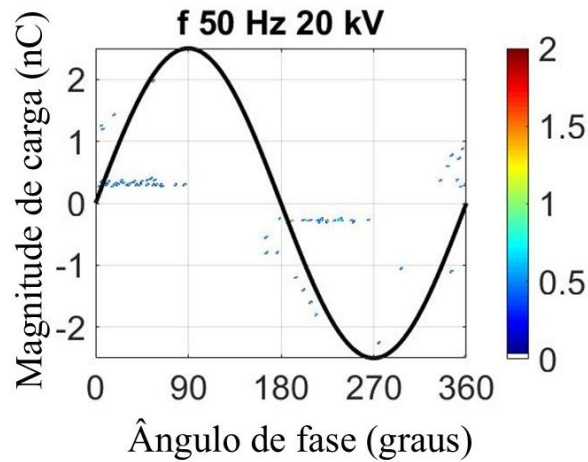


A figura 3.16 mostra o gráfico de magnitudes de cargas geradas pela ocorrência das DPs na simulação. Nota-se que, para as condições simuladas, há uma grande quantidade de cargas com menor magnitude. Além disso, o maior valor absoluto de intensidade atingido foi de 2269,34 pC e o menor valor absoluto foi de 271,79 pC.

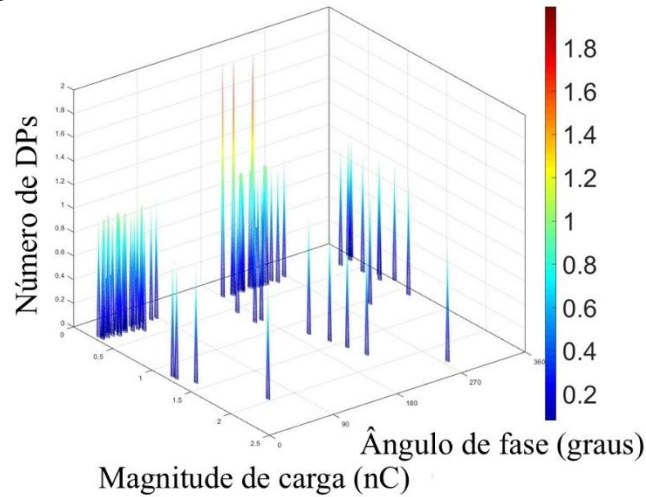


As figuras 3.17 e 3.18 mostram, respectivamente, os gráficos PRPD 2D e PRPD $\phi-q-n$ também criados pelo MATLAB® a partir dos dados da simulação. Como apenas 10 ciclos de tensão aplicada foram simulados, o gráfico PRPD não apresenta um grande preenchimento. Entretanto, mesmo assim é possível notar levemente a característica de simetria entre os semiciclos de tensão, que é comum para descargas parciais no interior de isolamento sólida. Além disso, nos dois gráficos é possível identificar com mais clareza a superioridade de cargas de baixa magnitude.

Figura 3.17-Gráfico PRPD 2D para 10 ciclos de tensão aplicada



Fonte: Do Autor

Figura 3.18- Gráfico PRPD $\phi-q-n$ para 10 ciclos de tensão aplicada

Fonte: Do Autor

Para confirmar que o modelo foi implementado de forma correta, os dados de carga da simulação realizada para esta dissertação foram comparados com os dados medidos nos ensaios experimentais para as mesmas condições e mesma amostra de objeto de teste disponível em Illias (2011). Dessa forma, a comparação mostrada na tabela 3.3 comprova que o modelo está funcionando corretamente, visto que os valores entre simulação e medição ficaram dentro de uma margem bem pequena de erro.

Tabela 3.3-Comparação entre os resultados da simulação e os resultados das medições

	Resultados da simulação	Resultados das medições
Número de DPs por ciclo	7,5	7,3
Carga total por ciclo (pC)	3857	3940
Magnitude de carga média (pC)	514	536
Magnitude de carga máxima (pC)	2269	2250
Magnitude de carga mínima (pC)	271	263

Fonte: Do autor

3.4 Considerações finais

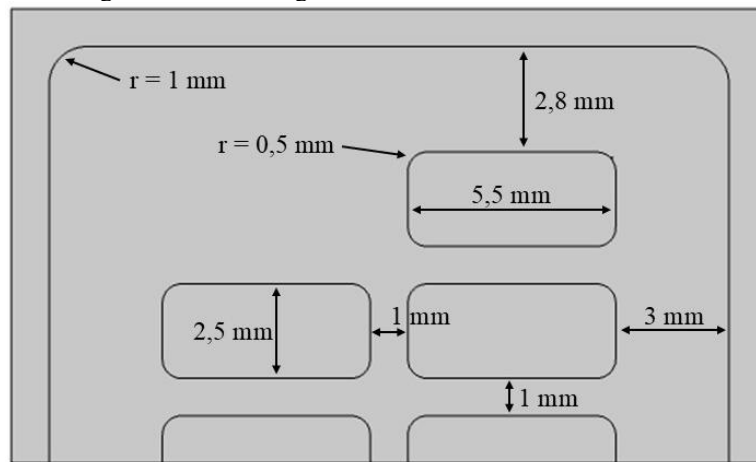
Neste capítulo, um detalhamento sobre o modelo de descargas parciais com Método de Elementos Finitos foi realizado com o objetivo de se ter um bom entendimento sobre a aplicação que será utilizada como base para esta dissertação. Primeiramente, o método em questão foi conceituado de forma sucinta. As ferramentas computacionais utilizadas foram introduzidas e suas principais características apresentadas. O modelo a ser utilizado neste trabalho é possível através de uma interface entre o *software* de elementos finitos COMSOL *Multiphysics*® e o *software* MATLAB®.

Além disso, foi realizada uma descrição mais detalhada do modelo utilizado, expondo como o comportamento físico do processo de descargas parciais é simulado dinamicamente e quais são os principais parâmetros levados em consideração. Para a implementação do modelo em questão, diversas atualizações no código de simulação foram realizadas. Finalmente, os resultados da implementação do modelo foram expostos e, comparando-se com os resultados apresentados no trabalho de referência, pôde-se afirmar que o modelo estava implementado de forma correta.

4 MODELAGEM EM UMA BARRA ESTATÓRICA

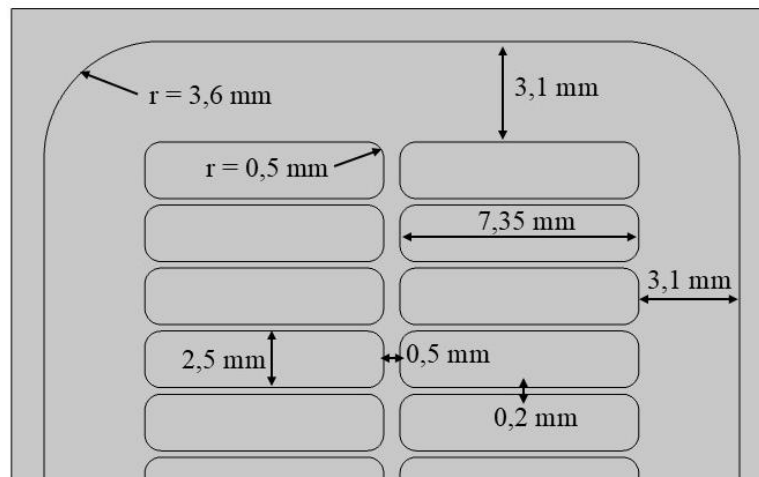
Neste trabalho, para modelar a barra estática no *software* COMSOL *Multiphysics*®, duas geometrias foram utilizadas a partir do diagrama de um corte na seção transversal da barra, como já mostrado na figura 2.8. As duas geometrias, com as suas respectivas dimensões, podem ser vistas nas figuras 4.1 e 4.2. Cada uma delas foi utilizada para realizar um estudo envolvendo descargas parciais. Maiores detalhes sobre as geometrias e os estudos serão feitos a seguir.

Figura 4.1-Primeira geometria de barra estática utilizada



Fonte: Do autor

Figura 4.2-Segunda geometria de barra estática utilizada



Fonte: Do autor

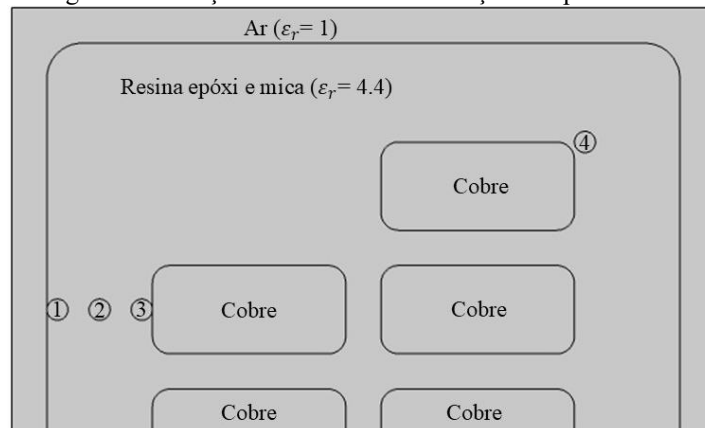
4.1 Estudo com a primeira geometria de barra estatórica

A primeira geometria de barra estatórica é proposta em Turgeon *et al.* (2011) para calcular o tamanho crítico de uma cavidade no interior da isolamento principal através de uma metodologia que consiste em utilizar um *software* de método de elementos de fronteira para calcular o campo elétrico no interior da cavidade. A partir disso, o campo elétrico é utilizado para definir o tamanho crítico capaz de romper a rigidez dielétrica do gás de acordo com as curvas da lei de Paschen para 20°C e 100°C. Dessa forma, nesta dissertação, a mesma geometria foi utilizada para fazer uma comparação com os resultados apresentados em Turgeon *et al.* (2011) utilizando o *software* de Método de elementos finitos para calcular o campo elétrico no interior da cavidade. Além disso, os resultados apresentados em Illias (2011) também serão utilizados para aumentar a precisão deste estudo.

4.1.1 Metodologia para avaliação de criticidade

Assim, como em Turgeon *et al.* (2011), quatro posições diferentes para a cavidade foram estudadas separadamente no COMSOL *Multiphysics*®, sendo que essas posições são exibidas na figura 4.3. Como se deseja calcular apenas o campo elétrico no interior da cavidade quando a tensão assume um determinado valor, a interface física *Electrostatics* foi utilizada e o tipo de estudo escolhido foi o *Stationary*.

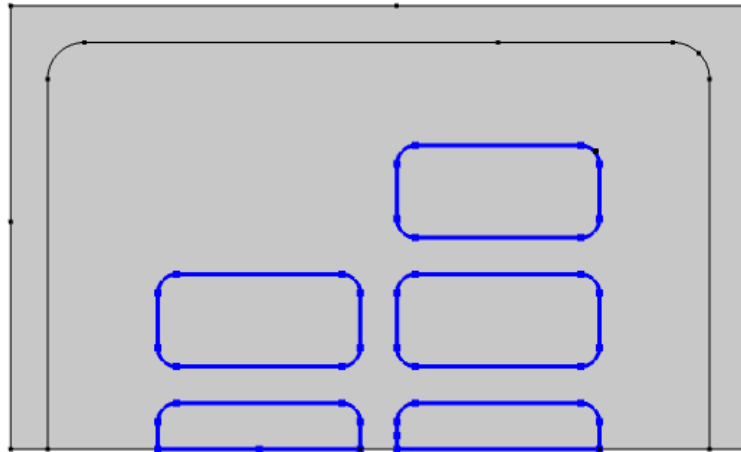
Figura 4.3-Posições da cavidade e definição dos parâmetros



Fonte: Do autor

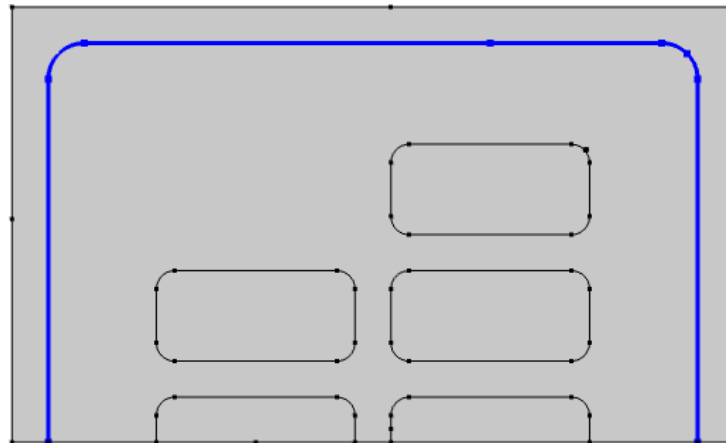
As condições de contorno de potencial elétrico e aterramento foram definidas conforme as figuras 4.4 e 4.5, respectivamente, pois, de acordo com a figura 2.8, deseja-se realizar a simulação com a diferença de tensão entre o condutor elétrico e o núcleo do estator. O valor do potencial elétrico escolhido para o estudo foi de 11,28 kV, que seria aproximadamente o valor de amplitude máxima entre fase e terra de um gerador com tensão nominal de 13,8 kV pois deseja-se calcular o maior campo elétrico atingido na cavidade em situação de operação do equipamento. Além disso, a malha de elementos, mostrada na figura 4.6, foi criada extremamente refinada para se obter resultados mais precisos.

