

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA  
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA



GUSTAVO DE OLIVEIRA MACHADO

**ANÁLISE DOS IMPACTOS DAS DISTORÇÕES HARMÔNICAS DE TENSÃO  
SOBRE A OCORRÊNCIA DE DESCARGAS PARCIAIS UTILIZANDO UM  
MODELO DE ELEMENTOS FINITOS**

UBERLÂNDIA

2022

GUSTAVO DE OLIVEIRA MACHADO

**ANÁLISE DOS IMPACTOS DAS DISTORÇÕES HARMÔNICAS DE TENSÃO  
SOBRE A OCORRÊNCIA DE DESCARGAS PARCIAIS UTILIZANDO UM  
MODELO DE ELEMENTOS FINITOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Ciências.

Área de concentração: Engenharia Elétrica.

Orientador: Dr. Luciano Coutinho Gomes.

UBERLÂNDIA

2022

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU  
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

M149 Machado, Gustavo de Oliveira, 1997-  
2022 Análise dos impactos das distorções harmônicas de  
tensão sobre a ocorrência de descargas parciais  
utilizando um modelo de elementos finitos [recurso  
eletrônico] / Gustavo de Oliveira Machado. - 2022.

Orientador: Luciano Coutinho Gomes.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de  
Uberlândia, Pós-graduação em Engenharia Elétrica.

Modo de acesso: Internet.

Disponível em: <http://doi.org/10.14393/ufu.di.2022.484>

Inclui bibliografia.

Inclui ilustrações.

1. Engenharia elétrica. I. Gomes, Luciano Coutinho,  
1972-, (Orient.). II. Universidade Federal de  
Uberlândia. Pós-graduação em Engenharia Elétrica. III.  
Título.

CDU: 621.3

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:  
Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091  
Nelson Marcos Ferreira - CRB6/3074

GUSTAVO DE OLIVEIRA MACHADO

**ANÁLISE DOS IMPACTOS DAS DISTORÇÕES HARMÔNICAS DE TENSÃO  
SOBRE A OCORRÊNCIA DE DESCARGAS PARCIAIS UTILIZANDO UM  
MODELO DE ELEMENTOS FINITOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Ciências.

Área de concentração: Engenharia Elétrica.

Uberlândia, 23 de agosto de 2022.

Banca examinadora:

---

Luciano Coutinho Gomes, Dr. (UFU) – Orientador

---

Alan Petrônio Pinheiro, Dr. (UFU)

---

Carlos Eduardo Tavares, Dr. (UFU)

---

Fernando de Souza Brasil, Dr. (ELETRONORTE)

---

Rodrigo Sousa Ferreira, Dr. (PETROBRAS)



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA**  
 Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica  
 Av. João Naves de Ávila, 2121, Bloco 3N - Bairro Santa Mônica, Uberlândia-MG, CEP 38400-902  
 Telefone: (34) 3239-4707 - www.posgrad.feelt.ufu.br - copel@ufu.br



### ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	Engenharia Elétrica				
Defesa de:	Dissertação de Mestrado, 781, PPGEELT				
Data:	vinte e três de agosto de dois mil e vinte e dois	Hora de início:	08:00	Hora de encerramento:	12:00
Matrícula do Discente:	12022EEL006				
Nome do Discente:	Gustavo de Oliveira Machado				
Título do Trabalho:	Análise dos impactos das distorções harmônicas de tensão sobre a ocorrência de descargas parciais utilizando um modelo de elementos finitos				
Área de concentração:	Sistemas de Energia				
Linha de pesquisa:	Máquinas e Aterramentos Elétricos				
Projeto de Pesquisa de vinculação:	Coordenador do projeto: Luciano Coutinho Gomes Título do projeto: Modelagem dinâmica e multifísica de descargas parciais em máquinas rotativas de grande porte Agência financiadora: Sem financiamento Número do processo na agência financiadora: Não se aplica Vigência do projeto: 01/02/2021				

Reuniu-se por meio de videoconferência, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, assim composta: Professores Doutores: Alan Petrônio Pinheiro - FEELT/UFU; Carlos Eduardo Tavares - FEELT/UFU; Fernando de Souza Brasil - ELETRONORTE; Rodrigo Sousa Ferreira - PETROBRAS; Luciano Coutinho Gomes - FEELT/UFU, orientador(a) do(a) candidato(a).

Iniciando os trabalhos o(a) presidente da mesa, Dr(a). Luciano Coutinho Gomes, apresentou a Comissão Examinadora e o candidato(a), agradeceu a presença do público, e concedeu ao Discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação do Discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

A seguir o senhor(a) presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos(às) examinadores(as), que passaram a arguir o(a) candidato(a). Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o(a) candidato(a):

Aprovado(a).

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre.

O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Luciano Coutinho Gomes, Professor(a) do Magistério Superior**, em 23/08/2022, às 11:01, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Alan Petronio Pinheiro, Professor(a) do Magistério Superior**, em 23/08/2022, às 11:03, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Carlos Eduardo Tavares, Professor(a) do Magistério Superior**, em 23/08/2022, às 11:03, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Rodrigo Sousa Ferreira, Usuário Externo**, em 23/08/2022, às 11:03, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Fernando de Souza Brasil, Usuário Externo**, em 25/08/2022, às 17:06, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://www.sei.ufu.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **3809875** e o código CRC **C204B51B**.

*Dedico este trabalho ao meu irmão Lucas, a  
pessoa mais bondosa que já conheci.*

## AGRADECIMENTOS

Ao professor Dr. Luciano Coutinho Gomes, pela confiança depositada em mim, pela orientação, pelo constante incentivo, por todos os conhecimentos transmitidos desde a graduação e por estar sempre disposto a me ajudar nos momentos difíceis.

Aos meus pais José e Sueli, pela educação exemplar que recebi, por estarem sempre presentes em minha vida, pelo suporte incondicional às minhas escolhas e por me proporcionarem todas as condições necessárias para que eu chegasse até aqui.

Ao meu irmão Lucas, pela convivência diária, pelas conversas interessantes, por sempre sanar minhas dúvidas de inglês e por cuidar de mim com muita afeição enquanto estive doente.

À minha namorada Yasmim, pelo amor e carinho, por ser uma grande companheira e me tornar uma pessoa mais alegre, por sempre me motivar, pela paciência em me ouvir diariamente e por compreender o tempo que precisei dedicar para realização deste trabalho.

A todos os meus familiares e amigos, pelos conselhos e momentos de diversão.

A todos os companheiros do Laboratório de Acionamentos Elétricos (LAcE), pelo conhecimento compartilhado.

À Universidade Federal de Uberlândia (UFU), por fornecer suporte e espaço físico para o desenvolvimento da pesquisa.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo apoio financeiro recebido durante a execução deste trabalho.

*“O aprendido é aquilo que fica depois que o esquecimento fez o seu trabalho.”*

Rubem Alves

## RESUMO

O monitoramento de descargas parciais (DPs) é uma das principais técnicas aplicadas mundialmente para avaliar as condições do isolamento de equipamentos elétricos alimentados por média e alta tensão. A ocorrência de DPs está normalmente relacionada ao aparecimento de defeitos no sistema de isolamento que, com o passar do tempo, podem comprometer a integridade do material dielétrico empregado, aumentando a probabilidade de ruptura completa. Os testes de laboratório para medição e avaliação de DPs são geralmente realizados com a aplicação de tensões alternadas puramente senoidais. No entanto, devido às adversidades da rede elétrica, é muito comum que os equipamentos elétricos em algum momento sejam operados com tensões distorcidas por componentes harmônicas. Neste contexto, este trabalho tem como objetivo analisar os impactos das distorções harmônicas de tensão sobre a ocorrência de DPs. Para isso, foi implementado um modelo dinâmico para simulação de DPs com base na aplicação do método dos elementos finitos (MEF). Com este modelo, diversas simulações foram realizadas aplicando-se tensões distorcidas compostas por diferentes frequências harmônicas, vários níveis de distorção, ângulos de fase distintos, entre outras combinações. Os resultados extraídos das simulações revelaram que as distorções harmônicas podem causar variações no número de DPs geradas, bem como nos valores médios de suas cargas. Também foram observadas deformações nos padrões de DPs associadas à fase da tensão de alimentação (PRPD – do inglês). Além disso, a evolução temporal das DPs se mostrou altamente dependente das características de cada forma de onda analisada, tais como pontos de inflexão e valores de pico. Em geral, para níveis de distorção harmônica mais elevados, os efeitos sobre as atividades das DPs foram mais significativos. Na prática, alguns destes efeitos podem contribuir com a degradação do material dielétrico e prejudicar a interpretação de padrões PRPD, dificultando o diagnóstico da condição do sistema de isolamento.

**Palavras-chave:** descargas parciais; distorções harmônicas; método dos elementos finitos; modelo de simulação; padrões PRPD; sistemas de isolamento.

## ABSTRACT

The monitoring of partial discharges (PDs) is one of the main techniques applied worldwide to assess the insulation condition of electrical equipment powered by medium and high voltage. The occurrence of PDs is normally related to the appearance of defects in the insulation system that, over time, can compromise the integrity of the dielectric material used, increasing the probability of complete failure. Laboratory tests for measuring and evaluating PDs are generally performed with the application of purely sinusoidal alternating voltages. However, due to the adversities of the electrical grid, it is very common for electrical equipment to be operated with voltages distorted by harmonic components at some point. In this context, this work aims to analyze the impacts of harmonic voltage distortions on the occurrence of PDs. For this, a dynamic model was implemented to simulate PDs based on the application of the finite element method (FEM). With this model, several simulations were performed applying distorted voltages composed of different harmonic frequencies, various levels of distortion, different phase angles, among other combinations. The results extracted from the simulations revealed that the harmonic distortions can cause variations in the number of PDs generated, as well as in the mean values of their charges. Deformations in the Phase-Resolved Partial Discharge (PRPD) patterns were also observed. Furthermore, the temporal evolution of the PDs was highly dependent on the characteristics of each analyzed waveform, such as inflection points and peak values. In general, for higher harmonic distortion levels, the effects on PD activities were more significant. In practice, some of these effects may contribute to the degradation of the dielectric material and impair the interpretation of PRPD patterns, making it difficult to diagnose the condition of the insulation system.

**Keywords:** partial discharges; harmonic distortions; finite element method; simulation model; PRPD patterns; insulation systems.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Ocorrência de uma descarga parcial em uma cavidade do material dielétrico. ....	31
Figura 2.2 – Avalanche de elétrons causada no processo de ionização. ....	32
Figura 2.3 – Mecanismos da geração de elétrons por emissão de superfície .....	34
Figura 2.4 – Mecanismos da geração de elétrons por ionização de volume. ....	35
Figura 2.5 – Tipos de descargas parciais: (a) internas, (b) superficiais, (c) corona .....	36
Figura 2.6 – Apresentação dos dados de uma descarga parcial: (a) padrão PRPD simples, (b) padrão PRPD com escala de cores, (c) padrão PRPD tridimensional .....	40
Figura 2.7 – Modelo abc capacitivo: (a) circuito geral, (b) circuito equivalente .....	41
Figura 2.8 – Formação do momento de dipolo no modelo da carga induzida .....	43
Figura 2.9 – Decomposição de uma forma de onda distorcida através de suas componentes harmônicas.....	48
Figura 2.10 – Mecanismo de ocorrência de descargas parciais com a aplicação de tensões alternadas: (a) senoidal, (b) distorcida por componentes harmônicas.....	52
Figura 3.1 – Diagrama esquemático do processo de ocorrência de uma DP interna: (a) antes da DP, (b) durante a DP, (c) após a DP .....	55
Figura 3.2 – Movimento das cargas livres ao longo da superfície da cavidade: (a) quando $E_{cav}(t)$ e $E_s(t)$ possuem sentidos opostos, (b) quando $E_{cav}(t)$ e $E_s(t)$ possuem sentidos iguais .....	60
Figura 3.3 – Geometria do modelo bidimensional axissimétrico.....	64
Figura 3.4 – Malha de elementos finitos gerada.....	65
Figura 3.5 – Fluxograma do algoritmo implementado para simulação das DPs.....	67
Figura 3.6 – Distribuição do campo elétrico na geometria: (a) antes da DP, (b) ao final da DP .....	70
Figura 3.7 – Campo elétrico imediatamente antes e após a ocorrência da primeira DP nas direções: (a) axial, (b) radial.....	71
Figura 3.8 – Distribuição da densidade de corrente na geometria: (a) antes da DP, (b) no início da DP .....	72
Figura 3.9 – Densidade de corrente instantaneamente antes e no início da primeira DP nas direções: (a) axial, (b) radial.....	72
Figura 3.10 – Comportamento de $E_{cav}(t)$ , $E_s(t)$ , $I_{cav}(t)$ , $q_{re}(t)$ e $q_{ap}(t)$ durante a ocorrência da primeira DP na cavidade.....	73
Figura 3.11 – Pulso de corrente de uma DP observado no local de medição.....	74