Figura 4.4-Condição de contorno definida para o potencial elétrico



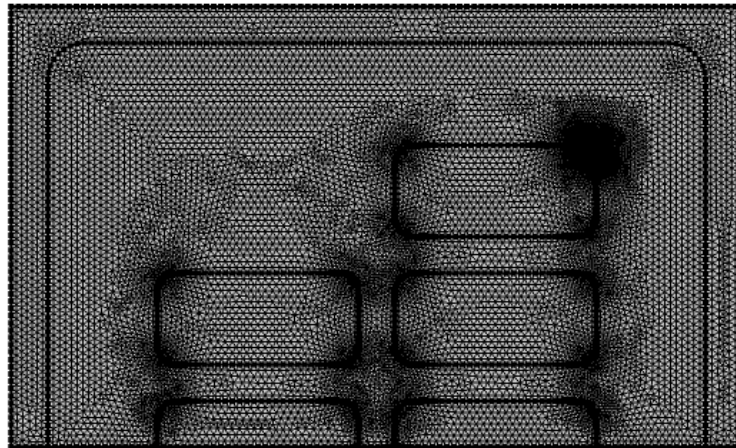
Fonte: Do autor

Figura 4.5-Condição de contorno definida para o aterramento



Fonte: Do autor

Figura 4.6-Malha de elementos criada



Fonte: Do autor

A metodologia utilizada neste trabalho para definir o diâmetro crítico da cavidade será descrita a seguir: as cavidades são avaliadas separadamente em cada uma das 4 posições exibidas, é assumido que elas são preenchidas por ar. Para definir se há ou não a possibilidade de ocorrência de uma DP no interior da cavidade, o campo elétrico de ruptura inicial E_{rup0} para uma determinada cavidade de diâmetro d_{cav} é levado em consideração pois ele representa a primeira condição necessária para o fenômeno uma DP. Para isso, os resultados experimentais apresentados em Illias (2011) para cavidades com tamanhos diferentes são utilizados. A tabela 4.1 mostra os valores de E_{rup0} a 20°C e 100°C de acordo com o diâmetro da cavidade retirados de Illias (2011).

Tabela 4.1-Campo elétrico de ruptura inicial para cavidades de tamanhos diferentes

Diâmetro da cavidade (mm)	E_{rup0} a 20 °C (kV/mm)	E_{rup0} a 100 °C (kV/mm)
1,55	3,02	4,48
1,1	3,35	4,81
2,35	2,83	4,14
1,7	3,53	4,39
1,4	3,35	4,57

Fonte: Adaptado de Illias (2011)

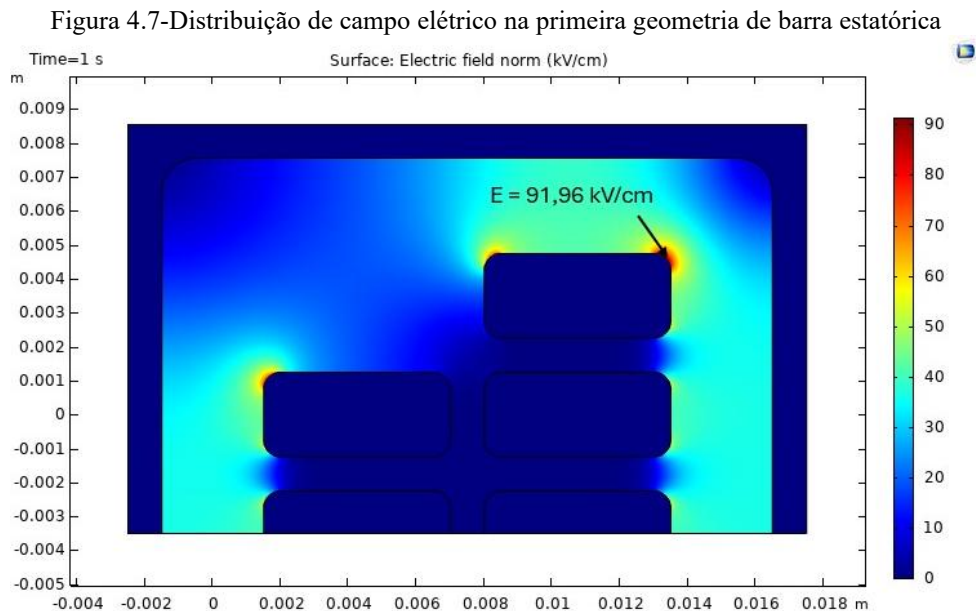
A partir disso, a equação (2.3) do campo elétrico de ruptura é utilizada. Para o ar, os parâmetros relacionados ao processo de ionização do gás $\left(\frac{E}{p}\right)_{cr}$, B e n assumem os valores 24,2 $VPa^{-1}m^{-1}$, 8,6 $Pa^{1/2}m^{1/2}$ e 0,5, respectivamente. Além disso, é assumido que para uma mesma temperatura inicial, a pressão no interior da cavidade p não apresenta variações significativas com a mudança do tamanho da cavidade. Dessa forma, p é calculada com os

valores da tabela 4.1 e utilizada para encontrar o valor de E_{rup0} para cavidades com diâmetros diferentes.

No COMSOL *Multiphysics*®, inicialmente uma cavidade com diâmetro 0,03 cm é colocada na posição que se deseja estudar, este valor foi escolhido aleatoriamente. O campo elétrico no centro da cavidade E_{cav} é calculado numericamente e E_{rup0} para este diâmetro é calculado com a equação (2.3). Após isso, o diâmetro da cavidade é gradualmente reduzido até que o valor de E_{cav} atinja um valor igual ao valor de E_{rup0} . Quando isso acontece, o diâmetro da cavidade em questão é considerado como crítico.

4.1.2 Resultados

Primeiramente, a simulação da geometria de barra estatórica sem nenhuma cavidade foi realizada. A distribuição de campo elétrico normalizado é mostrada na figura 4.7. Também é exibido na mesma figura o ponto onde o campo elétrico atinge o valor máximo igual a 91,96 kV/cm quando a tensão aplicada é igual a 11,28 kV.



Após isso, a metodologia para avaliação da criticidade foi executada e os valores de diâmetro de cavidade crítico para cada posição quando a temperatura inicial é igual a 20°C foram definidos e estão expostos na tabela 4.2. Ou seja, a partir desses valores de diâmetros, a

probabilidade de ocorrência de uma DP torna-se existente para uma tensão de operação com amplitude máxima U_{amp} igual a 11,28 kV. Pode-se observar que entre as posições 1, 2 e 3, a cavidade mais próxima ao condutor apresenta maior campo elétrico E_{cav} no seu interior e conseqüentemente, o menor diâmetro crítico. Esse resultado já era esperado, uma vez que pela equação (2.3), a diminuição do diâmetro da cavidade gera um aumento no campo elétrico de ruptura inicial E_{rup0} . A cavidade na posição 4 está localizada no ponto onde o campo elétrico assume o seu maior valor no modelo da barra estatórica. Dessa forma, pode-se assumir que esta é a posição com maior probabilidade de ocorrência de DPs.

Tabela 4.2-Diâmetro crítico para cavidade em diferentes posições com temperatura inicial igual a 20°C

Posição da Cavidade	Diâmetro crítico (cm)	$E_{cav} = E_{rup0}$ (kV/cm)
1	0,0312	48,6
2	0,017	59,6
3	0,015	62,4
4	0,0021	138

Fonte: Do autor

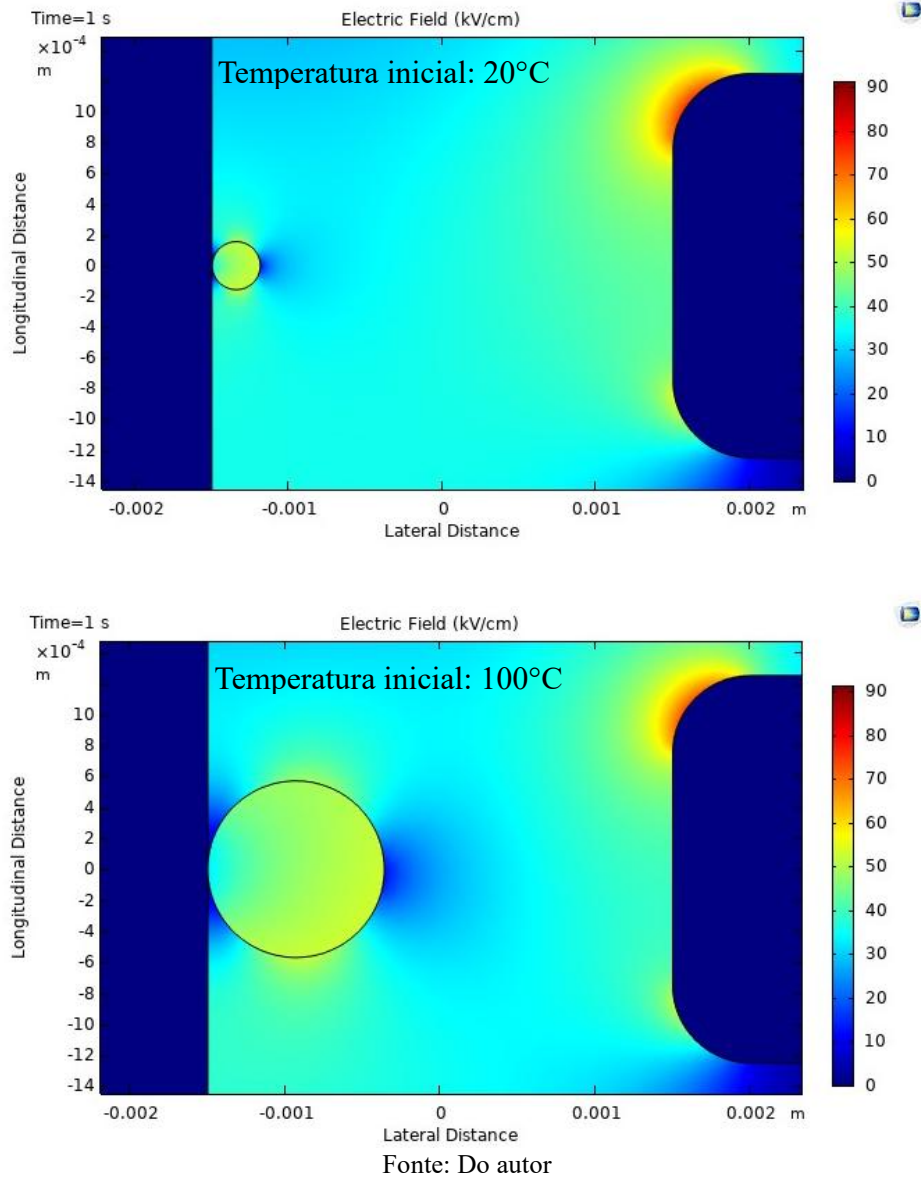
Da mesma forma, os valores críticos quando a temperatura inicial é igual a 100°C são apresentados na tabela 4.3. Ao comparar os resultados das duas tabelas, nota-se que ao aumentar a temperatura inicial de 20°C para 100 °C, o diâmetro crítico para todas as posições também aumenta. Isso acontece pois o aumento da temperatura resulta em um crescimento na pressão no interior da cavidade que conseqüentemente eleva o campo elétrico de ruptura inicial E_{rup0} e diminui o valor de diâmetro crítico. Dessa forma, nota-se que o aumento da temperatura inicial no interior da cavidade diminui a probabilidade de ocorrência de DPs. A maior diferença causada pela mudança da temperatura inicial acontece na cavidade na posição 1 onde a comparação pode ser vista na figura 4.8.

Tabela 4.3-Diâmetro crítico para cavidade em diferentes posições com temperatura inicial igual a 100°C

Posição da Cavidade	Diâmetro crítico (cm)	$E_{cav} = E_{rup0}$ (kV/cm)
1	0,114	47,7
2	0,0476	59
3	0,04	61,9
4	0,0046	130

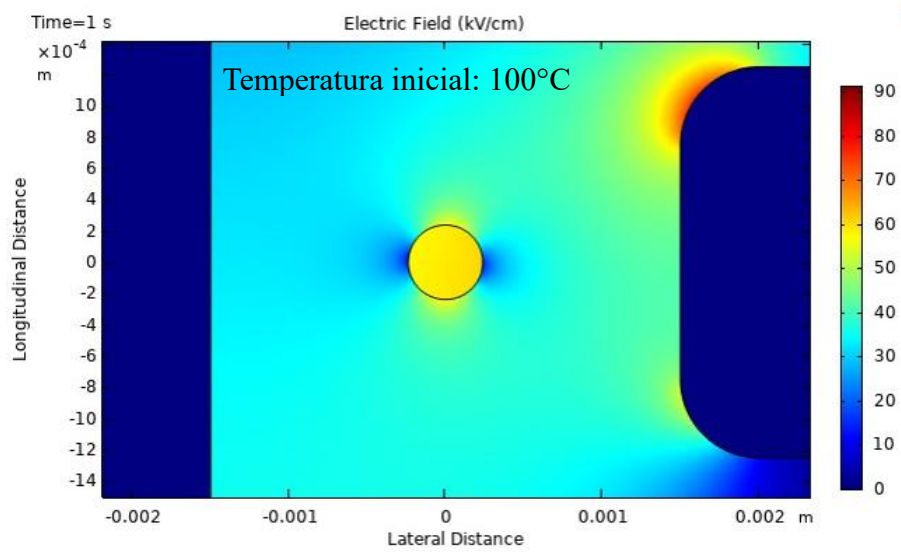
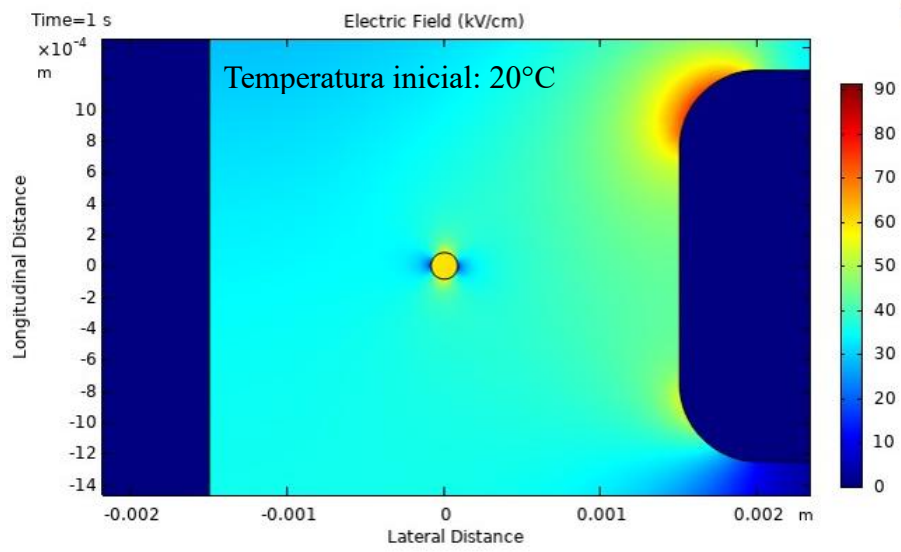
Fonte: Do autor

Figura 4.8-Comparação do diâmetro crítico de cavidade na posição 1 devido a mudança na temperatura inicial



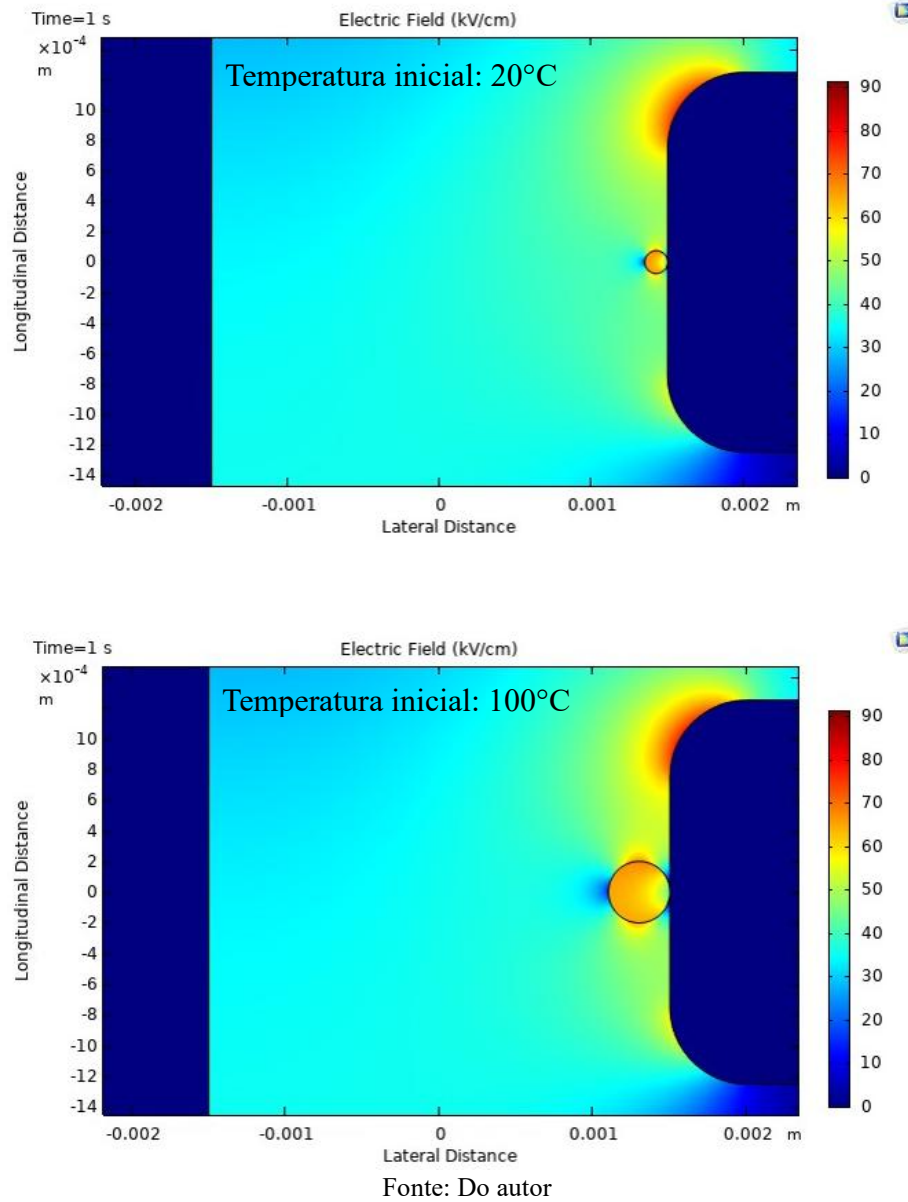
Além disso, as figuras 4.9 e 4.10 mostram, respectivamente, a comparação com a mudança da temperatura inicial para as posições 2 e 3.

Figura 4.9- Comparação do diâmetro crítico de cavidade na posição 2 devido a mudança na temperatura inicial



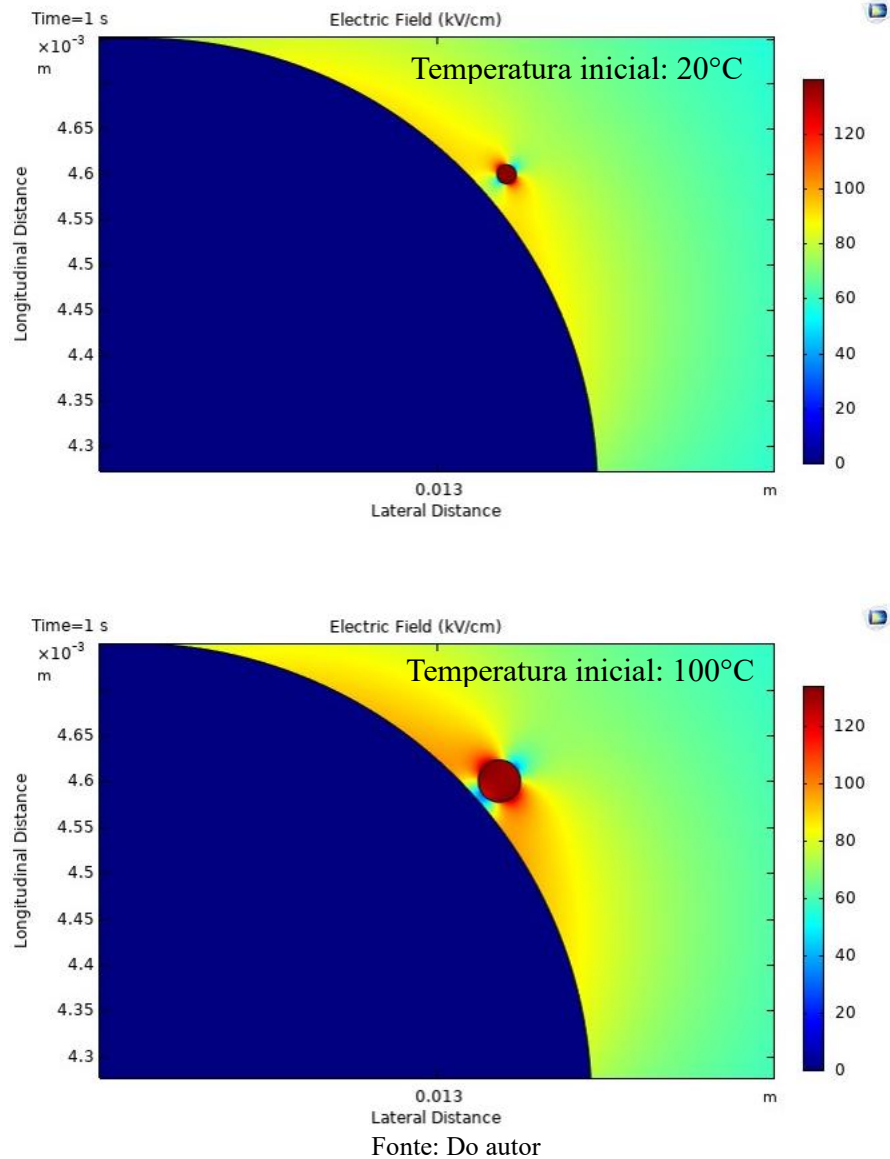
Fonte: Do autor

Figura 4.10- Comparação do diâmetro crítico de cavidade na posição 3 devido a mudança na temperatura inicial



Por outro lado, a menor variação de diâmetro crítico se dá quando a cavidade está na posição 4 como mostrado na figura 4.11.

Figura 4.11- Comparação do diâmetro crítico de cavidade na posição 4 devido a mudança na temperatura inicial



Dessa forma, neste estudo foi visto a importante influência que a posição da cavidade no interior da isolação principal tem, juntamente com a temperatura inicial da cavidade, no que diz respeito a probabilidade de ocorrência de DPs em uma barra estatórica. A validação dos resultados encontrados foi baseada no grau de precisão da equação (2.3), nas evidências experimentais utilizadas e no alto refinamento utilizado no COMSOL *Multiphysics*®.

4.2 Estudo com a segunda geometria de barra estatórica

A segunda geometria foi retirada de Cloutier-Rioux *et al.* (2019) cujas dimensões mostradas na figura 4.2 foram medidas através de exame microscópico de uma barra estatórica de um hidrogerador com tensão nominal 13,8 kV recém-fabricado. Nesta dissertação, essa geometria será utilizada para simular dinamicamente o processo de DPs no interior de uma cavidade dentro da isolação principal da barra.

Uma característica muito importante relacionada ao modelo dinâmico já implementado na seção 3.3 diz respeito à dimensão espacial escolhida na criação da geometria no *software* de elementos finitos. Por conta da característica cilíndrica do dielétrico e esférica da cavidade no interior, a dimensão espacial escolhida para simulação de descargas parciais é a 2D com simetria axial que utiliza coordenadas cilíndricas. Nesta dimensão espacial, um objeto com simetria rotacional é modelado como uma seção transversal rotacionada em torno do eixo vertical. Essa é uma escolha comum, de tal forma que, na prática, ela simula um modelo bidimensional e apresenta resultados de geometrias tridimensionais, diminuindo drasticamente o tempo de simulação.