Figura 3.12 – Evolução temporal de diversas grandezas físicas envolvidas no processo de ocorrência das DPs: (a) $E_{cav0}(t)$ , $E_{cav}(t)$ , $E_s(t)$ , $E_{rup}$ e $E_{ext}$ , (b) $I_{cav}(t)$ , (c) $q_{re}(t)$ e $q_{ap}(t)$ ...	75
Figura 3.13 – Campo elétrico devido às cargas de superfície para diferentes valores de condutividade máxima da superfície da cavidade .....	77
Figura 3.14 – Comparação entre os padrões PRPD obtidos: (a) na simulação, (b) experimentalmente por Illias (2011) .....	78
Figura 4.1 – Pontos de inflexão e alterações de inclinação na forma de onda da tensão devido à presença de uma componente harmônica .....	81
Figura 4.2 – Resultados obtidos com a aplicação da tensão distorcida pela 3ª harmônica: (a) campos elétricos em função do tempo, (b) pulsos de corrente das DPs geradas na cavidade ao longo do tempo .....	82
Figura 4.3 – Resultados obtidos com a aplicação da tensão distorcida pela 5ª harmônica: (a) campos elétricos em função do tempo, (b) pulsos de corrente das DPs geradas na cavidade ao longo do tempo .....	83
Figura 4.4 – Resultados obtidos com a aplicação da tensão distorcida pela 7ª harmônica: (a) campos elétricos em função do tempo, (b) pulsos de corrente das DPs geradas na cavidade ao longo do tempo .....	83
Figura 4.5 – Resultados obtidos com a aplicação da tensão distorcida pela 9ª harmônica: (a) campos elétricos em função do tempo, (b) pulsos de corrente das DPs geradas na cavidade ao longo do tempo .....	84
Figura 4.6 – Resultados obtidos com a aplicação da tensão distorcida pela 11ª harmônica: (a) campos elétricos em função do tempo, (b) pulsos de corrente das DPs geradas na cavidade ao longo do tempo .....	84
Figura 4.7 – Resultados obtidos com a aplicação da tensão distorcida pela 13ª harmônica: (a) campos elétricos em função do tempo, (b) pulsos de corrente das DPs geradas na cavidade ao longo do tempo .....	85
Figura 4.8 – Padrões PRPD obtidos nos casos em que foram aplicadas tensões distorcidas pela 3ª harmônica com $DIT_h\%$ = : (a) 1%, (b) 3%, (c) 5%, (d) 10%, (e) 15%, (f) 20%.....	87
Figura 4.9 – Padrões PRPD obtidos nos casos em que foram aplicadas tensões distorcidas pela 5ª harmônica com $DIT_h\%$ = : (a) 1%, (b) 3%, (c) 5%, (d) 10%, (e) 15%, (f) 20%.....	88
Figura 4.10 – Padrões PRPD obtidos nos casos em que foram aplicadas tensões distorcidas pela 7ª harmônica com $DIT_h\%$ = : (a) 1%, (b) 3%, (c) 5%, (d) 10%, (e) 15%, (f) 20%.....	89
Figura 4.11 – Padrões PRPD obtidos nos casos em que foram aplicadas tensões distorcidas pela	

9ª harmônica com $DIT_h\% =$ : (a) 1%, (b) 3%, (c) 5%, (d) 10%, (e) 15%, (f) 20%.....	90
Figura 4.12 – Padrões PRPD obtidos nos casos em que foram aplicadas tensões distorcidas pela 11ª harmônica com $DIT_h\% =$ : (a) 1%, (b) 3%, (c) 5%, (d) 10%, (e) 15%, (f) 20%.....	91
Figura 4.13 – Padrões PRPD obtidos nos casos em que foram aplicadas tensões distorcidas pela 13ª harmônica com $DIT_h\% =$ : (a) 1%, (b) 3%, (c) 5%, (d) 10%, (e) 15%, (f) 20%.....	92
Figura 4.14 – Número médio de DPs geradas por ciclo em função da composição harmônica e do nível de distorção da tensão aplicada .....	94
Figura 4.15 – Carga aparente média por DP em função da composição harmônica e do nível de distorção da tensão aplicada .....	94
Figura 4.16 – Carga aparente total por ciclo em função da composição harmônica e do nível de distorção da tensão aplicada .....	95
Figura 4.17 – Carga aparente máxima em função da composição harmônica e do nível de distorção da tensão aplicada .....	95
Figura 4.18 – Resultados obtidos com a aplicação da tensão distorcida pela 3ª harmônica com $\varphi_h = 90^\circ$ : (a) campos elétricos em função do tempo, (b) pulsos de corrente das DPs geradas na cavidade ao longo do tempo .....	98
Figura 4.19 – Resultados obtidos com a aplicação da tensão distorcida pela 3ª harmônica com $\varphi_h = 180^\circ$ : (a) campos elétricos em função do tempo, (b) pulsos de corrente das DPs geradas na cavidade ao longo do tempo .....	98
Figura 4.20 – Resultados obtidos com a aplicação da tensão distorcida pela 3ª harmônica com $\varphi_h = 270^\circ$ : (a) campos elétricos em função do tempo, (b) pulsos de corrente das DPs geradas na cavidade ao longo do tempo .....	99
Figura 4.21 – Resultados obtidos com a aplicação da tensão distorcida pela 5ª harmônica com $\varphi_h = 90^\circ$ : (a) campos elétricos em função do tempo, (b) pulsos de corrente das DPs geradas na cavidade ao longo do tempo .....	99
Figura 4.22 – Resultados obtidos com a aplicação da tensão distorcida pela 5ª harmônica com $\varphi_h = 180^\circ$ : (a) campos elétricos em função do tempo, (b) pulsos de corrente das DPs geradas na cavidade ao longo do tempo .....	100
Figura 4.23 – Resultados obtidos com a aplicação da tensão distorcida pela 5ª harmônica com $\varphi_h = 270^\circ$ : (a) campos elétricos em função do tempo, (b) pulsos de corrente das DPs geradas na cavidade ao longo do tempo .....	100
Figura 4.24 – Padrões PRPD obtidos nos casos em que foram aplicadas tensões distorcidas pela	

3ª harmônica com $DIT_h\% = 20\%$ e $\varphi_h =$ : (a) $0^\circ$ , (b) $90^\circ$ , (c) $180^\circ$ , (d) $270^\circ$ .....	102
Figura 4.25 – Padrões PRPD obtidos nos casos em que foram aplicadas tensões distorcidas pela 5ª harmônica com $DIT_h\% = 20\%$ e $\varphi_h =$ : (a) $0^\circ$ , (b) $90^\circ$ , (c) $180^\circ$ , (d) $270^\circ$ .....	103
Figura 4.26 – Resultados obtidos com a aplicação da tensão distorcida pelas 3ª, 7ª e 11ª harmônicas com $DIT_h\% = 10\%$ e pelas 5ª, 9ª e 13ª harmônicas com $DIT_h\% = 5\%$ : (a) campos elétricos em função do tempo, (b) pulsos de corrente das DPs geradas na cavidade ao longo do tempo .....	106
Figura 4.27 – Resultados obtidos com a aplicação da tensão distorcida pelas 3ª, 7ª e 11ª harmônicas com $DIT_h\% = 5\%$ e pelas 5ª, 9ª e 13ª harmônicas com $DIT_h\% = 10\%$ : (a) campos elétricos em função do tempo, (b) pulsos de corrente das DPs geradas na cavidade ao longo do tempo .....	107
Figura 4.28 – Primeiro caso: (a) espectro harmônico da tensão aplicada, (b) padrão PRPD obtido na simulação .....	107
Figura 4.29 – Segundo caso: (a) espectro harmônico da tensão aplicada, (b) padrão PRPD obtido na simulação .....	108

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Indicadores de distorção harmônica de tensão .....	49
Tabela 2.2 – Limites globais inferiores para os indicadores $DIT_h\%$ e $DTT95\%$ de acordo com os procedimentos de rede do ONS .....	51
Tabela 2.3 – Limites individuais para os indicadores $DIT_h\%$ e $DTT95\%$ de acordo com os procedimentos de rede do ONS .....	51
Tabela 2.4 – Limites das distorções harmônicas totais de acordo com os procedimentos de distribuição da ANEEL .....	51
Tabela 3.1 – Propriedades da malha de elementos finitos.....	65
Tabela 3.2 – Parâmetros do modelo de simulação .....	66
Tabela 3.3 – Comparação entre os resultados gerais simulados e experimentais .....	78
Tabela 4.1 – Comparação entre os resultados gerais obtidos nas simulações em que o ângulo de fase da 3ª harmônica foi variado.....	104
Tabela 4.2 – Comparação entre os resultados gerais obtidos nas simulações em que o ângulo de fase da 5ª harmônica foi variado.....	104
Tabela 4.3 – Comparação entre os resultados gerais obtidos nas duas últimas simulações...	109

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

2D	Duas dimensões
3D	Três dimensões
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CA	Corrente alternada
DBSCAN	<i>Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise</i>
DP	Descarga parcial
HVDC	<i>High Voltage Direct Current</i>
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
MATLAB	<i>Matrix Laboratory</i>
MEF	Método dos elementos finitos
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
PAC	Ponto de acoplamento comum
PRPD	<i>Phase-Resolved Partial Discharge</i>
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>

## LISTA DE SÍMBOLOS

$c$	Capacitância da cavidade
$C_a$	Capacitância equivalente de $C_{a1}$ com $C_{a2}$ em paralelo
$C_{a1}$	Capacitância da parte saudável do dielétrico à esquerda da cavidade
$C_{a2}$	Capacitância da parte saudável do dielétrico à direita da cavidade
$C_b$	Capacitância equivalente de $C_{b1}$ com $C_{b2}$ em série
$C_{b1}$	Capacitância da parte saudável do dielétrico acima da cavidade
$C_{b2}$	Capacitância da parte saudável do dielétrico abaixo da cavidade
$C_c$	Capacitância equivalente da cavidade de ar
$c_e$	Velocidade térmica do elétron
$DIT_h\%$	Distorção harmônica individual de tensão de ordem $h$
$D_{s,sup}$	Densidade de fluxo elétrico no lado superior da parte superior da superfície da cavidade
$D_{s,inf}$	Densidade de fluxo elétrico no lado inferior da parte superior da superfície da cavidade
$DTT\%$	Distorção harmônica total de tensão
$DTT_3\%$	Distorção harmônica total de tensão para as componentes múltiplas de 3
$DTT_395\%$	Valor do indicador $DTT_3\%$ que foi superado em apenas 5% das 1008 leituras válidas
$DTT95\%$	Valor do indicador $DTT\%$ que foi superado em apenas 5% das 1008 leituras válidas
$DTT_i\%$	Distorção harmônica total de tensão para as componentes ímpares não múltiplas de 3
$DTT_i95\%$	Valor do indicador $DTT_i\%$ que foi superado em apenas 5% das 1008 leituras válidas
$DTT_p\%$	Distorção harmônica total de tensão para as componentes pares não múltiplas de 3
$DTT_p95\%$	Valor do indicador $DTT_p\%$ que foi superado em apenas 5% das 1008 leituras válidas
$e$	Carga elementar do elétron

$E_{cav}$	Campo elétrico na cavidade
$E_{cav0}$	Campo elétrico na cavidade sem a ocorrência de nenhuma DP
$E_{ext}$	Campo elétrico de extinção
$E_{rup}$	Campo elétrico de ruptura
$E_s$	Campo elétrico devido às cargas da superfície da cavidade
$E_{s,qlivre}$	Campo elétrico devido às cargas livres na superfície da cavidade
$E_{s,qpresa}$	Campo elétrico devido às cargas presas na superfície da cavidade
$E_{sup}$	Campo elétrico na superfície da cavidade
$f$	Frequência da tensão aplicada
$f_1$	Frequência fundamental
$f_c$	Fator de intensificação do campo elétrico aplicado na cavidade
$h$	Ordem harmônica
$h_d$	Altura do cilindro preenchido pelo material dielétrico
$h_{sup}$	Espessura da superfície da cavidade de ar
$i$	Corrente elétrica
$I_1$	Amplitude da onda senoidal de corrente da componente fundamental
$I_{cav}$	Corrente elétrica que flui pela cavidade durante uma DP
$I_{cc}$	Componente contínua de corrente
$I_{eletr}$	Corrente elétrica que flui pelo eletrodo de aterramento durante uma DP
$I_h$	Amplitude da onda senoidal de corrente da componente harmônica
$J_{cav}$	Densidade de corrente na cavidade
$J_{eletr}$	Densidade de corrente no eletrodo de aterramento
$m_e$	Massa do elétron
$n$	Taxa de repetição de DPs
$N_{DPs/ciclo}$	Número médio de DPs por ciclo
$N_e$	Densidade de elétrons
$N_{e,DP}$	Número de elétrons emitidos da superfície por causa de uma DP anterior
$N_{e,sup}$	Taxa de geração de elétrons por emissão de superfície