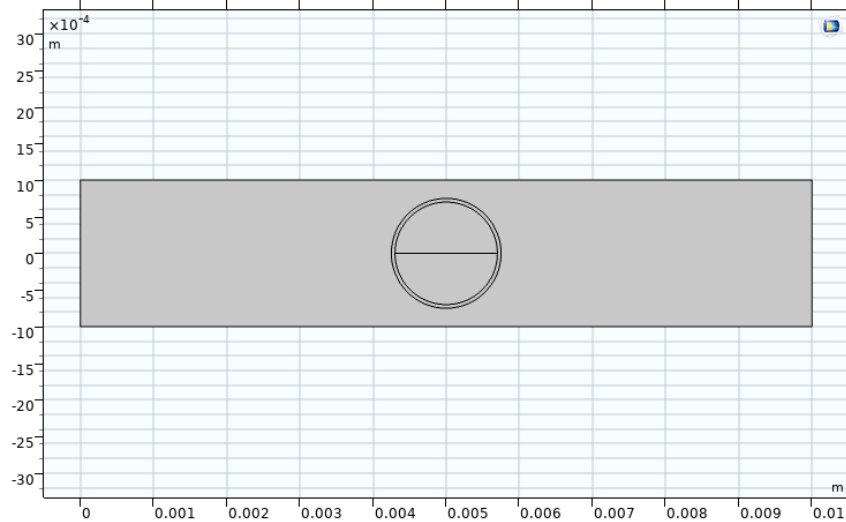
Entretanto, quando se trata de geometrias mais complexas e que não apresentam simetria rotacional, essa dimensão espacial 2D com simetria axial torna-se ineficaz. Nessas situações, em alguns trabalhos como em Ferreira (2017), a dimensão espacial 3D é utilizada para resolver o problema. No entanto, um dos objetivos desta presente dissertação é realizar a simulação dinâmica de DPs otimizando o tempo de duração e ainda assim, obter resultados precisos, principalmente porque não se tinha um processamento computacional suficiente para a simulação 3D. Dessa forma, uma adaptação do modelo original implementado na seção 3.3 foi realizada tornando possível a simulação em uma dimensão espacial 2D com coordenadas cartesianas.

4.2.1 Adaptação e implementação do modelo no plano cartesiano

De uma forma geral, ao simular o modelo implementado na seção 3.3 utilizando simetria axial, a geometria do material dielétrico assume um formato de um cilindro cuja altura é igual

a espessura do material dielétrico e_{mat} e o diâmetro é igual a d_{mat} . Além disso, a cavidade no interior do material assume o formato de uma esfera cujo diâmetro é igual a d_{cav} . Por outro lado, ao adaptar a mesma geometria para o plano cartesiano, como mostrada na figura 4.12, a simulação realizada no COMSOL *Multiphysics*® transforma o material dielétrico para um formato de um paralelepípedo e a cavidade muda de um formato esférico para um formato cilíndrico.

Figura 4.12-Geometria montada com dimensão espacial 2D no plano cartesiano

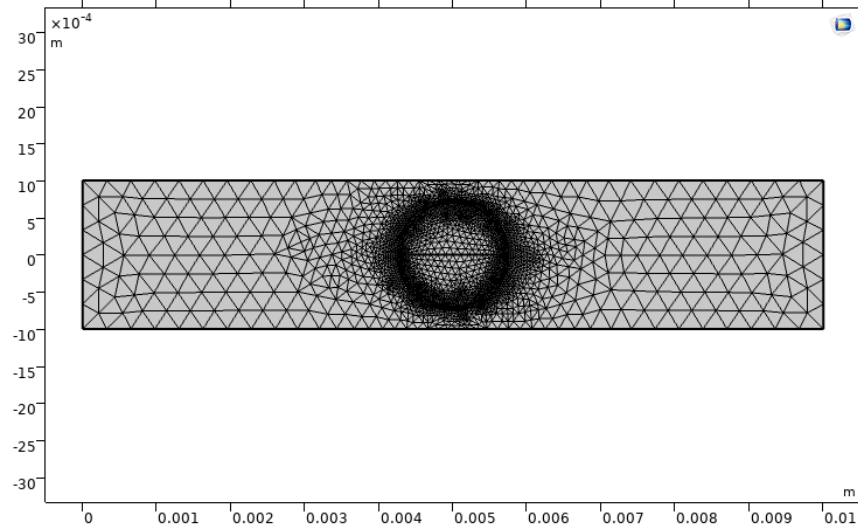


Fonte: Do autor

Dessa forma, o ponto mais importante ao realizar a adaptação é referente ao eixo z perpendicular ao plano. Em uma simulação 2D com plano cartesiano, o COMSOL *Multiphysics*® desconsidera que as dimensões no eixo z sejam importantes e define todas como tendo valores unitários. Entretanto, para superar esse problema, uma variável de profundidade é criada para definir principalmente o tamanho da cavidade que será de extrema importância para calcular as cargas real e aparente na simulação dinâmica de DPs.

Para esta simulação, os parâmetros utilizados são exatamente os mesmos mostrados na tabela 3.2 e a malha de elementos criada é mostrada na figura 4.13.

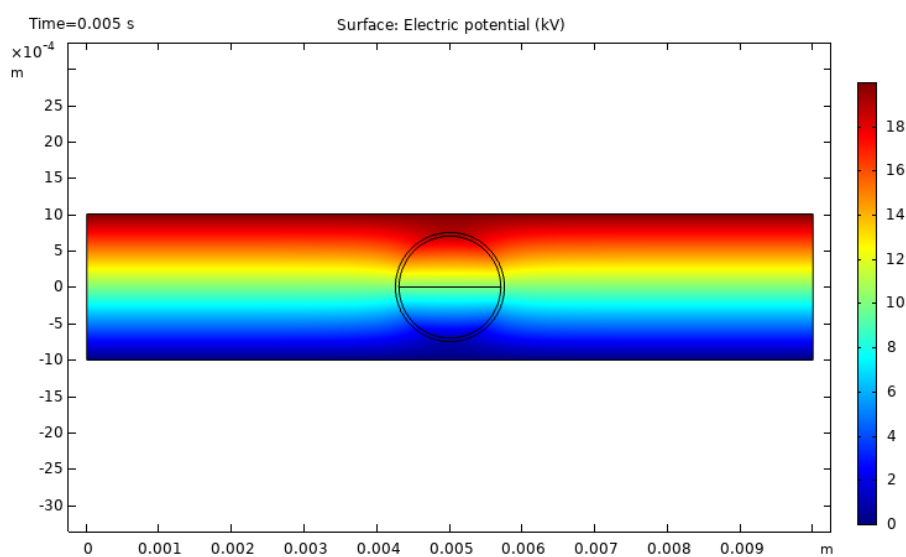
Figura 4.13-Malha de elementos criada



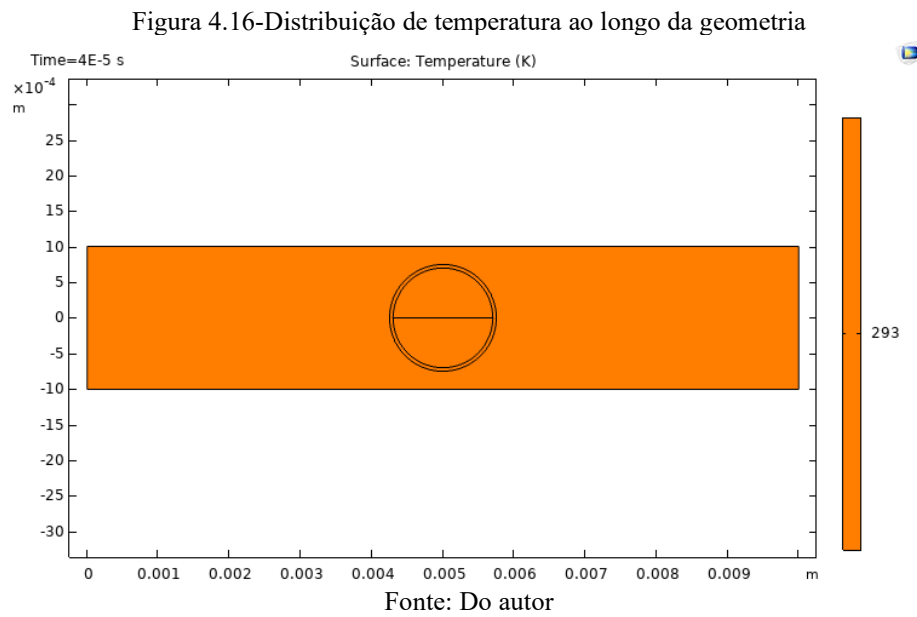
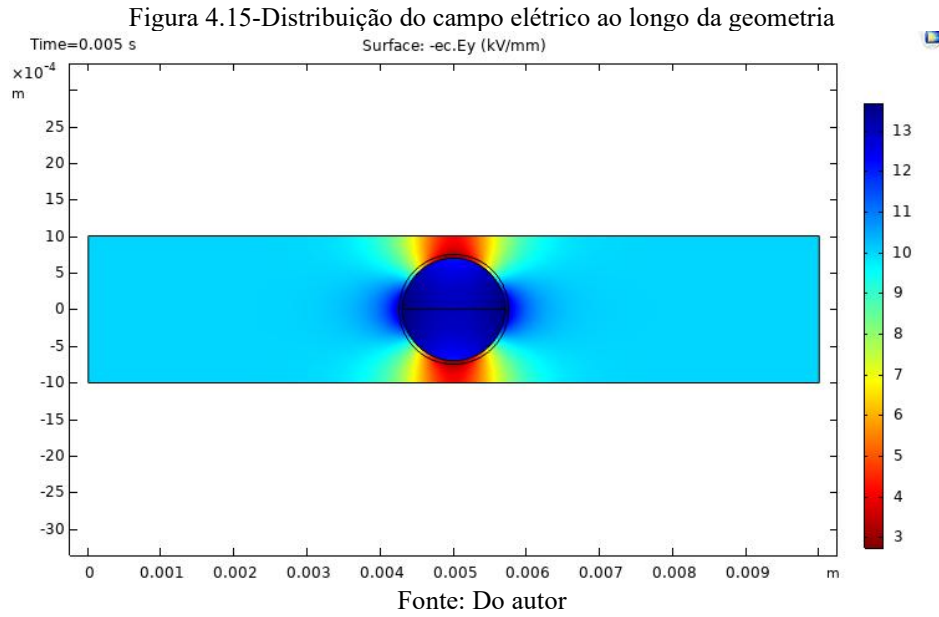
Fonte: Do autor

Antes de iniciar a simulação principal do modelo, assim como na seção 3.3, os dois gráficos bidimensionais de distribuição de tensão e de campo elétrico ao longo da geometria quando a tensão aplicada atinge o seu valor de amplitude máxima U_{amp} igual a 20 kV são exibidos nas figuras 4.14 e 4.15, respectivamente. Também é possível identificar a uniformidade do campo elétrico E_0 aplicado ao sistema de isolamento em regiões ao redor da cavidade. Além disso, também é exposto na figura 4.16, a distribuição de temperatura inicial ao longo da geometria.

Figura 4.14-Distribuição de tensão ao longo da geometria



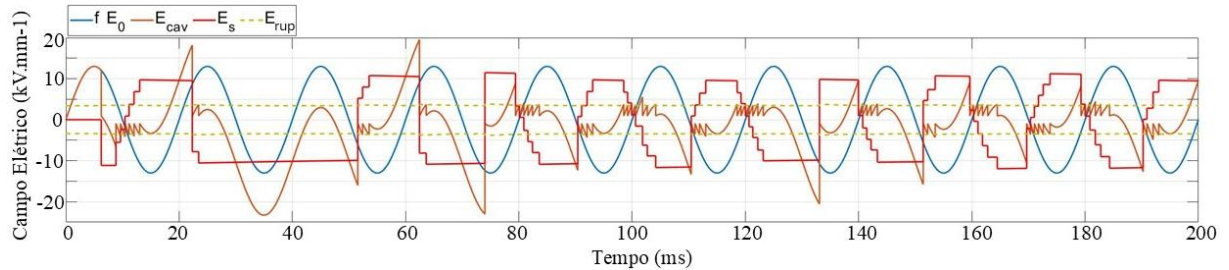
Fonte: Do autor



Novamente, a simulação principal foi executada para 10 ciclos de tensão aplicada e durou aproximadamente 8h e 30 min com o processamento computacional disponível. Na figura 4.17 são mostrados, para todos os ciclos simulados: o comportamento do campo elétrico inicial no centro da cavidade fE_0 quando não há presença de descargas parciais, o campo elétrico dinâmico no centro da cavidade E_{cav} devido a ocorrência de DPs, o campo elétrico superficial E_s que se forma após a primeira DP e campo elétrico de ruptura E_{rup} . O formato do material dielétrico, assim como a sua dimensão na direção de profundidade não causam influência na simulação, uma vez que, esta é bem maior que a cavidade. A mudança no formato da cavidade

resultou em uma variação quase imperceptível no campo elétrico no seu interior sem a presença de DPs.