$N_{e,sup0}$	Taxa inicial de geração de elétrons por emissão de superfície
$N_{e,sup0A}$	Taxa inicial de geração de elétrons por emissão de superfície alta
$N_{e,sup0B}$	Taxa inicial de geração de elétrons por emissão de superfície baixa
$N_{e,tot}$	Taxa de geração de elétrons total
$N_{e,vol}$	Taxa de geração de elétrons devido à ionização do volume da cavidade
$P$	Probabilidade de ocorrência de uma DP
$p_{cav}$	Pressão do ar na cavidade
$q_{ap}$	Carga aparente de uma descarga parcial
$q_{ap/ciclo}$	Carga aparente total por ciclo
$q_{ap/DP}$	Carga aparente média por DP
$q_{apmáx}$	Carga aparente máxima
$q_{apmin}$	Carga aparente mínima
$q_{DPs,total}$	Carga total obtida pela soma das cargas reais geradas por todas as DPs
$q_{ind}$	Carga induzida nos eletrodos
$q_{re}$	Carga real de uma descarga parcial
$q_{s,livre}$	Cargas livres na superfície da cavidade
$q_{s,presa}$	Cargas presas na superfície da cavidade
$R$	Número randômico
$r_{cav}$	Raio da cavidade de ar
$r_d$	Raio do cilindro preenchido pelo material dielétrico
$S_{cav}$	Área da superfície da cavidade
$S_{eletr}$	Área da superfície do eletrodo de aterramento
$t$	Tempo
$T_{amb}$	Temperatura ambiente de referência
$T_d$	Temperatura do material dielétrico
$t_{DP}$	Instante de ocorrência de uma DP anterior
$t_{ext}$	Instante de tempo em que uma DP é extinta
$t_{rup}$	Instante de tempo no qual ocorre a ruptura do ar na cavidade

$v$	Tensão elétrica
$V_1$	Amplitude da onda senoidal de tensão da componente fundamental
$V_{apl}$	Tensão aplicada
$V_{apl,distorcida}$	Tensão aplicada com distorção harmônica
$V_{aplmáx}$	Amplitude da tensão aplicada
$V_{apl,senoidal}$	Tensão aplicada puramente senoidal
$V_{cav}$	Tensão na cavidade
$V_{cc}$	Componente contínua de tensão
$V_h$	Amplitude da onda senoidal de tensão da componente harmônica
$V_n$	Tensão nominal
$V_{rup}$	Tensão de ruptura do gás na cavidade
$\alpha$	Coefficiente de stress
$\alpha_e$	Coefficiente relacionado à distribuição de energia do elétron
$\Delta t_{semDP}$	Passo de tempo de integração sem DP
$\Delta t_{comDP}$	Passo de tempo de integração com DP
$\Delta V_{DP}$	Queda de tensão ao longo da cavidade durante a ocorrência de uma DP
$\epsilon_{rcav}$	Permissividade relativa da cavidade de ar
$\epsilon_{rd}$	Permissividade relativa do material dielétrico
$\epsilon_{rsup}$	Permissividade relativa da superfície da cavidade de ar
$\theta_1$	Ângulo de fase da onda senoidal de corrente da componente fundamental
$\theta_h$	Ângulo de fase da onda senoidal de corrente da componente harmônica
$\lambda_e$	Caminho livre médio do elétron
$\sigma_{cav}$	Condutividade da cavidade de ar
$\sigma_{cav0}$	Condutividade da cavidade de ar sem DP
$\sigma_{cavmáx}$	Condutividade da cavidade de ar com DP
$\sigma_d$	Condutividade do material dielétrico
$\sigma_{sup}$	Condutividade da superfície da cavidade de ar
$\sigma_{sup0}$	Condutividade inicial da superfície da cavidade de ar

$\sigma_{supm\acute{a}x}$	Condutividade máxima da superfície da cavidade de ar
$\tau_{dec}$	Constante de tempo de decaimento da carga efetiva de superfície
$\tau_{est}$	Tempo de atraso estatístico
$\varphi$	Ângulo de fase de ocorrência de uma DP
$\varphi_1$	Ângulo de fase da onda senoidal de tensão da componente fundamental
$\varphi_h$	Ângulo de fase da onda senoidal de tensão da componente harmônica

## SUMÁRIO

### CAPÍTULO 1

<b>INTRODUÇÃO</b> .....	25
1.1 Contextualização .....	25
1.2 Justificativa .....	26
1.3 Objetivos .....	28
1.3.1 Objetivo geral .....	28
1.3.2 Objetivos específicos .....	28
1.4 Estrutura da dissertação .....	29

### CAPÍTULO 2

<b>REVISÃO DA LITERATURA</b> .....	30
2.1 Introdução ao fenômeno da descarga parcial .....	30
2.2 Mecanismo de ocorrência da descarga parcial .....	31
2.2.1 Processo de ionização .....	31
2.2.2 Geração inicial de elétrons.....	33
2.2.2.1 Emissão de superfície .....	33
2.2.2.2 Ionização de volume .....	34
2.2.3 Caráter estocástico da descarga parcial .....	35
2.3 Tipos de descargas parciais .....	36
2.3.1 Descargas parciais internas.....	37
2.3.2 Descargas parciais superficiais .....	38
2.3.3 Descargas corona .....	38
2.4 Análise de dados de descargas parciais .....	39
2.5 Modelos de simulação de descargas parciais .....	41
2.5.1 Modelo abc capacitivo .....	41
2.5.2 Modelo da carga induzida .....	42
2.5.3 Modelo analítico generalizado .....	43
2.5.4 Modelo de elementos finitos .....	44
2.5.5 Modelo de plasma .....	46
2.6 Distorções harmônicas e seus efeitos sobre as descargas parciais .....	46
2.6.1 Conceituação das distorções harmônicas .....	46
2.6.2 Causas e consequências gerais das distorções harmônicas .....	48

2.6.3	Indicadores de distorção harmônica e limites definidos pelas normas técnicas	49
2.6.4	Influência das distorções harmônicas sobre a ocorrência de descargas parciais	52
2.7	Considerações finais	53
<b>CAPÍTULO 3</b>		
<b>MODELAGEM DE DESCARGAS PARCIAIS</b>		54
3.1	Descargas parciais em cavidades e o mecanismo do <i>streamer</i>	54
3.2	Campos elétricos de ruptura e extinção	56
3.3	Taxas de geração de elétrons	57
3.4	Probabilidade de ocorrência de uma descarga parcial	58
3.5	Condutividade da cavidade	58
3.6	Cálculo das cargas reais e aparentes das descargas parciais	59
3.7	Decaimento das cargas de superfície	60
3.8	Equações fundamentais para análise de elementos finitos	62
3.9	Implementação do modelo	63
3.9.1	Geometria	63
3.9.2	Malha de elementos finitos	64
3.9.3	Parâmetros	66
3.9.4	Algoritmo	67
3.10	Validação do modelo	69
3.10.1	Ocorrência da primeira descarga parcial	69
3.10.2	Evolução temporal das descargas parciais	75
3.10.3	Comparação entre dados simulados e experimentais	77
3.11	Considerações finais	79
<b>CAPÍTULO 4</b>		
<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>		80
4.1	Distorções causadas por componentes harmônicas individuais	80
4.1.1	Efeitos sobre o comportamento dinâmico das descargas parciais	80
4.1.2	Efeitos sobre os padrões PRPD	86
4.1.3	Resultados gerais	94
4.2	Distorções causadas por componentes harmônicas com ângulos de fase variados	97
4.2.1	Efeitos sobre o comportamento dinâmico das descargas parciais	97
4.2.2	Efeitos sobre os padrões PRPD	101
4.2.3	Resultados gerais	103

4.3 Distorções causadas por componentes harmônicas combinadas .....	105
4.3.1 Efeitos sobre o comportamento dinâmico das descargas parciais .....	106
4.3.2 Efeitos sobre os padrões PRPD .....	107
4.3.3 Resultados gerais .....	108
4.4 Considerações finais .....	109
<b>CAPÍTULO 5</b>	
<b>CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>111</b>
5.1 Conclusões da pesquisa .....	111
5.2 Sugestões para trabalhos futuros .....	113
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>114</b>
<b>APÊNDICE</b>	
<b>TRABALHOS PUBLICADOS AO LONGO DO MESTRADO .....</b>	<b>121</b>

# CAPÍTULO 1

---

---

## INTRODUÇÃO

### 1.1 Contextualização

No mundo contemporâneo, o desenvolvimento econômico e a qualidade de vida da população dependem cada vez mais do fornecimento contínuo de energia elétrica. Por esse motivo, as concessionárias de energia elétrica têm feito grandes investimentos com o intuito de melhorar a qualidade, a confiabilidade e a segurança do sistema elétrico de potência (ANDERS; VACCARO, 2011). Para atingir esses objetivos, é necessário que as condições dos diversos equipamentos elétricos que fazem parte do sistema sejam averiguadas com frequência, a fim de evitar falhas que podem resultar em danos materiais e humanos, interrupções indesejadas e perdas econômicas (GILL, 2008; S. LI; J. LI, 2017).

Uma parte crucial que deve ser monitorada para garantir a operacionalidade de qualquer equipamento elétrico é o sistema de isolamento (JAMES; SU, 2007). Este, por sua vez, é normalmente composto por materiais dielétricos que têm a função de isolar eletricamente as partes energizadas do equipamento, impedindo a ocorrência de curto-circuito. Como muitos dispositivos de potência operam em condições adversas e são submetidos a diferentes tipos de distúrbios pela rede elétrica, estresses elétricos, mecânicos e térmicos podem originar diferentes processos químicos nas estruturas dos materiais dielétricos, deteriorando-os de forma gradual. Com o passar do tempo, a capacidade de isolamento pode ser comprometida e, eventualmente, rupturas dielétricas completas podem acontecer (MORSALIN, 2020).

Segundo Kessler (2020), as falhas nos sistemas de isolamento são as principais causas de danos e paradas de diversos ativos do sistema elétrico, como hidrogeradores, motores de grande porte, transformadores de potência, dispositivos de manobra, conversores industriais, cabos de transmissão, entre outros. Dessa forma, o monitoramento das condições da isolamento durante todo o ciclo operativo de um dispositivo elétrico é essencial para diminuir os riscos de falhas e possibilitar o agendamento de paradas para manutenção (JAMES; SU, 2007).

Nas últimas décadas, a medição de descargas parciais (DPs) tem se tornado um dos principais métodos utilizados mundialmente para diagnóstico e avaliação de problemas nos sistemas de isolamento de equipamentos elétricos alimentados por média e alta tensão (STONE, 2005; WU *et al.*, 2015). As DPs são pequenas faíscas elétricas intermitentes que acontecem na presença de campos elétricos intensos, sendo observadas normalmente em regiões defeituosas

da isolação, como vazios, cavidades, fissuras, juntas e delaminações (ILLIAS, 2011). A ocorrência de DPs é ao mesmo tempo uma causa e um indicativo do desenvolvimento de defeitos potencialmente prejudiciais à saúde da isolação. As DPs podem causar deterioração progressiva de um material dielétrico e acelerar o seu envelhecimento, aumentando o risco de haver falhas completas (KESSLER, 2020).

Por esses motivos, testes de DPs são realizados na maioria dos equipamentos utilizados no sistema elétrico de potência, seja na etapa de fabricação, após a instalação ou durante a operação (MOTA, 2011; PALITÓ, 2015). Os sinais das DPs obtidos em medições, após processamento, são na maioria das vezes representados por padrões associados à fase da tensão alternada, do inglês *Phase-Resolved Partial Discharge* (PRPD). A análise destes padrões tem sido considerada uma das ferramentas mais poderosas para diagnóstico de problemas de isolamento (HUDON; BÉLEC, 2005). Os padrões PRPD ajudam a identificar defeitos de fabricação, revelam o grau de envelhecimento dos materiais utilizados na isolação e possibilitam a previsão de falhas, tornando viável a aplicação da manutenção preditiva (CUENCA, 2005, PALITÓ, 2015, GIANOGLIO *et al.*, 2021).

## 1.2 Justificativa

Nos últimos anos, o monitoramento de DPs vem recebendo grande atenção das instituições de pesquisa e das empresas do setor elétrico, visto que avanços tecnológicos significativos têm sido feitos nessa área. Novos sensores foram desenvolvidos para detecção de DPs (BRASIL, 2016; NOBREGA *et al.*, 2019, SIKORSKI, 2019), técnicas de processamento e filtragem de sinais foram aprimoradas a fim de eliminar ruídos (CUNHA *et al.*, 2015; ZHONG *et al.*; 2020), algoritmos avançados baseados em inteligência artificial, aprendizado de máquinas e redes neurais se mostraram eficientes para diagnosticar automaticamente defeitos na isolação a partir do reconhecimento de padrões PRPD (LU *et al.*, 2020; FLORKOWSKI, 2020; ARAÚJO; OLIVEIRA; BARROS, 2022), entre outros progressos (JIA; HE; HUO, 2020; JIANG *et al.*, 2020).