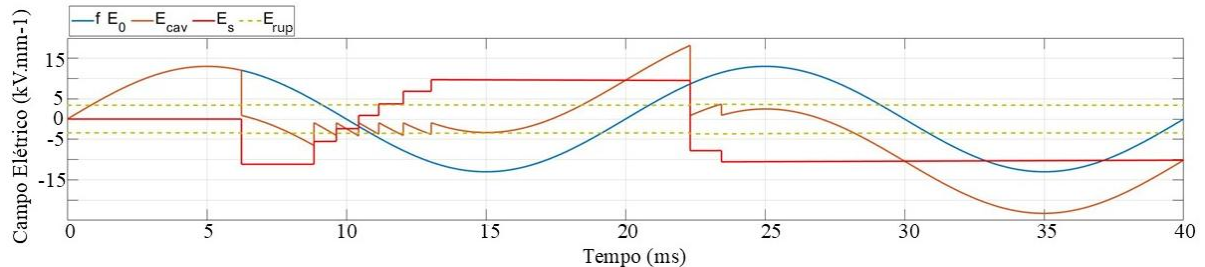
Figura 4.17- Comportamento de fE_0 , E_{cav} , E_s e E_{rup} para 10 ciclos de tensão aplicada com dimensão espacial 2D cartesiana



Fonte: Do autor

É importante ressaltar a diferença no tempo de atraso estatístico da primeira DP nessa implementação em relação à realizada na seção 3.3. Como pode ser visto na figura 4.18, a primeira DP ocorre ainda no primeiro semiciclo da tensão aplicada. Essa diferença ocorre devido a característica probabilística existente no processo de formação de uma descarga parcial que é considerada no modelo quando E_{cav} super o valor de E_{rup} .

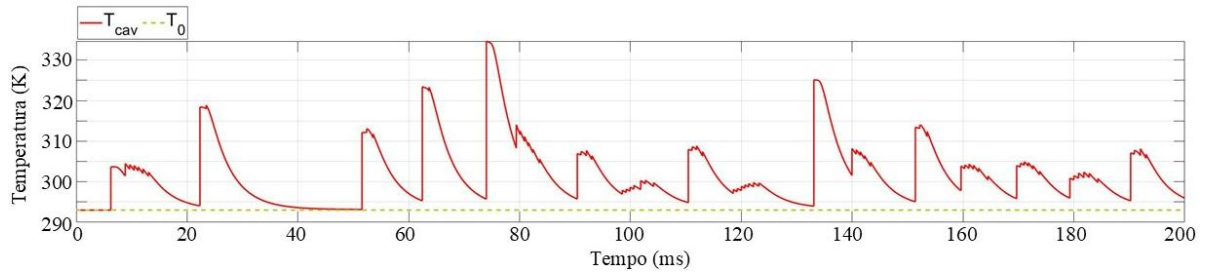
Figura 4.18-Comportamento ampliado de fE_0 , E_{cav} , E_s e E_{rup} com dimensão espacial 2D cartesiana



Fonte: Do autor

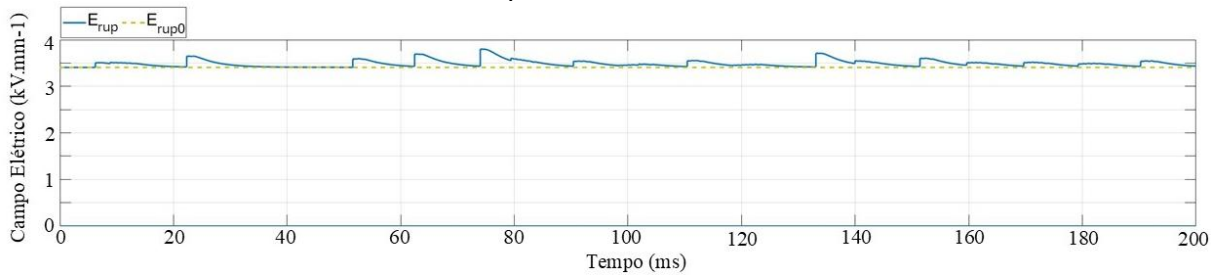
As figuras 4.19 e 4.20 mostram, respectivamente, os gráficos do comportamento da temperatura T_{cav} no interior da cavidade e do campo elétrico de ruptura E_{rup} durante a simulação dinâmica do processo de DPs.

Figura 4.19-Comportamento da temperatura para 10 ciclos de tensão aplicada com dimensão espacial 2D cartesiana



Fonte: Do autor

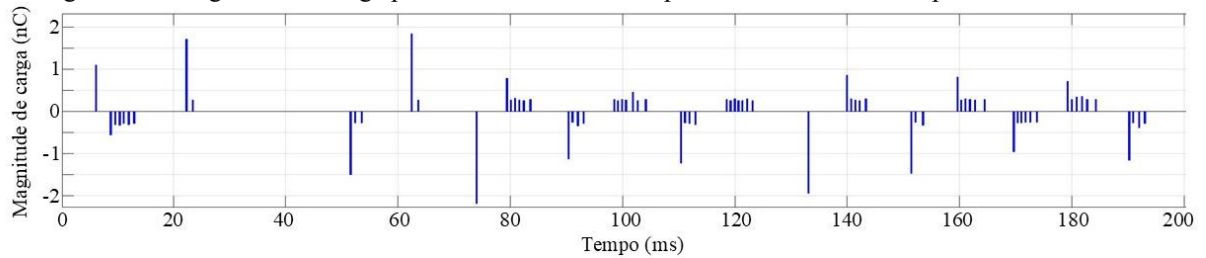
Figura 4.20- Comportamento do campo elétrico de ruptura para 10 ciclos de tensão aplicada com dimensão espacial 2D cartesiana



Fonte: Do autor

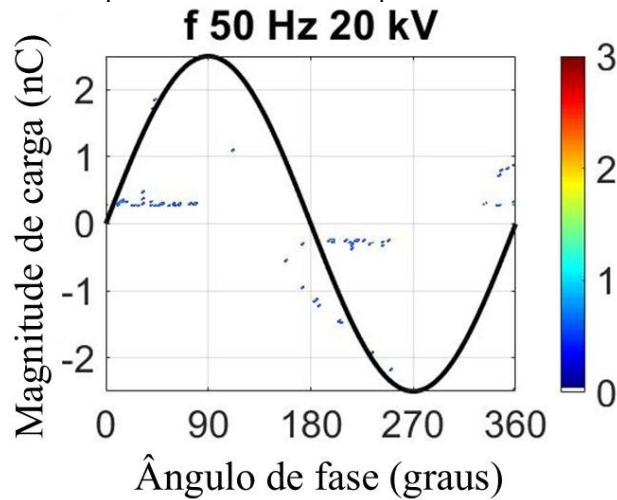
O gráfico de magnitude de carga é exibido na figura 4.21 e, comparando com a primeira implementação com simetria axial, é possível identificar uma leve redução na intensidade das descargas por conta da mudança na dimensão espacial utilizada para a geometria. Por outro lado, quando o gráfico PRPD 2D na figura 4.22 é analisado, nota-se que a simetria nos semiciclos de tensão é mantida.

Figura 4.21-Magnitude de carga para 10 ciclos de tensão aplicada com dimensão espacial 2D cartesiana



Fonte: Do autor

Figura 4.22-Gráfico PRPD 2D para 10 ciclos de tensão aplicada com dimensão espacial 2D cartesiana



Fonte: Do autor

A tabela 4.4 mostra uma comparação entre os resultados de carga apresentados nas duas implementações realizadas para este trabalho e os resultados das medições mostradas em Illias (2011). Como os três resultados não apresentam grandes variações entre si, foi considerado que a adaptação realizada no modelo foi bem-sucedida e este pode ser utilizado para implementar a simulação dinâmica de DPs em uma barra estática.

Tabela 4.4-Comparação entre os resultados simulados e os resultados das medições

	Resultados da simulação 2D em coordenadas cartesianas	Resultados da simulação 2D com simetria axial	Resultados das medições
Número de DPs por ciclo	7,4	7,5	7,3
Carga total por ciclo (pC)	3665	3857	3940
Magnitude de carga média (pC)	495	514	536
Magnitude de carga máxima (pC)	2180	2269	2250
Magnitude de carga mínima (pC)	260	271	263

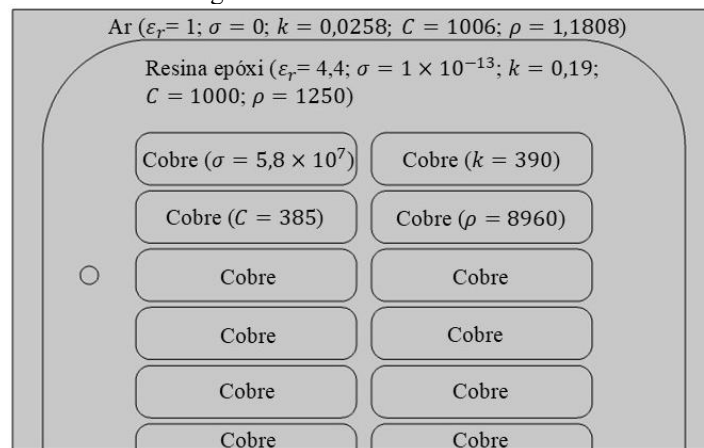
Fonte: Do autor

4.2.2 Adaptação do modelo dinâmico de DPs na segunda geometria de barra estática

Como esse estudo se trata de uma simulação dinâmica do processo de DPs, novamente foram utilizadas as interfaces físicas *Electric Currents* e *Heat Transfer in Solids* e o estudo

escolhido foi o *Time Dependent* no COMSOL *Multiphysics*®. Para implementar a simulação na segunda geometria de barra estática, inicialmente foram definidos os materiais para cada subdomínio e seus respectivos parâmetros iniciais e essas informações podem ser vistas na figura 4.23. Os valores dos parâmetros utilizados para cada material são encontrados na literatura. Além disso, na mesma figura também é mostrada a posição da cavidade que será estudada.

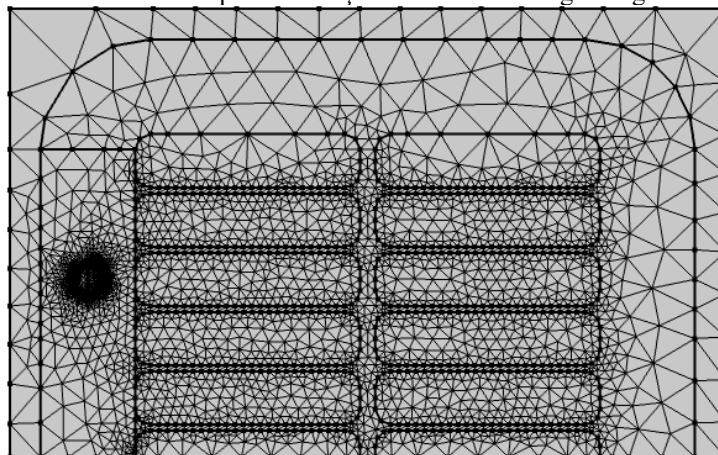
Figura 4.23-Parâmetros iniciais dos materiais e posição da cavidade para simulação do modelo da segunda geometria de barra estática



Fonte: Do autor

As condições de contorno de potencial elétrico e aterramento para essa simulação foram definidas de forma semelhante às apresentadas para o estudo com a primeira geometria de barra estática na seção 4.1.1. Além disso, a malha de elementos foi criada de acordo com a figura 4.24, com uma variação no tamanho dos elementos ao longo da geometria para se obter um equilíbrio entre a precisão dos resultados e o tempo de simulação.