Apesar desses avanços, a interpretação dos sinais de DPs ainda continua muito sensível à presença de distúrbios do sistema elétrico, entre os quais destacam-se as distorções harmônicas de tensão. Além de ser um fator inerentemente agravante para a degradação dos materiais dielétricos devido à imposição de estresses elétricos e térmicos (CAVALLINI; FABIANI; MONTANARI, 2010), alguns estudos relataram que as distorções harmônicas de tensão também têm influência sobre a geração de descargas parciais (FLORKOWSKI, 1997;

FLORKOWSKA; FLORKOWSKI; ZYDRÓN, 2007; FLORKOWSKI *et al.*, 2013; FLORKOWSKI; FLORKOWSKA; ZYDRÓN, 2018; HASSAN, *et al.*, 2021).

O estudo realizado por Florkowski (1997) foi pioneiro ao reportar deformações observadas em padrões PRPD devido a tensões distorcidas por componentes harmônicas. Neste estudo, também foram identificadas variações no número de DPs geradas e nas magnitudes das cargas das DPs em razão das distorções na forma de onda da tensão. Posteriormente, o trabalho desenvolvido experimentalmente por Florkowska, Florkowski e Zydrón (2007) concluiu que descargas parciais resultantes de certas formas de onda de tensões distorcidas podem causar a aceleração do processo de envelhecimento do material dielétrico. Na pesquisa conduzida por Florkowski *et al.* (2013), um transformador de potência foi alimentado por duas tensões distintas em relação ao conteúdo harmônico e os dados obtidos nas medições das DPs revelaram diferentes padrões PRPD e magnitudes de carga para cada condição estudada. O mesmo estudo concluiu que as alterações nas características das DPs causadas pelas componentes harmônicas podem afetar a interpretação dos dados registrados, levando a diagnósticos imprecisos da condição da isolamento. Conclusões semelhantes também foram apontadas posteriormente por Florkowski, Florkowska e Zydrón (2018), quando tensões distorcidas foram aplicadas a uma amostra impregnada de óleo contendo uma inclusão gasosa.

Além disso, também já foi investigado na literatura o impacto das componentes harmônicas de tensão produzidas por conversores de frequência, quando usados para alimentar motores elétricos em velocidades variáveis. Neste caso, as tensões distorcidas aplicadas nos enrolamentos do estator levaram a grandes alterações nos níveis de intensidade das DPs, aumentando o risco de falha do sistema de isolamento do motor (HASSAN, *et al.*, 2021).

Recentemente, um novo método para avaliação do comportamento de DPs foi aplicado em uma configuração de eletrodo agulha-hemisfério imerso em óleo mineral (AYDOGAN, *et al.*, 2021). Este método se baseou na identificação das componentes harmônicas da corrente de fuga medida no eletrodo de aterramento do sistema de teste. Para isso, os dados levantados experimentalmente foram analisados por meio da transformada rápida de Fourier, o que possibilitou obter o nível de distorção individual de cada ordem harmônica que compõe o sinal da corrente de fuga. Os resultados obtidos por Aydogan *et al.* (2021) mostraram que as componentes harmônicas podem ser utilizadas como uma possível fonte de informação sobre a atividade das DPs, e que pode haver uma relação entre o aumento das componentes harmônicas na corrente de fuga e o aumento da intensidade das DPs.

Embora os trabalhos experimentais citados nesta seção tenham mostrado que a presença de componentes harmônicas na forma de onda da tensão afeta o desenvolvimento de descargas

parciais, ainda não foram realizados estudos aprofundados a respeito de diferentes atributos da distorção harmônica e de seus efeitos sobre as DPs. Esta dissertação surge com o propósito de preencher essa lacuna de conhecimento através de análises feitas a partir de diversas simulações, nas quais são aplicadas tensões distorcidas com várias componentes harmônicas individuais, diferentes níveis de distorção harmônica, ângulos de fase variados, entre outras combinações. As simulações são realizadas a partir de um modelo implementado com base na aplicação do método dos elementos finitos (MEF) para simular as DPs de maneira dinâmica.

### **1.3 Objetivos**

#### **1.3.1 Objetivo geral**

Este trabalho tem como principal objetivo analisar os impactos das distorções harmônicas de tensão sobre a ocorrência de descargas parciais através de simulações computacionais baseadas em um modelo de elementos finitos.

#### **1.3.2 Objetivos específicos**

Para atingir o objetivo geral da pesquisa, alguns objetivos específicos foram propostos:

1. Adquirir embasamento teórico a fim de compreender os princípios físicos relacionados ao fenômeno da descarga parcial.
2. Introduzir de forma geral o problema das distorções harmônicas.
3. Implementar um modelo de simulação dinâmico, fundamentado na aplicação do método dos elementos finitos, que seja capaz de representar com precisão o processo de ocorrência de DPs em cavidades internas.
4. Simular o modelo implementado utilizando tensão puramente senoidal e comparar os resultados com outros reportados na literatura a fim de validá-lo.
5. Simular o modelo implementado aplicando tensões distorcidas por componentes harmônicas e avaliar os efeitos sobre as DPs de diferentes atributos, como: frequência harmônica, magnitude e ângulo de fase.
6. Analisar em cada simulação o impacto da distorção harmônica sobre o comportamento dinâmico das DPs e avaliar as deformações causadas nos padrões PRPD.
7. Investigar as variações causadas pelas distorções harmônicas no número médio de DPs geradas por ciclo e nos valores médios das cargas das DPs em cada

simulação, identificando características nas formas de onda das tensões que expliquem estas alterações.

#### **1.4 Estrutura da dissertação**

Com a finalidade de atingir os objetivos propostos, esta dissertação foi estruturada em cinco capítulos, conforme detalhado na sequência.

No Capítulo 1 o tema da pesquisa é introduzido, justificando sua importância e apresentando os trabalhos já realizados nesta área. Os objetivos da dissertação são apresentados e a divisão dos capítulos é especificada.

No Capítulo 2 é realizada uma revisão bibliográfica, apresentando informações necessárias para compreensão do trabalho. O mecanismo de ocorrência da DP é explicado, os três diferentes tipos de DPs são apresentados, a representação dos dados de DPs por meio de padrões PRPD é demonstrada e os principais modelos de simulação de DPs encontrados na literatura são detalhados. Além disso, também são apresentados alguns fundamentos a respeito das distorções harmônicas e de sua relação com a atividade das DPs.

No Capítulo 3 o modelo dinâmico implementado para simular as DPs é descrito com detalhes. Neste capítulo são mostradas as equações utilizadas para calcular diversos parâmetros e variáveis do modelo, como os campos elétricos de ruptura e extinção, as taxas de geração de elétrons, a probabilidade de ocorrência de uma DP, as condutividades da cavidade e de sua superfície, as cargas reais e aparentes das DPs, entre outros. Além disso, o fluxograma do código desenvolvido é exibido e explicado. No final do capítulo, o modelo é validado através da comparação entre dados simulados e experimentais.

No Capítulo 4 os impactos das distorções harmônicas de tensão sobre as DPs são avaliados a partir dos resultados obtidos em diversas simulações. Neste capítulo são apresentados tanto os gráficos da evolução das DPs no tempo quanto os padrões PRPD, sendo observadas as deformações causadas pelas distorções harmônicas em cada um deles. Os efeitos de vários parâmetros são analisados, como a ordem harmônica, o nível de distorção e o ângulo de fase. Os resultados de cada simulação com distorção harmônica são comparados com os obtidos no caso em que a tensão aplicada é puramente senoidal.

No Capítulo 5 são apresentadas as conclusões do trabalho, resumindo os principais resultados alcançados. Por fim, também são feitas algumas sugestões para trabalhos futuros.

## CAPÍTULO 2

---

---

### REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo é feita uma revisão bibliográfica com o objetivo de fornecer diversas informações a respeito do fenômeno da descarga parcial, incluindo seu mecanismo de ocorrência, seus diferentes tipos e a análise de seus dados. Além disso, os principais modelos de simulação de DPs encontrados na literatura são apresentados e analisados criticamente, a fim de definir o modelo de referência para o trabalho. Adicionalmente, também é apresentado o problema das distorções harmônicas e seus possíveis impactos sobre a ocorrência de DPs.

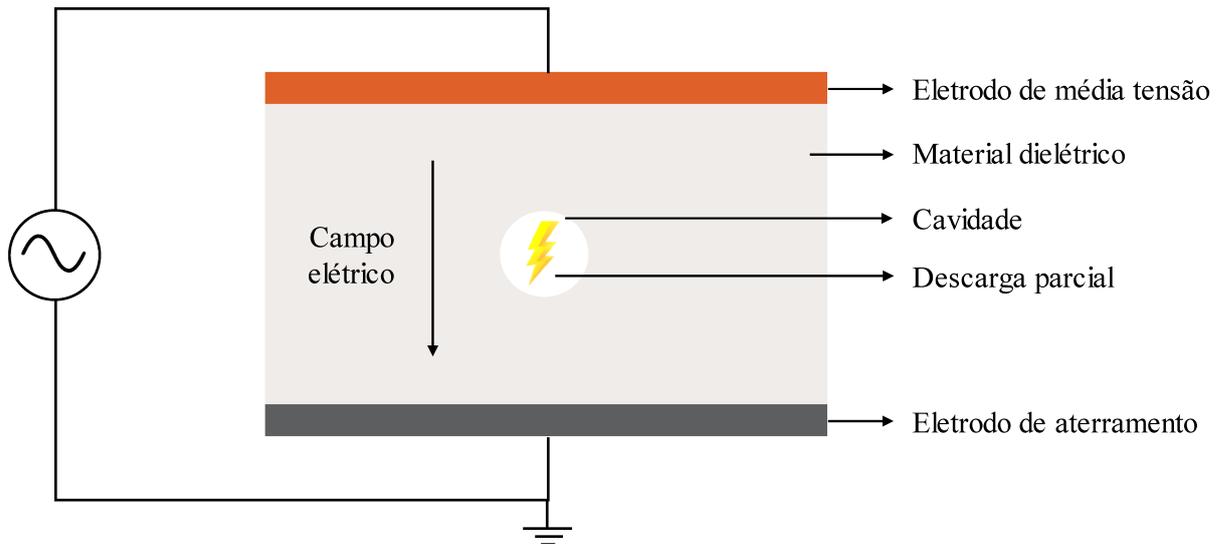
#### 2.1 Introdução ao fenômeno da descarga parcial

A norma IEC 60270 define descarga parcial como uma “descarga elétrica localizada que conecta apenas parcialmente o isolamento entre condutores e que pode ou não ocorrer adjacente a um condutor” (IEC, 2015). Essa descarga é dita “parcial” porque não se trata de um curto-circuito fase-terra ou fase-fase, e sim de um arco elétrico que rompe apenas parcialmente alguma região específica do isolamento (FERREIRA, 2017).

As DPs são observadas, normalmente, em equipamentos alimentados por média e/ou alta tensão, e surgem como consequência da concentração de estresses elétricos em regiões defeituosas no interior ou na superfície da isolação (KESSLER, 2020). Para exemplificar, a Figura 2.1 ilustra a ocorrência de uma DP em uma cavidade de ar que surgiu dentro de um material dielétrico. Nesta situação, como a permissividade relativa do ar é inferior à do material dielétrico, há uma intensificação do campo elétrico no interior da cavidade. Quando este campo elétrico é elevado o suficientemente para romper a rigidez dielétrica do ar, ocorre uma ionização transitória do ar na cavidade, causando a formação de um pequeno arco elétrico que conecta duas partes distintas do material dielétrico, o que constitui uma DP.

Quando uma DP ocorre, um pulso de corrente de curta duração é produzido. Em geral, pulsos de corrente gerados por DPs possuem duração inferior a 1  $\mu$ s. Além disso, também é comum que as DPs sejam acompanhadas por emissões de luz, calor e reações químicas (IEC, 2015). Com o passar do tempo, estes efeitos originados das DPs podem intensificar a deterioração local do material dielétrico e eventualmente causar uma ruptura completa da isolação, colocando em risco a operação do ativo elétrico (KESSLER, 2020).

Figura 2.1 – Ocorrência de uma descarga parcial em uma cavidade do material dielétrico.



Fonte: adaptado de Illias (2011).

## 2.2 Mecanismo de ocorrência da descarga parcial

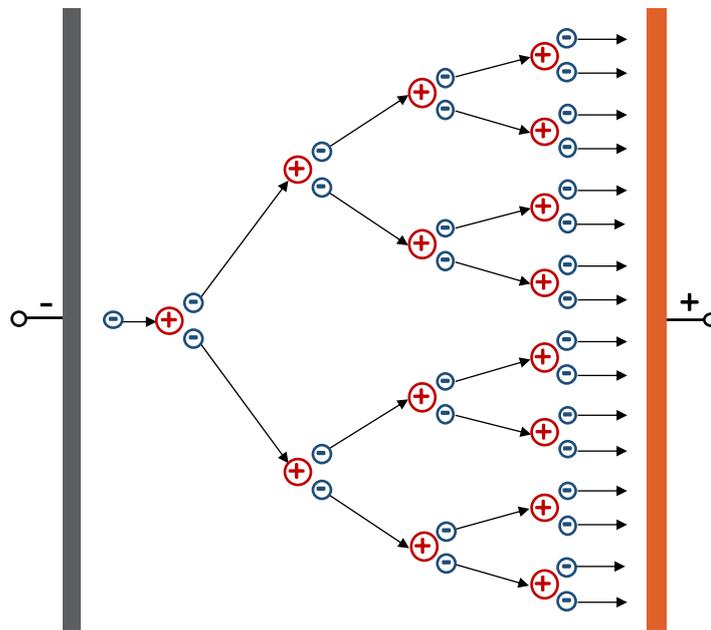
As descargas parciais se manifestam em geral como avalanches de elétrons autossustentadas em meio gasoso. Para que uma descarga parcial ocorra, inicialmente duas condições devem ser satisfeitas. Primeiro, é necessário que haja pelo menos um elétron livre para dar início ao processo de ionização. Segundo, a intensidade do campo elétrico no meio gasoso deve exceder um certo valor crítico, no qual seja possível acelerar os elétrons livres com energia suficiente para causar colisões com átomos ou moléculas neutras e desencadear a avalanche de elétrons (PALITÓ, 2015; FERREIRA, 2017). O processo de ionização e as principais fontes de elétrons livres serão brevemente descritos a seguir.

### 2.2.1 Processo de ionização

Um elétron livre ganha energia cinética quando submetido a um campo elétrico e é acelerado em direção ao ânodo. A quantidade de energia cinética adquirida é fortemente dependente da intensidade do campo elétrico. Durante o movimento do elétron livre, ele pode colidir com átomos ou moléculas neutras que estão em seu caminho. Se o campo elétrico não for muito intenso, o elétron livre irá adquirir velocidade suficiente apenas para causar colisões elásticas sem transferência de energia. Por outro lado, se a intensidade do campo elétrico exceder um valor crítico, o elétron livre presente nesse campo irá adquirir uma velocidade suficientemente elevada para causar uma colisão inelástica. Isso significa que o elétron terá energia necessária para ionizar a molécula neutra em que colidiu, ejetando um elétron de sua órbita e deixando assim um íon positivo para trás (CUENCA, 2005; ARORA; MOSCH, 2011).

O elétron inicial que causou a primeira colisão e o elétron ejetado da molécula neutra são acelerados pelo campo elétrico, causando novas colisões e ionizando outras duas novas moléculas neutras. Após a segunda colisão, existem quatro elétrons livres capazes de ionizar outras quatro novas moléculas neutras. Este processo se repete de forma sistemática com o número de elétrons dobrando a cada colisão. Eventualmente, um grande número de elétrons é liberado e uma avalanche de elétrons é formada em direção ao ânodo (CUENCA, 2005; ARORA; MOSCH, 2011), conforme ilustrado na Figura 2.2.

Figura 2.2 – Avalanche de elétrons causada no processo de ionização.



Fonte: adaptado de Arora e Mosch (2011).

Enquanto os elétrons livres se movem rapidamente em direção ao ânodo, os íons positivos originados nas colisões se movem vagarosamente em direção ao cátodo. O movimento dos íons positivos é muito lento porque estes possuem massas muito superiores à massa do elétron (cinquenta mil vezes maiores, aproximadamente). Apesar disso, quando um íon positivo consegue atrair e reincorporar um elétron à sua camada de valência, um quantum de energia é emitido no processo de transformação do íon em uma molécula neutra novamente. Esse quantum de energia é liberado na forma de uma onda eletromagnética que, para moléculas de ar como oxigênio e nitrogênio, é irradiada com uma frequência dentro do espectro visível. Em geral, um observador externo pode visualizar essa radiação como uma luz violeta clara, que é uma cor comumente associada à recombinação de íons de nitrogênio com elétrons livres (CUENCA, 2005).

O processo de ionização é interrompido quando não há mais a fonte de energia ou quando o campo elétrico é reduzido de tal forma que os elétrons livres não adquiram energia cinética suficiente para realizar colisões inelásticas. Todavia, mesmo após o fim deste processo, a recombinação de cargas continua até que não haja mais íons positivos ou elétrons livres no meio gasoso (CUENCA, 2005).

Os elétrons livres e os íons positivos advindos do processo de ionização são suficientes para conduzir uma corrente elétrica no meio gasoso e absorver uma quantidade consideravelmente grande de potência da fonte de energia, causando centelhamento. Quando isso ocorre, pode-se dizer que houve a ruptura dielétrica do gás. Em geral, como as centelhas produzidas não conectam completamente os eletrodos, este fenômeno é denominado de descarga parcial (CUENCA, 2005).

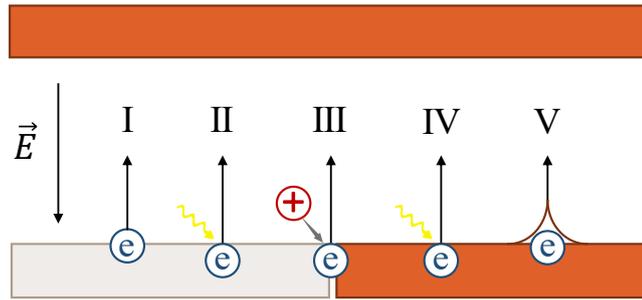
### **2.2.2 Geração inicial de elétrons**

A presença de um campo elétrico intenso garante que os elétrons livres possam ser acelerados com energias suficientes para ionizar moléculas neutras de gás e desencadear a avalanche de elétrons que resultará na descarga parcial. Todavia, este processo só é possível de acontecer caso um primeiro elétron livre já esteja disponível. Segundo Niemeyer (1995), existem duas principais fontes de geração inicial de elétrons, são elas: a emissão de superfície e a ionização de volume. Os mecanismos de geração de elétrons de cada uma destas fontes serão brevemente apresentados na sequência.

#### **2.2.2.1 Emissão de superfície**

A emissão de superfície é um processo de geração de elétrons no qual elétrons livres são emitidos da superfície do material dielétrico ou da superfície do eletrodo. Os mecanismos deste tipo de emissão incluem o desprendimento de elétrons da superfície do material dielétrico (I), a emissão de elétrons por fotoionização da superfície do material dielétrico (II), a ejeção de elétrons por impacto de íons (III), a emissão de elétrons por fotoionização da superfície do condutor (IV) e a liberação de elétrons do condutor por ação de um campo elétrico intenso (V) (NIEMEYER, 1995; BORGHEI, 2022). A Figura 2.3 apresentada na sequência ilustra estes cinco mecanismos de geração de elétrons por emissão de superfície.

Figura 2.3 – Mecanismos da geração de elétrons por emissão de superfície.



Fonte: adaptado de Borghei (2022).

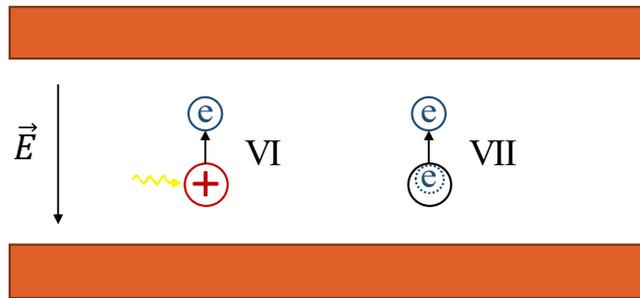
Quando descargas parciais ocorrem continuamente em uma inclusão gasosa, o desprendimento de elétrons da superfície do material dielétrico se torna a principal fonte de elétrons livres (VAN BRUNT, 1991; NIEMEYER, 1995). Isso ocorre porque alguns elétrons oriundos de descargas parciais anteriores são acumulados na superfície do material dielétrico que está em contato com o gás, o que facilita o desprendimento de elétrons dessa superfície para dar início a ocorrência de descargas parciais subsequentes. Este processo pode ser intensificado ainda mais pelo aumento local do campo elétrico ou da temperatura (MOLINIÉ, 2005). Em descargas parciais internas, a geração inicial de elétrons por emissão de superfície é fortemente dependente da amplitude da tensão aplicada, das propriedades do material dielétrico (como condutividade e permissividade), e também da geometria e da localização da inclusão gasosa dentro do material dielétrico (ILLIAS, 2011).

### 2.2.2.2 Ionização de volume

Em inclusões gasosas que nunca experimentaram descargas parciais, a ionização de volume é o principal processo de geração de elétrons livres. Este processo depende da pressão do gás, do volume do gás exposto à ionização e da composição do gás incluso. A ionização de volume ocorre principalmente devido à fotoionização, que é um mecanismo de ionização do gás causado pela irradiação de fótons altamente energéticos (VI) (NIEMEYER, 1995; ILLIAS, 2011). A fotoionização é originada a partir da interação entre um fóton e uma molécula de gás, que resulta primeiramente na absorção do fóton. Se durante este processo, a energia do fóton for suficiente para causar a excitação de um elétron de uma banda de menor energia para uma banda de maior energia, a molécula atinge um estado de excitação. Neste estado, quando a energia do fóton absorvido é suficiente para superar as forças que mantêm o elétron ligado, este último é desacoplado dos orbitais moleculares e ejetado. Como resultado final deste processo, o elétron livre se torna disponível para iniciar uma DP e a molécula de gás é transformada em

um íon positivo (PALITÓ, 2015). Em situações em que o campo elétrico é extremamente intenso, pode-se ter também o desprendimento de elétrons de íons negativos (VII) (NIEMEYER, 1995; BORGHEI, 2022), conforme ilustrado na Figura 2.4.

Figura 2.4 – Mecanismos da geração de elétrons por ionização de volume.



Fonte: adaptado de Borghei (2022).

### 2.2.3 Caráter estocástico da descarga parcial

A natureza probabilística dos mecanismos de geração dos elétrons iniciais é um dos motivos que tornam a descarga parcial um fenômeno estocástico. Por exemplo, a fotoionização e o desprendimento de elétrons por efeito de campo são processos que são descritos adequadamente apenas pela teoria quântica e são, portanto, inerentemente probabilísticos (VAN BRUNT, 1991). O fornecimento dos primeiros elétrons controla algumas características da atividade da DP, como atraso de início, frequência de ocorrência e distribuição em relação ao ângulo de fase da tensão aplicada (NIEMEYER, 1995).

Quando o campo elétrico no meio gasoso supera o valor crítico de ruptura, uma descarga parcial é susceptível de acontecer a qualquer momento. Porém, caso não haja elétrons livres para iniciar o processo de ionização, haverá um atraso de tempo para a ocorrência da descarga parcial. O tempo de atraso médio entre o instante em que o campo de ruptura é excedido e o momento em que a descarga parcial ocorre é chamado de tempo de atraso estatístico ( $\tau_{est}$ ) (NIEMEYER, 1995, FORSSÉN, 2008). Por causa de  $\tau_{est}$ , algumas descargas parciais ocorrem com campos elétricos mais intensos do que o valor de ruptura, o que resulta em maiores magnitudes de corrente (NGUYEN, 2018).