Figura 4.24-Malha de elementos criada para simulação do modelo da segunda geometria de barra estática



Fonte: Do autor

A metodologia para a adaptação da simulação dinâmica de DPs para a barra estatórica foi a seguinte: primeiramente, levou-se em consideração o processo de implementação do modelo original apresentado em Illias (2011) e mostrado na seção 3.3 desta dissertação. A partir disso, as alterações foram realizadas em etapas e os ajustes em parâmetros foram feitos quando necessários. Dessa forma, os parâmetros que tiveram alterações nos seus valores estão apresentados na tabela 4.5.

Tabela 4.5-Parâmetros que tiveram ajustes nos valores para simulação dinâmica de DPs com a segunda geometria de barra estatórica

Parâmetro	Símbolo	Valor	Unidade
Amplitude da tensão aplicada	U_{amp}	11,267	kV
Frequência da tensão aplicada	f	60	Hz
Diâmetro da cavidade	d_{cav}	1	mm
Passo de tempo da simulação sem DP	Δt_0	$1/500f$	s
Máxima condutividade da superfície	σ_{smax}	5×10^{-13}	S/m
Campo elétrico de ruptura inicial	E_{rup0}	3,68	kV/mm
Campo elétrico de extinção inicial	E_{ext0}	0,96	kV/mm
Taxa de geração inicial de elétrons por emissão superficial	N_{es0A}	16000	1/s
	N_{es0B}	8000	1/s
Taxa de geração de elétrons volumétrica	N_{ev}	23,62	1/s

Fonte: Do autor

O potencial elétrico aplicado ao sistema irá variar de acordo com a expressão $V = U_{amp} \cdot \text{sen}(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t)$, onde a amplitude máxima da tensão aplicada U_{amp} foi definida com o valor igual a 11,267 kV pois a barra estatórica modelada pertence a um gerador elétrico com tensão nominal de 13,8 kV. A frequência da tensão aplicada também foi alterada para 60 Hz. Além disso, optou-se por definir o diâmetro da cavidade d_{cav} com o valor de 1 mm pois essa dimensão de cavidade esférica se aproxima bastante da maior cavidade encontrada através da examinação microscópica em Cloutier-Rioux *et al.* (2019).

Como o passo de tempo de simulação sem DP Δt_0 foi definido inicialmente como $1/500f$, para uma frequência igual a 60 Hz, Δt_0 é igual a 0,033 ms. O valor do passo de tempo com DP Δt_1 não sofreu alteração.

O parâmetro de máxima condutividade da superfície σ_{smax} teve seu valor definido com base na análise das informações apresentadas em Illias (2011) e precisou ser bem reduzido

devido as mudanças na geometria, na amplitude e frequência da tensão aplicada e, principalmente, no diâmetro da cavidade pois uma cavidade menor sofre menos decaimento de cargas na superfície após a primeira DP.

O valor do campo elétrico de ruptura inicial E_{rup0} sofreu alteração devido a mudança no tamanho da cavidade e foi definido a partir da equação (2.3) com a mesma metodologia já explicada na seção 4.1.1. Além disso, o campo elétrico de extinção inicial E_{ext0} foi considerado como sendo proporcional a E_{rup0} , com base em Khan *et al.* (2020).

Os parâmetros de taxa de geração inicial de elétrons por emissão superficial N_{es0A} e N_{es0B} foram aumentados com base nas informações apresentadas em Illias (2011) e a taxa de geração de elétrons volumétrica N_{ev} foi definida a partir da equação (2.4) que, para uma cavidade preenchida por ar, assume a forma apresentada na equação (4.1). Onde, p é a pressão no interior da cavidade, d_{cav} é o diâmetro da cavidade, U_{amp} é a amplitude da tensão aplicada e U_{rup} é a tensão de ruptura, ou seja, a tensão aplicada ao sistema quando o campo elétrico na cavidade atinge o valor do campo elétrico de ruptura (Illias *et al.*, 2012).

$$N_{ev} = 20p\pi \left(\frac{d_{cav}}{2} \right)^3 \left(1 - \left(\frac{U_{rup}}{U_{amp}} \right)^2 \right) \quad (4.1)$$

Após as alterações necessárias serem realizadas nos valores dos parâmetros principais, considerou-se que a simulação dinâmica do modelo de DPs para a barra estatórica estava pronta para ser executada.

4.2.3 Resultados

A figura 4.25 mostra a distribuição da tensão na geometria modelada com a cavidade no interior da isolação principal da barra estatórica. Adicionalmente, a figura 4.26 exibe a distribuição do campo elétrico normalizado ao longo da geometria quando o valor da tensão atinge a sua amplitude máxima, é possível notar uma certa uniformidade do campo em grande parte da isolação principal com um valor de aproximadamente 3,63 kV/mm. Além disso, a figura 4.27 mostra essa distribuição ampliada na cavidade. Quando a tensão atinge o valor máximo igual a 11,267 kV, o campo elétrico no interior da cavidade assume um valor de

aproximadamente 5,5 kV/mm. Como a temperatura inicial do material não foi alterada, a distribuição de temperatura ao longo da geometria continua sendo uniforme com valor igual a 293 K ou aproximadamente 20°C, como é exibido na figura 4.28.

Figura 4.25-Distribuição de tensão elétrica ao longo da geometria da barra estatórica com cavidade

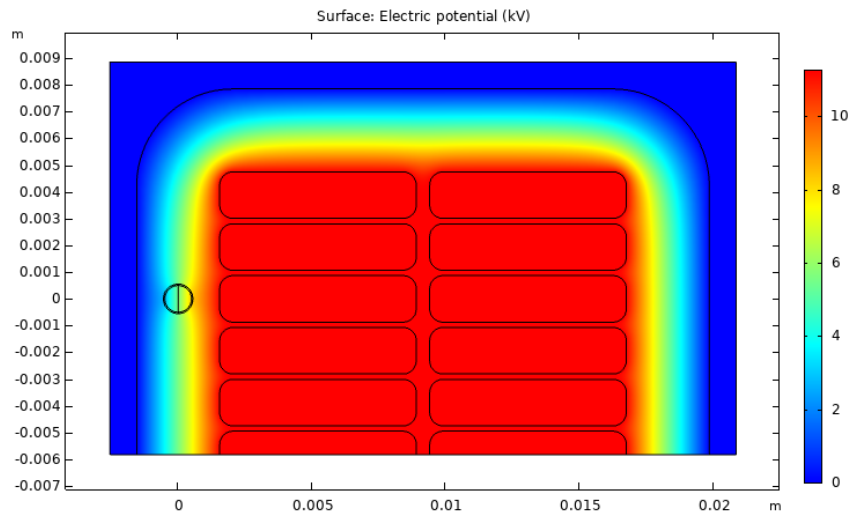


Figura 4.26-Distribuição de campo elétrico ao longo da geometria da barra estatórica com cavidade

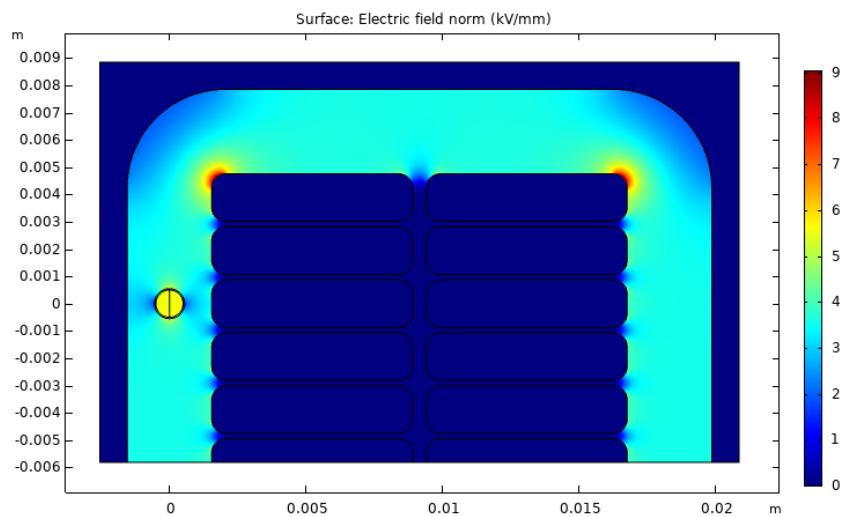


Figura 4.27-Distribuição de campo elétrico ao longo da geometria da barra estatórica com ampliação na cavidade

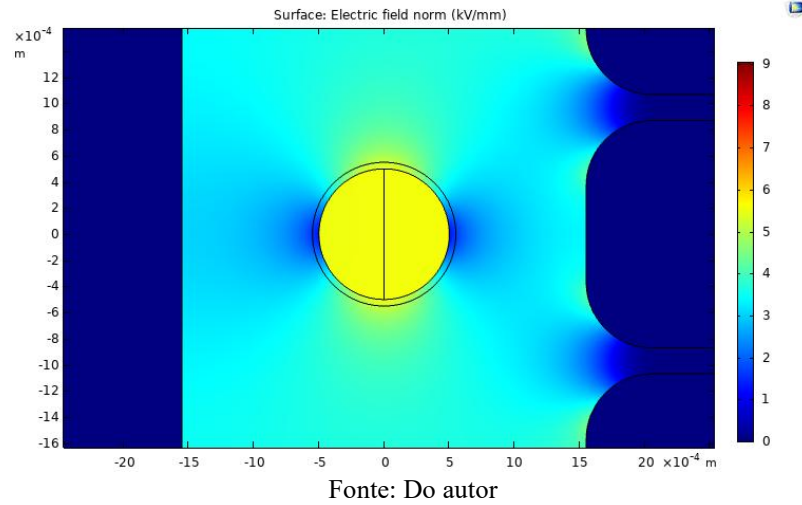
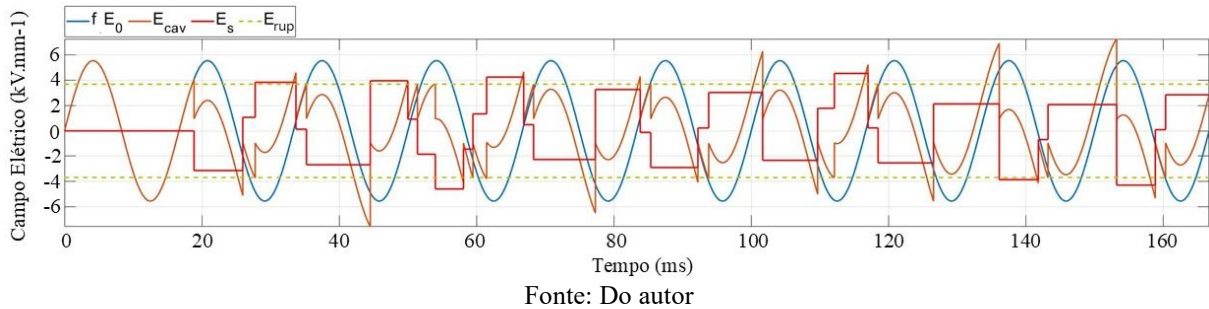


Figura 4.28- Distribuição de temperatura ao longo da geometria de barra estatórica com cavidade



A simulação principal foi executada para 10 ciclos de tensão aplicada e durou aproximadamente 7h com o processamento computacional disponível. Na figura 4.29 são apresentados, para todos os ciclos simulados: o comportamento do campo elétrico inicial no centro da cavidade fE_0 quando não há presença de descargas parciais, o campo elétrico dinâmico no centro da cavidade E_{cav} devido a ocorrência de DPs, o campo elétrico superficial E_s que se forma após a primeira DP e campo elétrico de ruptura E_{rup} .