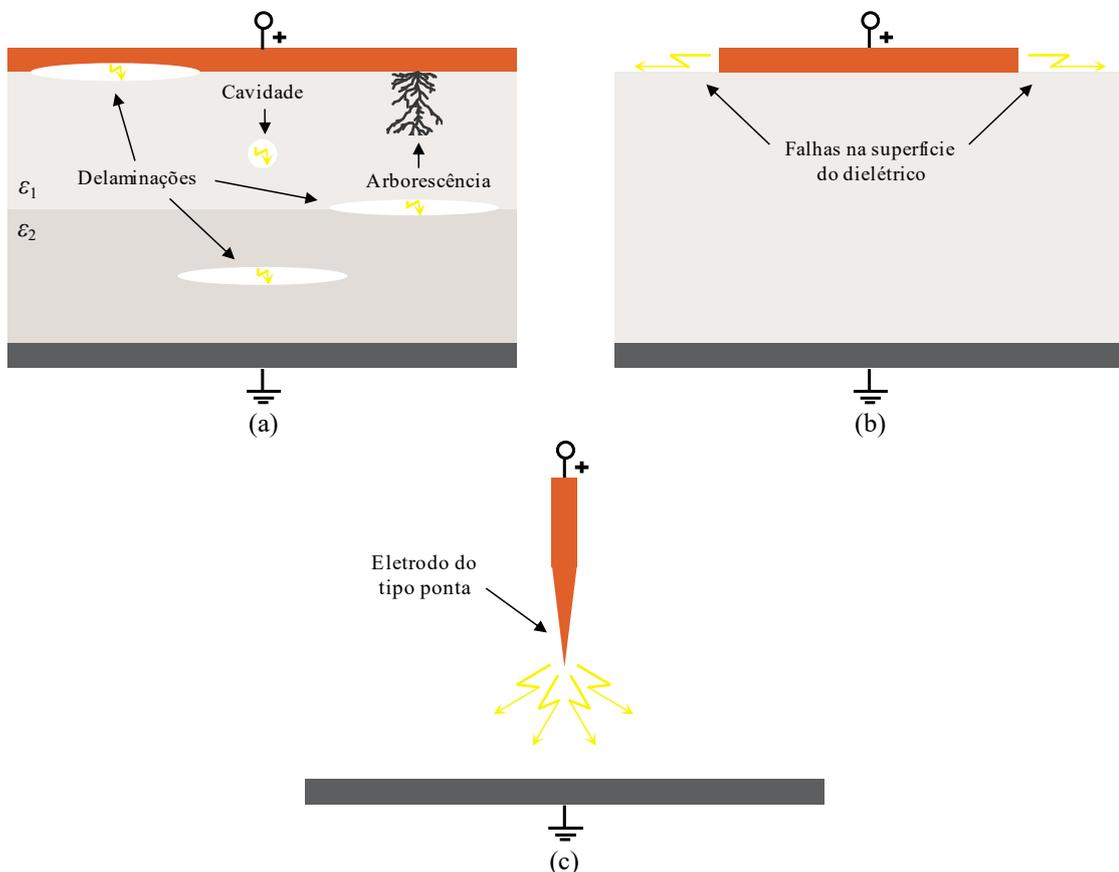
O tempo de atraso estatístico pode diferir para ocorrência de descargas parciais sucessivas. Por exemplo, o tempo de espera para a primeira descarga parcial pode ser maior do que o das descargas seguintes dentro de um mesmo ciclo da tensão aplicada. No caso de descargas parciais internas, uma cavidade que ainda não foi exposta à ocorrência de descarga parcial carece de elétrons livres, pois neste caso as fontes de elétrons disponíveis são limitadas

principalmente pela ionização de volume. Após a ocorrência da primeira DP, as cargas elétricas acumuladas na superfície da cavidade se tornam a principal fonte de elétrons para as descargas parciais seguintes. Portanto, o tempo de atraso para emissão de elétrons livres para estas descargas é menor do que para a primeira DP. À medida que as cargas acumuladas na superfície da cavidade decaem com o tempo, a quantidade de elétrons disponíveis para a próxima descarga parcial diminui. Assim, o tempo de atraso entre descargas parciais consecutivas é dependente da disponibilidade de elétrons livres e da taxa de decaimento das cargas acumuladas (NIEMEYER, 1995; GUTFLEISCH; NIEMEYER, 1995).

### 2.3 Tipos de descargas parciais

O fenômeno da descarga parcial pode ser observado em uma grande variedade de locais e meios em equipamentos de média/alta tensão. As DPs podem ocorrer em sólidos, líquidos, gases, e também nas interfaces entre dois meios diferentes. Segundo Arora e Mosch (2011), as DPs podem ser classificadas de acordo com a sua localização e com seu mecanismo de formação em três tipos principais: descargas internas, descargas superficiais e descargas corona. A Figura 2.5 apresenta exemplos dessas três formas de DPs.

Figura 2.5 – Tipos de descargas parciais: (a) internas, (b) superficiais, (c) corona.



Fonte: elaboração própria.

### 2.3.1 Descargas parciais internas

As descargas parciais internas podem ocorrer em uma inclusão gasosa totalmente circundada por um material dielétrico, na junção entre dois materiais dielétricos diferentes, ou ainda, na interface entre um material dielétrico e um condutor energizado (KREUGER, 1989). As DPs internas surgem porque, em geral, os materiais dielétricos sólidos e líquidos não são completamente uniformes (não homogêneos), uma vez que defeitos internos como cavidades, delaminações ou bolhas podem surgir devido a falhas nos processos de fabricação ou como consequências de estresses mecânicos, deterioração química, variações de temperatura, sobrecarga ou sobretensão durante a operação do equipamento elétrico (BOGGS, 1990; MASON, 1995). Estes defeitos internos são normalmente preenchidos com gases de menores rigidez e permissividade dielétrica quando comparadas às dos materiais dielétricos sólidos e líquidos que compõem os sistemas de isolamento. Assim, DPs internas são geradas como consequência da intensificação dos campos elétricos nas regiões defeituosas e das menores tensões de ruptura dos gases (PALITÓ, 2015).

Os danos causados pelas descargas parciais internas nos isolamentos de alta tensão podem ser muito graves com o passar do tempo. Eventos de descarga repetitivos podem causar deterioração mecânica e química do material dielétrico. Os danos são causados pela energia dissipada por elétrons ou íons de alta energia, luz ultravioleta das DPs, ozônio atacando as paredes das cavidades, e rachaduras à medida que os processos de degradação química liberam gases em alta pressão. A transformação química do dielétrico também tende a aumentar a sua condutividade elétrica nas proximidades da região defeituosa. Com isso, os estresses elétricos também são aumentados sobre regiões até então não defeituosas (TANAKA, 1986; CHUDNOVSKY, 2012).

A ocorrência contínua de DPs internas é uma das principais causas da aceleração do processo de arborescência elétrica. A arborescência elétrica é um fenômeno de pré-ruptura que ocorre no material dielétrico como resultado do efeito cumulativo de descargas parciais internas, as quais causam a formação de numerosos canais de descarga ramificados de baixa rigidez dielétrica e parcialmente condutores. A repetição de descargas parciais alonga gradualmente as ramificações devido à decomposição progressiva de elementos orgânicos. A arborescência elétrica pode evoluir até o momento em que os canais ramificados forneçam um caminho condutor completo entre os eletrodos energizados, resultando na ruptura completa do isolamento através de um curto-circuito (MORSHUIS, 2005; MONTANARI, 2009).

### 2.3.2 Descargas parciais superficiais

As descargas parciais superficiais são descargas que se propagam ao longo da interface entre um material dielétrico sólido ou líquido e um meio gasoso. Uma DP superficial é normalmente iniciada quando o campo elétrico tangencial à superfície do dielétrico é intenso o suficiente para exceder um certo valor crítico de ruptura (ARORA; MOSCH, 2011). As DPs superficiais são comumente observadas em saias de isoladores, cabos protegidos, terminações de cabos isolados e nos sistemas de alívio de barras e bobinas de geradores e motores de grande porte (KREUGER, 1989).

Este tipo de DP causa alterações na superfície do material dielétrico por meio de um fenômeno conhecido como trilhamento (*tracking*, em inglês), o qual gradualmente degrada o material dielétrico, podendo provocar até a ruptura completa (MASON, 1995). O trilhamento pode ser definido como a formação de trilhas condutoras carbonizadas que se propagam na superfície do material dielétrico ao longo da direção do campo elétrico (DA SILVA, 2014). O processo de formação destas trilhas se inicia a partir da contaminação da superfície do dielétrico que ocorre por meio da poluição atmosférica criando um filme contaminado ou rachaduras contaminadas. Assim, uma corrente de fuga flui pelos caminhos contaminados, gerando um intenso calor localizado. Este calor faz evaporar o filme contaminado, formando pequenas ilhas com o passar do tempo. Estas ilhas causam a interrupção do circuito da corrente de fuga, resultando no surgimento de pequenos arcos de descarga parcial que geram calor suficiente para carbonizar a superfície do material dielétrico (VELOSO, 2011).

### 2.3.3 Descargas corona

As descargas do tipo corona são descargas parciais externas observadas geralmente em meios gasosos nas proximidades de condutores de alta tensão. Estas descargas surgem como consequência da existência de pontas metálicas agudas ou de raios de curvatura pequenos nas extremidades de diversos componentes elétricos. Quando níveis muito elevados de tensão são aplicados, campos elétricos não uniformes e intensos são concentrados localmente em torno dessas regiões pontiagudas, causando a ionização e a ruptura dielétrica dos gases circundantes, o que dá origem às descargas parciais do tipo corona (KUFFEL, J.; ZAENGL; KUFFEL, P., 2000; CHUDNOVSKY, 2012).

Embora as descargas corona sejam em geral de baixa energia, após longos períodos de tempo estas podem ser prejudiciais aos materiais dielétricos próximos devido às reações químicas causadas. Durante o efeito corona, a ionização do ar converte oxigênio em ozônio, um gás altamente reativo que ataca quimicamente a isolamento polimérica, podendo causar

fissuramento. Os bombardeamentos físicos das superfícies dos materiais dielétricos por partículas de ar ionizado também causam deterioração (CHUDNOVSKY, 2012). Além disso, as descargas do tipo corona geram como subprodutos óxidos de nitrogênio. Estes gases quando combinados com vapor de água podem corroer metais e formar depósitos condutores na isolação, causando o trilhamento do material (MASON, 1995).

As descargas corona também geram efeitos luminosos e sonoros que são comumente observados em linhas de transmissão de energia elétrica de alta tensão. Segundo J. Kuffel, Zaengl e P. Kuffel (2000), as DPs do tipo corona também são responsáveis por causar perdas elétricas consideráveis ao longo destas linhas, podendo ocasionar ainda interferências em sinais de comunicação de rádio ou televisão.

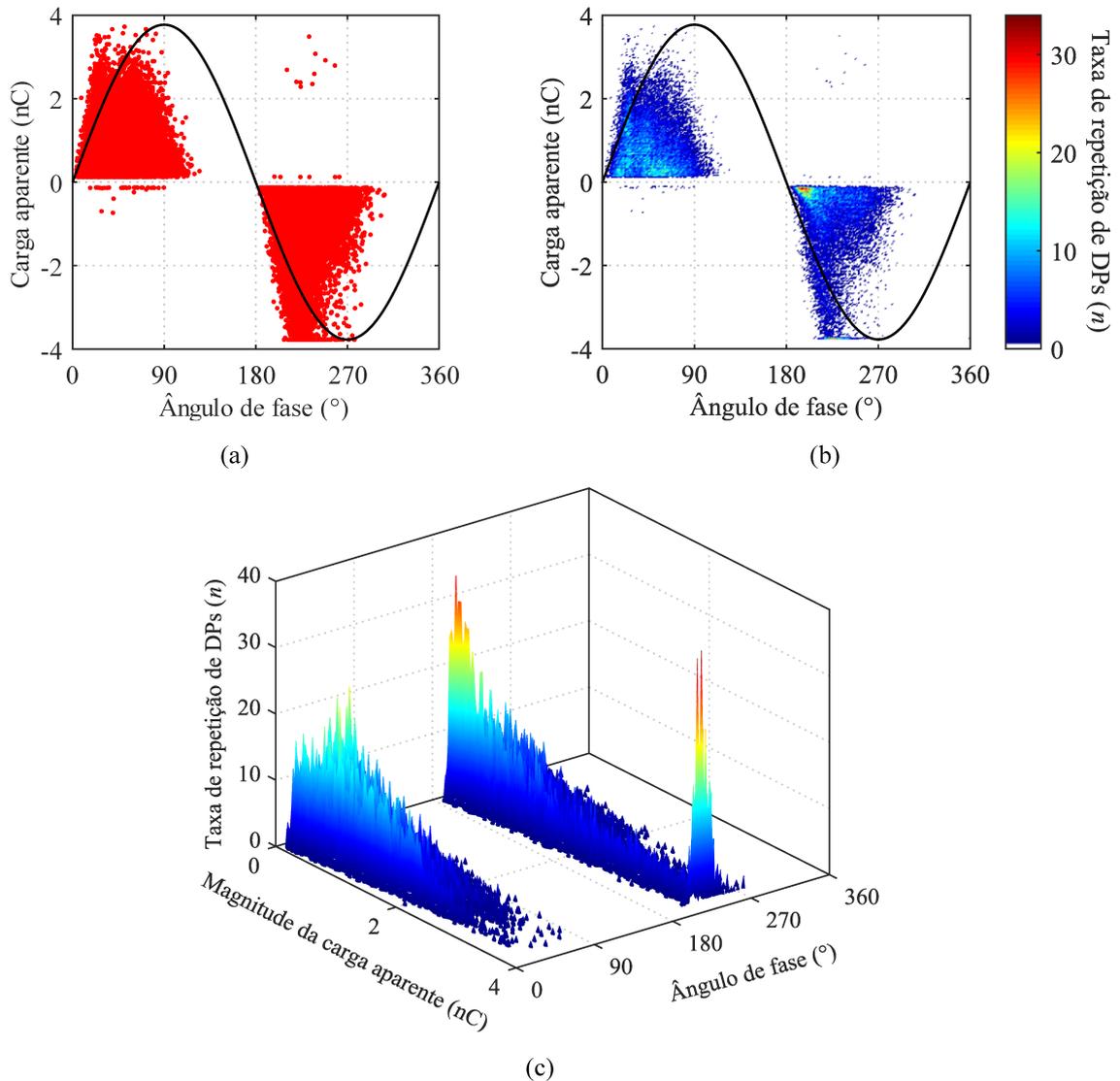
#### 2.4 Análise de dados de descargas parciais

Como as descargas parciais ocorrem de maneira estocástica e complexa, ferramentas sofisticadas foram desenvolvidas para avaliar os dados das DPs. Uma das técnicas mais aplicadas mundialmente por engenheiros e pesquisadores para este fim é a análise de padrões de DPs associadas à fase da tensão alternada, do inglês *Phase-Resolved Partial Discharge* (PRPD) (HUDON; BÉLEC, 2005). Neste tipo de análise, as cargas aparentes ( $q_{ap}$ ) das DPs registradas durante um certo intervalo de tempo são agrupadas de acordo com seus ângulos de fase de ocorrência ( $\varphi$ ), que são determinados em relação à onda senoidal da tensão de alimentação fase-neutro. Os valores de  $\varphi$  são confinados em apenas um ciclo da onda senoidal, ou seja,  $\varphi$  pode variar de 0 à 360° (HANG, 2015; HARMSEN, 2016). A Figura 2.6(a) apresenta um exemplo de padrão PRPD simples do tipo  $\varphi - q_{ap}$ .

Na prática, os equipamentos de medição registram os pulsos de DPs por longos períodos de tempo, havendo repetições de DPs com magnitudes e ângulos de fase iguais. Dessa forma, a taxa de repetição de DPs ( $n$ ) também é uma variável utilizada para compor o padrão PRPD. Os valores de  $n$  podem ser expressos através de uma escala de cores em um gráfico bidimensional como na Figura 2.6(b) ou em um gráfico tridimensional do tipo  $\varphi - q_{ap} - n$  como na Figura 2.6(c) (ILLIAS, 2011).

Neste trabalho, serão construídos apenas padrões PRPD simples, uma vez que para obter as taxas de repetições de DPs seriam demandados tempos de simulação muito elevados, o que impossibilitaria a realização de todas as análises propostas.

Figura 2.6 – Apresentação dos dados de uma descarga parcial: (a) padrão PRPD simples, (b) padrão PRPD com escala de cores, (c) padrão PRPD tridimensional.



Fonte: elaborado pelo autor com base nos dados experimentais obtidos por Jaramillo (2013).

A análise dos padrões PRPD é uma ótima técnica para o diagnóstico das condições de isolamento de equipamentos de média e alta tensão. Com uma interpretação correta do padrão PRPD é possível identificar o tipo de DP, sua gravidade e o local onde a mesma ocorreu. Esta técnica também possibilita uma discriminação eficiente entre os sinais de DP e os ruídos externos, uma vez que estes ruídos não estão correlacionados com a fase da tensão aplicada. Assim, é possível identificar DPs com magnitudes bem inferiores aos níveis dos ruídos externos. Além disso, através da avaliação estatística dos dados contidos nos padrões PRPD é possível alcançar uma alta sensibilidade de detecção para pulsos de DPs fracos, permitindo o reconhecimento do tipo de defeito que causou a DP, independentemente da magnitude da carga aparente (FUHR; ASCHWANDEN, 2017; FLORKOWSKI, 2021).

Apesar dessas vantagens, em equipamentos elétricos onde há a presença simultânea de diferentes fontes de DPs, a interpretação de padrões PRPD pode ser dificultada. Nestes casos, talvez seja necessária a aplicação de técnicas de *clustering* (agrupamento), para separar cada fonte de DP através da extração de características similares dos pulsos registrados. Para tal propósito, algoritmos sofisticados como *K-means*, *Fuzzy C-means* ou DBSCAN podem ser utilizados (WU *et al.*, 2015).

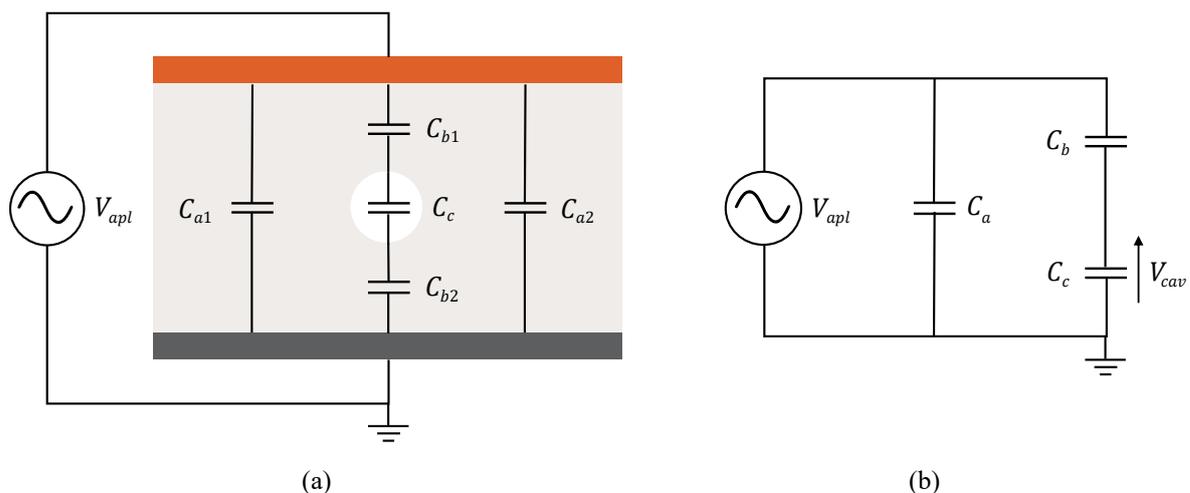
## 2.5 Modelos de simulação de descargas parciais

A modelagem numérica de descargas parciais tem sido desenvolvida ao longo de várias décadas com o objetivo de simular em computadores este fenômeno frequentemente observado no sistema elétrico. Nesta seção serão apresentados os cinco principais modelos encontrados na literatura para simular descargas parciais em cavidades internas.

### 2.5.1 Modelo abc capacitivo

O modelo abc capacitivo ou modelo de três capacitâncias foi a primeira tentativa de descrever os mecanismos das descargas parciais, sendo inicialmente proposto por Gemant e Philippoff (1932) e posteriormente adaptado por Whitehead (1951). Neste modelo, o material dielétrico e a cavidade de ar entre os eletrodos são representados como capacitâncias em um circuito elétrico (ILLIAS, 2011), conforme ilustrado na Figura 2.7.

Figura 2.7 – Modelo abc capacitivo: (a) circuito geral, (b) circuito equivalente.



Fonte: adaptado de Illias (2011).

Na Figura 2.7(a),  $C_{a1}$  e  $C_{a2}$  representam as capacitâncias das partes saudáveis do dielétrico,  $C_{b1}$  e  $C_{b2}$  correspondem às capacitâncias das partes do dielétrico que estão em série

com a cavidade,  $C_c$  equivale a capacitância da cavidade de ar,  $V_{apl}$  é a tensão aplicada e  $V_{cav}$  é a tensão na cavidade. O circuito da Figura 2.7(a) pode ser reduzido para o formato apresentado na Figura 2.7(b), onde  $C_a$  é a capacitância equivalente de  $C_{a1}$  com  $C_{a2}$  em paralelo e  $C_b$  é a capacitância equivalente de  $C_{b1}$  com  $C_{b2}$  em série (ILLIAS, 2011).

Neste modelo, a ocorrência e o término de uma DP dependem de  $V_{cav}$ . Quando  $V_{cav}$  exceder a tensão de ruptura ( $V_{rup}$ ), uma DP se inicia na cavidade. Esta DP é interrompida somente quando  $V_{cav}$  for menor que a tensão de extinção ( $V_{ext}$ ). Durante a descarga,  $C_c$  é curto-circuitada, causando o surgimento de uma rápida corrente transitória que flui no circuito (ILLIAS, 2011). Com base na análise dos processos de carga-descarga dos capacitores, a magnitude da carga aparente que reflete a intensidade da DP pode ser calculada (HAUSCHILD; LEMKE, 2019).

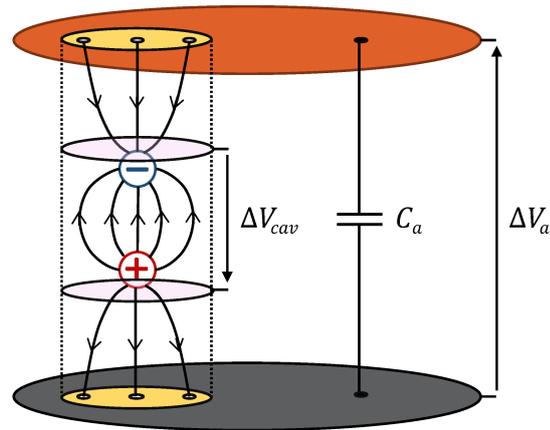
O modelo abc capacitivo é relativamente simples e é amplamente utilizado para descrever os comportamentos transitórios das descargas parciais de um ponto de vista macroscópico (BORGHEI, 2020). No entanto, este modelo não é adequado para representar o processo físico que ocorre efetivamente durante a DP, porque a interface entre uma cavidade real e o material dielétrico não é equipotencial, uma vez que cargas elétricas são armazenadas na superfície da cavidade após a ocorrência da DP (ILLIAS, 2011).

### 2.5.2 Modelo da carga induzida

O modelo da carga induzida foi desenvolvido por Pedersen, Crichton e McAllister (1991) que aplicaram a teoria eletromagnética para descrever o transiente da descarga parcial com base no conceito de momento de dipolo. De acordo com Pedersen, Crichton e McAllister (1995), cargas elétricas de polaridades opostas são acumuladas nas faces superior e inferior da cavidade durante a ocorrência da descarga parcial, estabelecendo um momento de dipolo com orientação contrária ao do campo elétrico aplicado. Com isso, o campo elétrico é reduzido na cavidade e a descarga é finalizada no instante em que o valor de extinção é atingido. A Figura 2.8 ilustra a formação do momento de dipolo e o respectivo campo elétrico gerado.

Após o fim da DP, as cargas elétricas armazenadas na superfície da cavidade induzirão uma distribuição de carga proporcional nos eletrodos de alta tensão (PEDERSEN; CRICHTON; MCALLISTER, 1991, 1995). A carga induzida ( $q_{ind}$ ) é expressa pela diferença entre a carga medida no eletrodo antes e depois da ocorrência da DP na cavidade (ILLIAS, 2011), podendo ser calculada através da Equação (2.1).

Figura 2.8 – Formação do momento de dipolo no modelo da carga induzida.



Fonte: adaptado de Hauschild e Lemke (2019).

$$q_{ind} = -\vec{\mu} \cdot \nabla \lambda = - \left( \int_s \vec{r} \sigma dS \right) \cdot \nabla \lambda \quad (2.1)$$

Na Equação (2.1),  $\vec{\mu}$  é o momento de dipolo devido às cargas acumuladas na superfície da cavidade  $S$ ,  $\vec{r}$  é o vetor radial ao longo da superfície  $S$ ,  $\sigma$  é a densidade de carga na superfície  $S$  e  $\lambda$  é uma função escalar adimensional que depende da localização de  $dS$ , sendo obtida a partir da equação de Laplace (ILLIAS, 2011).

Embora este modelo forneça boas explicações sobre o processo físico envolvido na DP, pode ser muito complicado aplicá-lo em geometrias mais sofisticadas, uma vez que este modelo só pode ser utilizado para casos onde a distribuição do campo elétrico é uniforme. Além disso, neste modelo é assumido que todo o volume da cavidade é afetado pela DP, o que na prática não é verdade, pois para formação do canal de propagação da DP apenas uma parte do volume da cavidade é envolvida (BORGHEI, 2020).

### 2.5.3 Modelo analítico generalizado

O modelo analítico generalizado proposto por Niemeyer (1995) é conhecido por ser a base para a maioria dos trabalhos reportados na literatura sobre modelagem de DPs. Este modelo descreve com detalhes os mecanismos da descarga parcial do tipo *streamer*, apresenta equações para modelagem da geração dos elétrons iniciais e possibilita determinar as magnitudes das cargas real e aparente da DP. Para modelar o processo de ocorrência da DP, a equação de Poisson é resolvida a fim de encontrar o campo elétrico na cavidade e o fator de intensificação de campo na cavidade é calculado. Este fator é usado para determinar as

contribuições do campo elétrico devido à tensão externa aplicada e do campo elétrico devido às cargas acumuladas na superfície da cavidade (NIEMEYER, 1995; ILLIAS, 2011).