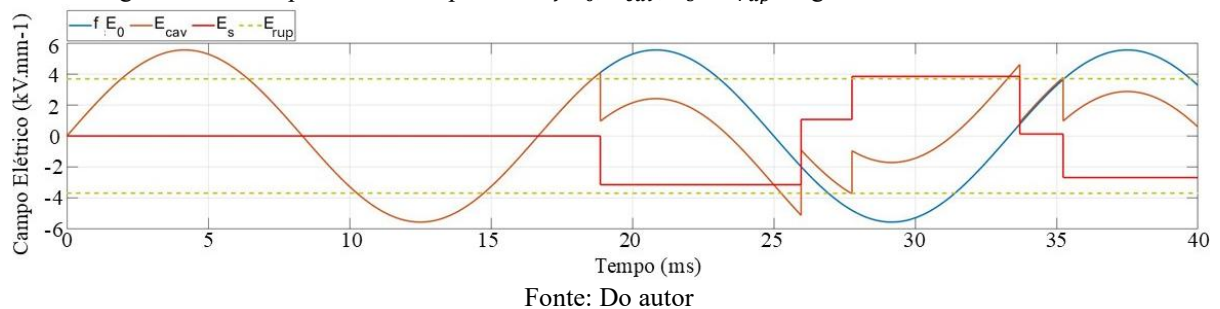
Figura 4.29- Comportamento de fE_0 , E_{cav} , E_s e E_{rup} para 10 ciclos de tensão aplicada na geometria de barra estatórica



Nota-se que, nesta simulação, a primeira DP ocorre somente no início do segundo ciclo de tensão aplicada. Apesar do tempo de atraso estatístico ser probabilístico, como o volume da cavidade e a amplitude da tensão aplicada foram reduzidos isso resulta em uma maior dificuldade na ionização volumétrica do elétron livre que iniciará a primeira DP. Dessa forma, o tempo de atraso estatístico é influenciado.

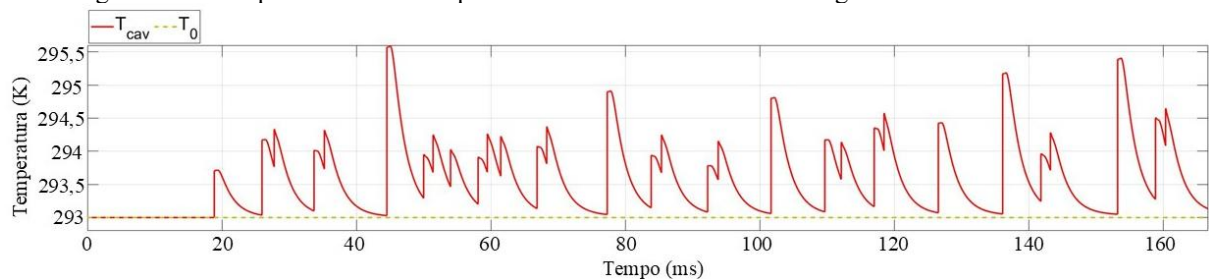
A figura 4.30 exibe uma ampliação do mesmo gráfico de campo elétrico acima. Ressalta-se que o decaimento de cargas na superfície da cavidade apesar de existente é quase imperceptível no gráfico de E_s .

Figura 4.30- Comportamento ampliado de fE_0 , E_{cav} , E_s e E_{rup} na geometria de barra estatórica



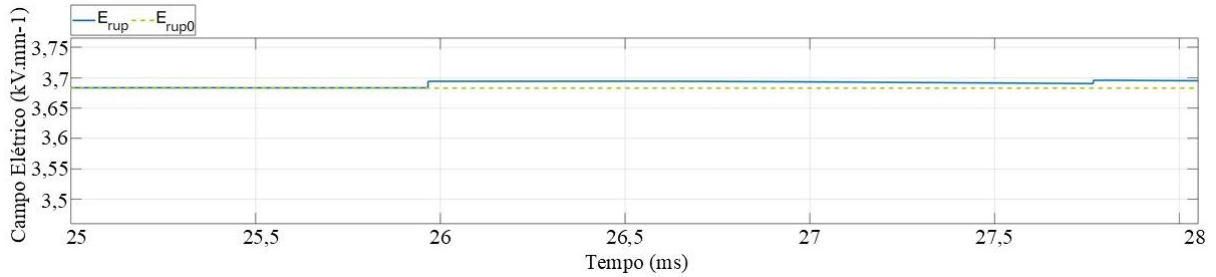
Pela figura 4.31, nota-se que as DPs causam uma variação de temperatura T_{cav} bem pequena no interior da cavidade e consequentemente, isso resulta em uma variação de campo elétrico de ruptura E_{rup} quase imperceptível que é mostrado na figura 4.32.

Figura 4.31-Comportamento da temperatura no interior da cavidade na geometria de barra estatórica



Fonte: Do autor

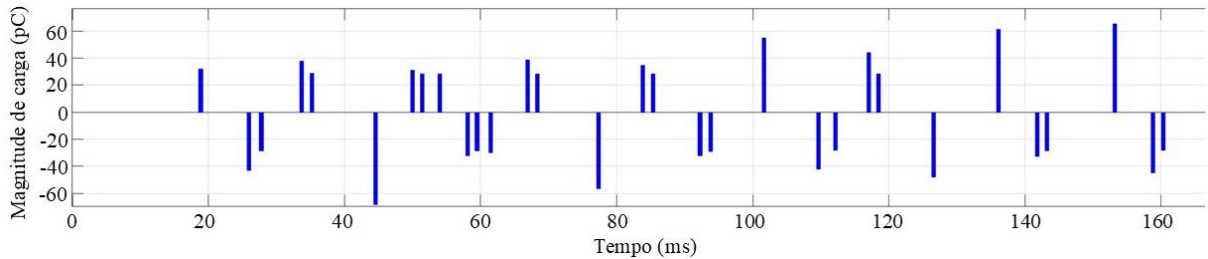
Figura 4.32-Comportamento do campo elétrico de ruptura na geometria de barra estatórica



Fonte: Do autor

A figura 4.33 mostra o gráfico de magnitude de carga nos 10 ciclos de tensão aplicada simulados. Para a barra estatórica modelada com uma cavidade de diâmetro igual a 1 mm no interior da isolação principal, a magnitude média total de carga foi de 37,7 pC.

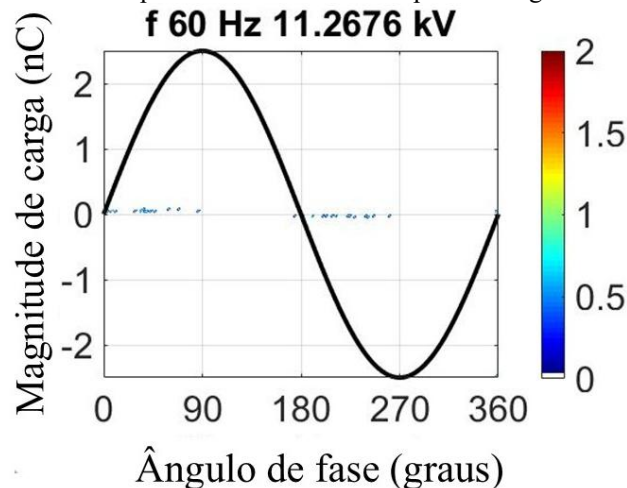
Figura 4.33- Magnitude de carga para 10 ciclos de tensão aplicada na geometria de barra estatórica



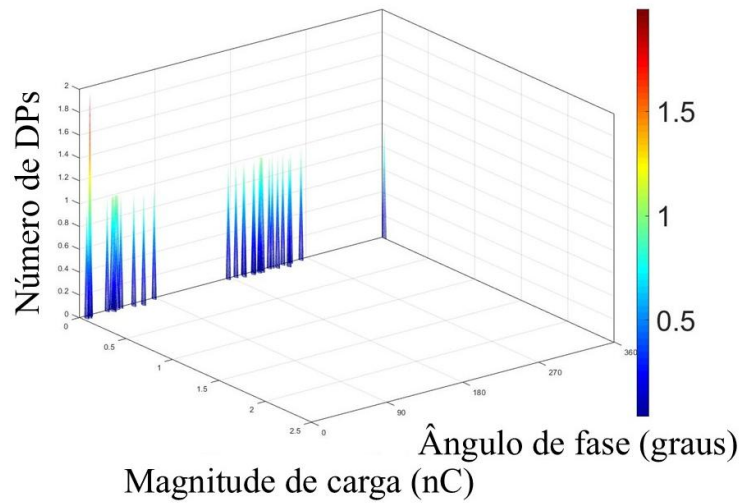
Fonte: Do autor

As figuras 4.34 e 4.35 mostram, respectivamente, os gráficos PRPD 2D e PRPD $\phi-q-n$ criados pelo MATLAB® para esta simulação onde é possível ver que a diferença entre os maiores e menores valores de magnitude de carga é bem pequena. Além disso, a simetria entre os semiciclos de tensão pode ser observada. Os dados de carga para a simulação também são expostos na tabela 4.6.

Figura 4.34- Gráfico PRPD 2D para 10 ciclos de tensão aplicada na geometria de barra estatórica



Fonte: Do autor

Figura 4.35- Gráfico PRPD $\phi-q-n$ para 10 ciclos de tensão aplicada na geometria de barra estatórica

Fonte: Do autor

Tabela 4.6-Dados de carga para simulação de 10 ciclos de tensão aplicada na geometria de barra estatórica

	Resultados da simulação
Número de DPs por ciclo	3,1
Carga total por ciclo (pC)	117,1
Magnitude de carga média (pC)	37,77
Magnitude de carga máxima (pC)	68
Magnitude de carga mínima (pC)	28,18

Fonte: Do autor

Os resultados da simulação dinâmica de descargas parciais em uma barra estatórica apresentados foram possíveis através da adaptação de um modelo já existente e validado na literatura. Esta adaptação foi feita baseada em resultados experimentais, além de conceitos e equações resultantes do estudo do processo físico e modelagem de DPs, que foram utilizados para se obter a maior precisão possível.

É importante lembrar que os níveis de magnitude de carga encontrados através da simulação são resultantes do processo de descarga parcial em apenas uma única cavidade na isolamento da barra estatórica. Entretanto, como é mostrado em Cloutier-Rioux *et al.* (2019), uma barra recém-fabricada pode conter dezenas de cavidades, aumentando consideravelmente a intensidade de carga medida. Além disso, sabe-se que atividades de descargas parciais no interior da isolamento sólida de geradores podem ser toleradas por toda a expectativa de vida do equipamento, dependendo da magnitude (Turgeon *et al.*, 2011). Entretanto, estabelecer quais

são esses limites de maneira geral é algo difícil, uma vez que a técnica de medição utilizada, por si só, já acarreta mudanças significativas nos valores medidos (IEC 60034-27-2, 2012).

Dessa forma, em termos de simulação, a metodologia determinística utilizada para o estudo com a primeira geometria de barra estatórica na seção 4.1.1 apresenta uma melhor abordagem para avaliação da criticidade da cavidade. Todavia, os níveis de carga encontrados já podem ser considerados preocupantes uma vez que a existência de descargas parciais na cavidade gera processos químicos que, com o passar do tempo, causarão uma deterioração na isolação, fazendo com que o monitoramento *on-line* de descargas seja imprescindível para o bom funcionamento do equipamento a longo prazo (Illias, 2011; Pattanadech *et al.*, 2023).

4.3 Considerações finais

Este capítulo apresentou dois estudos sobre descargas parciais em barras estatóricas de geradores elétricos através de simulações computacionais. Para isso, duas geometrias de barras estatóricas foram criadas no *software* de elementos finitos. O primeiro estudo teve como objetivo realizar uma avaliação de criticidade de cavidades existentes na isolação principal da barra, levando em consideração a posição destas. Por outro lado, no segundo estudo, foi realizada a implementação do modelo dinâmico de descargas parciais para a geometria em questão. Para otimizar o tempo de simulação, algumas alterações foram realizadas e, por fim, o modelo foi executado.

5 CONCLUSÃO

5.1 Considerações finais

Este trabalho teve como temática principal o fenômeno de descargas parciais em uma barra estatórica pertencente a um gerador elétrico. O estudo do comportamento físico por trás do fenômeno de descargas parciais possibilita a criação de modelos que auxiliam ainda mais o entendimento do processo. Desta forma, este conhecimento foi utilizado para, através do *software* de Método de Elementos Finitos, modelar a geometria de barra estatórica com uma cavidade esférica presente no interior da isolação principal e realizar dois estudos no que diz respeito as descargas parciais.

Primeiramente, com o objetivo de avaliar o tamanho crítico de uma cavidade esférica no interior da isolação principal da barra estatórica, utilizou-se o COMSOL *Multiphysics*® e uma metodologia foi executada para definir a criticidade em quatro posições de cavidade diferentes. Para isso, o campo elétrico de ruptura foi utilizado como referência, visto que este é a primeira condição para que uma descarga parcial ocorra. Além disso, resultados experimentais também foram utilizados para aumentar a precisão do estudo. Dessa forma, definiu-se através da simulação o tamanho crítico de cavidade no qual a probabilidade de ocorrência de descargas parciais torna-se existente. Além disso, mostrou-se que a posição da cavidade exerce uma grande influência na criticidade e que ao aumentar a temperatura inicial do objeto de teste, o diâmetro da cavidade crítica também aumenta.

Um segundo estudo de descargas parciais foi realizado em uma geometria de barra estatórica agora relacionado com a simulação dinâmica de descargas parciais em uma cavidade no interior da isolação principal. Para esta implementação, uma adaptação na dimensão espacial do modelo original de simulação dinâmica foi realizada com o objetivo de otimizar o tempo de simulação e ainda manter a precisão dos resultados. Após esta etapa, o modelo dinâmico foi implementado na geometria de barra estatórica e mostrou-se que em uma cavidade de 1 mm de diâmetro, encontrada em uma barra estatórica recém-fabricada, os níveis de carga são consideráveis, o que aumenta ainda mais a importância do monitoramento de descargas parciais.

Todos os resultados de simulação expostos nessa dissertação foram alcançados sempre buscando a maior precisão possível. Para isso, utilizou-se do conhecimento existente sobre a

física de descargas parciais juntamente com resultados de diversos trabalhos publicados na literatura sobre modelagem com método de elementos finitos. Além disso, resultados experimentais também foram utilizados para alcançar resultados ainda mais próximos da realidade.

5.2 Trabalhos futuros

Neste trabalho, apenas cavidades esféricas foram estudadas. Apesar da aproximação desse formato ser válida, seria interessante para trabalhos futuros, estudos avaliando a criticidade para cavidades e delaminações de outros formatos. Assim como, também avaliar a criticidade em um cenário com um estresse maior e não improvável de acontecer, considerando níveis de 10% a 20% de sobretensão.

No que diz respeito a simulação dinâmica de descargas parciais, ainda há alguns parâmetros que somente são definidos através de ensaios experimentais, o que dificulta o processo de adaptação e implementação. Os dados experimentais já existentes na literatura ajudam, entretanto, ainda são poucos. Dessa forma, em trabalhos futuros seria interessante a execução de um conjunto maior de ensaios com mais variedades de informações.

Também seria importante a realização de ensaios em amostras retiradas da própria barra estatórica, para avaliação de descargas parciais e posteriormente a simulação de um modelo mais robusto levando em consideração não somente a quantidade e tamanhos variados das cavidades, mas também a posição em que elas se encontram.

REFERÊNCIAS

ABNT NBR IEC 60270. **Técnicas de ensaios elétricos de alta-tensão – Medição de descargas parciais**. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

ACHILLIDES, Zenon; GEORGHIOU, George; KYRIAKIDES, Elias. Partial Discharges and Associated Transients: The Induced Charge Concept versus Capacitive Modeling. **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**, v.15, n.6, p. 1507-1516, 2008.

AFROUZI, Hadi. *et al.* In-depth exploration of partial discharge modelling methods within insulations. **ScienceDirect**. v. 6, p. 1-13, jan. 2022.

ALMEHDHAR, Awad; PROCHAZKA, Radek. Innovative Approaches in Partial Discharge Modeling: Leveraging COMSOL and MATLAB for Predictive Analysis. *In: International Conference on Diagnostics in Electrical Engineering (Diagnostika), 2024, [online]. Anais eletrônicos [...]. [online], 2024. p. 1-7.*

ASSERI, Muhamad; RAHIMAN, Mohd; MAJID, Mohd. Partial Discharge Monitoring and Analysis using Phase Resolve Partial Discharge Pattern. *In: IEEE 10th Conference on Systems, Process & Control (ICSPC), 2022, Melaka. Anais 10th Conference on Systems, Process & Control. Melaka: IEEE, dez. 2022. p. 231-235.*

BAILEY, C. A Study of Internal Discharges in Cable Insulation. **IEEE Transactions on Electrical Insulation**, v. EI-2, n. 3, p. 155-159, 1967.

BOGGS, S.; FORD, G.; MADGE, R. Coupling Devices for the Detection of Partial Discharges in Gas-Insulated Switchgear. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, v. PAS-100, n. 8, p. 3969-3973, 1981.

BORGHEI, Moein *et al.* A Finite Element Analysis Model for Internal Partial Discharges in an Air-Filled, Cylindrical Cavity inside Solid Dielectric. *In: Electrical Insulation Conference (EIC), 2021, Virtual Event. Anais eletrônicos [...]. [online], 2021. v.7, p. 260-263.*

COMSOL. **COMSOL Multiphysics: Reference Manual**. Burlington: COMSOL, 2019.

COMSOL. **LiveLink™ for MATLAB®: User's Guide**. Burlington: COMSOL, 2018.

CLOUTIER – RIOUX, E. *et al.* Calculation of the Electric Field Inside Cavities Found Through Stator Bar Dissection. *In: Electrical Insulation Conference (EIC), 2019, Calgary. Anais eletrônicos. Calgary: IEE, 2019. p. 129-132.*

CRUZ, Jonathan *et al.* Partial Discharges Monitoring for Electric Machines Diagnosis: A Review. **Energies**. Basel, v. 15, n. 7966, p. 1-31, 2022.

DU, Yan. Influence of Gas Flow on Partial Discharge Behaviors in Air and Nitrogen. **IEEE TRANSACTIONS ON PLASMA SCIENCE**, v.47, n.1, p. 136-144, jan. 2019.

ERHUNMUN, I; IKPONMWOSA, U. Review on Finite Element Method. **JASEM ISSN**, v. 21, n. 5, p. 1000-1002, ago. 2017.

FERREIRA, Rodrigo. **ESTUDO DE DESCARGAS PARCIAIS EM ISOLAMENTO DE MÁQUINAS ELÉTRICAS USANDO O MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS**. 2017. 123 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2011.

FORSSÉN, Cecilia; EDIN, Hans. Field Model of Partial Discharges at Variable Frequency of the Applied Voltage. *In: Proceedings of the Nordic Insulation Symposium, 2005, Trondheim. Anais Proceedings of the Nordic Insulation Symposium*. Trondheim: Nord-IS 05, jun. 2005. p. 121-124.

FORSSÉN, Cecilia. **Modelling of cavity partial discharges at variable applied frequency**. 2008. 84 f. Tese (Doctoral Thesis in Electrical Systems) - Electromagnetic Engineering, KTH Electrical Engineering and Computer Science, Estocolmo, SE, 2008.

HAIBA, Ahmed. *et al.* Modeling and Simulation of Partial Discharge Measurement for Defected Solid Dielectrics. **Journal of Measurement Science & Applications, JMSA**, v. 2, n.1, p. 1-11, 2011.

HAUSCHILD, Wolfgang; LEMKE, Eberhard. **High-Voltage Test and Measuring Techniques**. Heidelberg: Springer, 2014.

IEC/TS 60034-27-2. **Rotating electrical machines – Part 27-2: On-line partial discharge measurements on the stator winding insulation of rotating electrical machines**. Genebra: IEC, 2012.

IEC 60034-27-1. **Off-line partial discharge measurements on the winding insulation**. Genebra: IEC, 2017.

ILLIAS, Hazlee. **Measurement and Simulation of Partial Discharges within a Spherical Cavity in a Solid Dielectric Material**. 2011. 236 f. Tese (Doctor of Philosophy) - Faculty of Physical and Applied Science School of Electronics and Computer Science, University of Southampton, Southampton, RU, 2011.

ILLIAS, Hazlee. *et al.* Partial Discharge Simulation under Various Applied Voltage Waveforms. *In: IEEE International Conference on Power and Energy (PECon), 2012, Kota Kinabalu Sabah. Anais IEEE International Conference on Power and Energy*. Kota Kinabalu Sabah: IEEE, dez. 2012.

ILLIAS, H.; CHEN, G.; LEWIN, P. Comparison between Three-Capacitance, Analytical-based and Finite Element Analysis Partial Discharge Models in Condition Monitoring. **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**, v. 24, n. 1, p. 99-109, 2017.

KAWAKATSU, Williams. **Descargas parciais em barras estatóricas de hidrogeradores: Modelagem por guias de onda e análise de um acoplador**. 2009. 81 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Pará, Belém, PA, 2009.

KHAN, Qasim. *et al.* Partial Discharge Modeling of Internal Discharge in Electrical Machine Stator Winding. *In: IEE Kansas Power and Energy Conference, 2020, Kansas. Anais IEE Kansas Power and Energy Conference.* Kansas: IEE, 2020. p. 1-6.

KREUGER, Frederik. **Discharge Detection in High Voltage Equipment.** Londres: Heywood, 1964.

LEITE, Reinaldo. Quantificação de descargas parciais em geradores usando modelo matemático baseado na teoria de campo. **Revista Principia.** João Pessoa, n.56, p. 248-258, 2021.

LEMKE, E. A Critical Review of Partial-Discharge Models. **DEIS**, v. 28, n. 6, p. 11-16, 2012.

MAJID, Mohd. *et al.* Partial Discharge Activity Analysis in Rotating Machine using Phase Resolved Partial Discharge Pattern. *In: IEEE 4th International Conference in Power Engineering Applications (ICPEA), 2024, Batu Ferringhi/ Georgetown. Anais 4th International Conference in Power Engineering Applications.* Batu Ferringhi/ Georgetown; IEEE, mar. 2024. p. 201-204.

MULTIPHYSICS CYCLOPEDIA. **The Finite Element Method (FEM).** Comsol, 2017. Disponível em: <https://www.comsol.com/multiphysics/finite-element-method>. Acesso em: 02 mai. 2025.

NIEMEYER, L. A Generalized Approach to Partial Discharge Modeling. Niemayer. **IEEE Transactions on Electrical Insulation**, v. 2, n.4, p. 1-20, ago. 1995.

PAN, Cheng *et al.* Numerical Modeling of Partial Discharges in a Solid Dielectric-bounded Cavity: a Review. **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**, v. 26, n. 3, p.1-19, jun. 2019.

PAN, Cheng *et al.* Understanding Partial Discharge Behavior from the Memory Effect Induced by Residual Charges: A Review. **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**, v. 27, n. 6, p. 1951-1963, dez. 2020.

PATTANADECH, Norasage. *et al.* **Partial Discharges (PD) - Detection, Identification and localization.** EUA: IEE PRESS; WILEY, 2023.

PEDERSEN, A.; CRICHTON, G. C, MCALLISTER, I. W. The functional relation between partial discharges and induced charge. **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**, v. 2, n.4, p. 535-543, ago. 1995.

PEDERSEN, A.; CRICHTON, G. C, MCALLISTER, I. W. The theory and measurement of partial discharge transients. **IEEE Transactions on Electrical Insulation**, v. 20, n. 3, p. 487-497, jun. 1991.

RIBEIRO, Alander; LEITE, Reinaldo; NUNES, Marcus. Determination of Critical Cavity Size on Stator Bar Insulation System Using a Finite Element Method Model. *In: IX Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos – SBSE, 2022, Santa Maria. Anais IX Simpósio Brasileiro*

de Sistemas Elétricos. Santa Maria: Sociedade Brasileira de Automática (SBA), jul. 2022. p. 1327-1332.

SONHAJI, Ari *et al.* Effect of External Defects on Partial Discharge Characteristics of High Voltage Stator Insulation. *In: The 6th International Conference on Power Engineering and Renewable Energy, 2024, Tóquio. **Anais The 6th International Conference on Power Engineering and Renewable Energy***. Tóquio: ICPERE, 2024. p. 1-6.

STONE, G.C.; FIEEE, A.; BEHRMANN, G. A Review of the History of the Development of Partial Discharge Testing. *In: Electrical Insulation Conference (EIC), 2022, Knoxville. **Anais Electrical Insulation Conference***. Knoxville: IEEE, jun. 2022. p. 85-89.

TURGEON, A.; HUDSON, C.; NGUYEN, D.N. Critical Cavity Size Producing Internal Discharges in Stator Bar Ground Wall Insulation. *In: Electrical Insulation Conference, 2011, Annapolis, n. 5, **Anais Electrical Insulation Conference***, Annapolis: Maryland, jun. 2011. n. 5, p. 318-322.

WANG, Wenqiang; SHI, Zhen. A Finite Element Model of Partial Discharge in Solid Medium. **ECS Meeting**, v. 168, n. 151, p. 1-7, nov. 2021.

ZHANG, Yiyi. *et al.* Finite Element Model Simulation of Cavity Partial Discharge in Solid Dielectric. *In: International Conference on Electrical, Mechanical and Computer Engineering (ICEMCE), 2023, Xi'an. **Anais International Conference on Electrical, Mechanical and Computer Engineering***. Xi'an: IEEE, 2023. p. 499-503.