Neste modelo, as duas condições para ocorrência da DP são analisadas a cada passo de tempo de integração na simulação computacional. A primeira condição é tratada como determinística, com a magnitude do campo elétrico na cavidade sendo comparada com o valor inicial de ruptura a cada instante de tempo. O campo de ruptura inicial depende do comprimento da cavidade na direção da DP e da pressão do gás. A segunda condição, relacionada à necessidade de existir pelo menos um elétron livre para iniciar o processo de ionização, é considerada um processo estocástico. Para avaliar esta segunda condição, uma função de probabilidade relacionada a uma taxa de geração de elétrons é definida, e o valor gerado por ela a cada passo de tempo é comparado com um número aleatório que varia entre 0 e 1, a fim de confirmar a DP quando a probabilidade exceder este número (NIEMEYER, 1995, CALLENDER, 2018). Além disso, Niemeyer (1995) considerou a taxa de geração de elétrons dependente dos processos de emissão de superfície e de ionização de volume.

A magnitude da carga real da DP é determinada por  $c\Delta V_{DP}$ , onde  $\Delta V_{DP}$  é a queda de tensão ao longo da cavidade durante a ocorrência da DP e  $c$  é a capacitância da cavidade que depende da geometria da cavidade (NIEMEYER, 1995). A magnitude da carga aparente é calculada com base na carga induzida no eletrodo de medição, a qual é dependente da localização e do formato da cavidade, da pressão do gás e da orientação da cavidade em relação ao campo elétrico aplicado (CRICHTON; KARLSSON; PEDERSEN; 1989; PEDERSEN; CRICHTON; MCALLISTER, 1995; NIEMEYER, 1995; MCALLISTER, 1997).

As simulações realizadas com este modelo revelaram concordância com dados experimentais qualitativa e quantitativamente, embora tenha havido uma pequena discordância nas distribuições de fase e magnitude nos padrões PRPD (ILLIAS, 2011). Além disso, foram encontradas algumas inconsistências em certas equações governantes do modelo, pois não está totalmente claro se muitas das suposições feitas são justificadas. Como desvantagem, o modelo é fortemente dependente de parâmetros não mensuráveis, os quais devem ser ajustados para diferentes conjuntos de dados experimentais (CALLENDER, 2018).

#### 2.5.4 Modelo de elementos finitos

Os avanços tecnológicos das últimas décadas na área da computação tornaram viável a modelagem da atividade da DP com o uso de *softwares* que empregam o método dos elementos finitos (MEF). O MEF é um método numérico que consiste em reduzir um problema descrito

por equações diferenciais de solução complexa, em vários problemas pequenos, descritos por equações mais simples e com soluções menos trabalhosas. Esta redução é feita através da discretização do domínio do problema em malhas compostas por vários elementos finitos, como triângulos ou quadriláteros (OLIVEIRA, 2013).

O primeiro modelo baseado neste método foi proposto por Forssén (2008), o qual foi utilizado para estudar o comportamento de DPs em uma cavidade de ar cilíndrica interna a um material dielétrico submetido a tensões com diferentes frequências. Neste modelo, o campo elétrico foi calculado numericamente através da aplicação do MEF, enquanto que o processo da descarga foi modelado dinamicamente por meio do aumento da condutividade da cavidade cilíndrica. A carga aparente da DP foi calculada integrando a corrente através do eletrodo de aterramento durante o tempo de atividade da DP. O decaimento das cargas superficiais foi modelado pela alteração do valor da condutividade da superfície da cavidade. Em geral, os resultados obtidos nas simulações realizadas por Forssén (2008) na faixa de frequência de 0,01 Hz a 100 Hz mostraram concordância quando comparados com dados experimentais, porém com pequenas diferenças, possivelmente devido às simplificações feitas na modelagem da taxa de geração de elétrons inicial.

Posteriormente, Illias (2011) aprimorou o modelo de Forssén (2008) para simular DPs em uma cavidade de ar esférica, considerando em seu modelo a emissão de superfície, o efeito do decaimento das cargas através da condução da parede da cavidade e a variação da temperatura e da pressão na cavidade durante o processo de descarga. Este modelo possui ampla validação experimental e foi testado em diferentes estudos de casos, nos quais foram avaliados os comportamentos das DPs ao variar o tamanho e a localização da cavidade (ILLIAS; CHEN; LEWIN, 2011a), a amplitude e a frequência da tensão aplicada (ILLIAS; CHEN; LEWIN, 2011b), a temperatura do material (ILLIAS; CHEN; LEWIN, 2012), entre outras circunstâncias (ILLIAS *et al.*, 2012, 2013, 2014). Recentemente, tal modelo também foi utilizado para simular DPs internas em bobinas estatóricas de máquinas elétricas (FERREIRA, 2017).

O modelo proposto por Illias (2011) pode exigir tempos de simulação elevados dependendo da quantidade de elementos da malha e do passo de tempo de integração, porém fornece resultados muito mais precisos do que os outros modelos mencionados anteriormente, uma vez que as variáveis físicas são calculadas numericamente em todas as regiões da geometria. Além disso, também não há restrições na geometria, o que possibilita considerar a distribuição não-uniforme do campo elétrico para a modelagem das DPs. Outra vantagem deste modelo é que as cargas reais e aparentes das DPs são calculadas através de integrações numéricas com alta precisão, sem a necessidade do uso de expressões analíticas ou

aproximações (ILLIAS, 2011). Por esses motivos, este modelo será usado como base para o desenvolvimento desta dissertação, sendo explicado com mais detalhes no Capítulo 3.

### **2.5.5 Modelo de plasma**

Uma abordagem mais rigorosa para modelar a atividade da DP foi proposta recentemente por Callender (2018), o qual considerou explicitamente a dinâmica do plasma envolvido no processo da descarga. Este é um modelo avançado que simula a ocorrência da DP de forma detalhada usando equações de fluidos para quantificar processos físicos como ionização por impacto, fixação, recombinação, difusão e desvio de cargas (CALLENDER, 2018). Diferentes geometrias, gases, efeitos de superfície e condições foram considerados no processo de simulação. O modelo de plasma também permite analisar DPs em cavidades internas durante diferentes estágios de atividade. Os resultados obtidos nas simulações com este modelo mostraram boa concordância quando comparados com valores medidos (CALLENDER, 2018; RODRÍGUEZ-SERNA *et al.*, 2020).

Embora este modelo seja capaz de descrever com elevada precisão os mecanismos e fenômenos associados às DPs, existem muitos parâmetros físicos empregados no modelo que precisam ser determinados experimentalmente. Estes parâmetros não podem ser generalizados, pois assumem valores diferentes de acordo com a geometria e às condições de cada objeto de teste (CALLENDER, 2018, BORGHEI, 2020). Além disso, como o modelo de plasma é muito complexo, o poder computacional exigido é enorme, o que dificulta a simulação de várias DPs em sequência, tornando inviável, por exemplo, a obtenção de padrões PRPD (RODRÍGUEZ-SERNA *et al.*, 2020).

## **2.6 Distorções harmônicas e seus efeitos sobre as descargas parciais**

Em geral, os testes em laboratório para detecção e avaliação de DPs são realizados por meio da aplicação de tensões alternadas puramente senoidais. No entanto, devido às adversidades da rede elétrica, é muito comum que um equipamento elétrico seja submetido, em algum momento de seu ciclo operativo, a tensões com formas de onda distorcidas por componentes harmônicas. Dessa forma, nesta seção é feita uma breve introdução sobre as distorções harmônicas em geral e seus impactos sobre a ocorrência de descargas parciais.

### **2.6.1 Conceituação das distorções harmônicas**

Segundo De La Rosa (2006), uma componente harmônica em um sistema de potência CA é definida como uma componente senoidal de uma forma de onda periódica que tem uma

frequência igual a um inteiro múltiplo da frequência fundamental do sistema. Por exemplo, em um sistema cuja frequência fundamental é igual a 50 Hz, uma componente senoidal com frequência igual a 150 Hz é dita componente de terceira harmônica. Neste caso, a ordem harmônica ( $h$ ) deste sinal é igual a três. As componentes harmônicas quando somadas com a fundamental podem causar deformações tanto nas formas de onda de tensão quanto de corrente, gerando grandes problemas para o sistema elétrico.

A identificação das componentes harmônicas em uma forma de onda distorcida é normalmente feita com base no teorema de Fourier, que diz que qualquer função periódica não senoidal pode ser representada por um somatório que contém uma componente senoidal com frequência fundamental, componentes senoidais com frequências múltiplas inteiras da fundamental (harmônicas) e eventualmente uma componente contínua (DE LA ROSA, 2006), conforme expresso nas Equações (2.2) e (2.3), para tensão e corrente, respectivamente:

$$v(t) = V_{cc} + V_1 \text{sen}(2\pi f_1 t + \varphi_1) + \sum_{h \neq 1}^{\infty} V_h \text{sen}(h 2\pi f_1 t + \varphi_h) \quad (2.2)$$

$$i(t) = I_{cc} + I_1 \text{sen}(2\pi f_1 t + \theta_1) + \sum_{h \neq 1}^{\infty} I_h \text{sen}(h 2\pi f_1 t + \theta_h) \quad (2.3)$$

onde:

$f_1$  é a frequência fundamental;

$h$  é a ordem harmônica;

$V_{cc}$  e  $I_{cc}$  são as componentes contínuas de tensão e corrente;

$V_1$  e  $I_1$  são as amplitudes das ondas senoidais de tensão e corrente da componente fundamental;

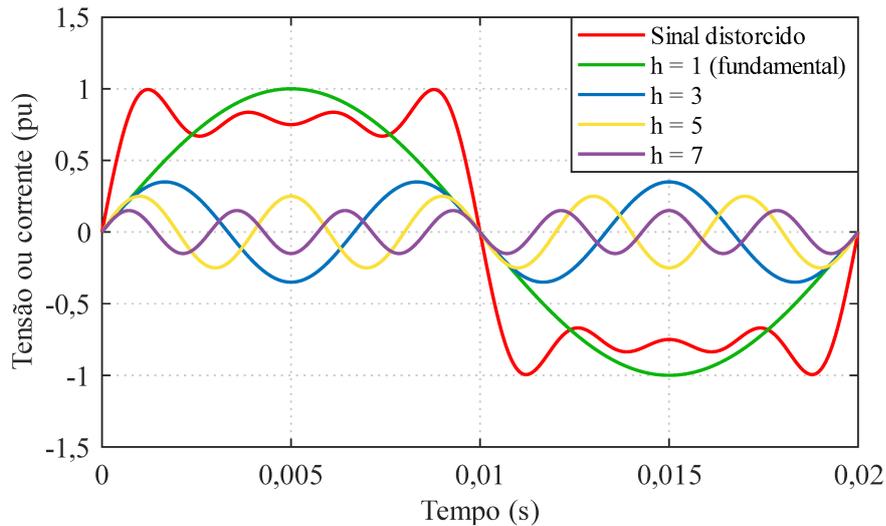
$V_h$  e  $I_h$  são as amplitudes das ondas senoidais de tensão e corrente da componente harmônica;

$\varphi_1$  e  $\theta_1$  são os ângulos de fase das ondas senoidais de tensão e corrente da componente fundamental;

$\varphi_h$  e  $\theta_h$  são os ângulos de fase das ondas senoidais de tensão e corrente da componente harmônica.

A aplicação da série de Fourier possibilita que cada componente harmônica seja analisada individualmente, sendo que a distorção final é obtida pela superposição das diversas componentes que compõem o sinal distorcido. Como exemplo, a Figura 2.9 ilustra a decomposição de uma forma de onda distorcida através de sua componente fundamental e de suas componentes harmônicas de terceira, quinta e sétima ordem.

Figura 2.9 – Decomposição de uma forma de onda distorcida através de suas componentes harmônicas.



Fonte: elaboração própria.

### 2.6.2 Causas e consequências gerais das distorções harmônicas

As distorções harmônicas no sistema de energia elétrica são causadas pela presença de cargas não-lineares e de unidades geradoras conectadas via conversores de frequência. As cargas não-lineares integram uma categoria de dispositivos e elementos elétricos nos quais a relação entre os valores de tensão e de corrente não obedecem à lei de Ohm. Alguns exemplos deste tipo de carga são: transformadores, máquinas rotativas, fornos a arco, lâmpadas fluorescentes e de LED, dispositivos eletrônicos, eletrodomésticos com fonte chaveada, *dimmers*, entre outros (WAKILEH, 2001; DE LA ROSA, 2006).

A circulação de componentes harmônicas pela rede elétrica afeta a qualidade da energia transmitida e pode originar diversos efeitos danosos, tanto para os equipamentos operacionais do sistema quanto para as cargas conectadas no mesmo. De acordo com Wakileh (2001) e De La Rosa (2006), alguns destes efeitos são listados abaixo:

- aumento das perdas no ferro e no cobre de transformadores e motores causando diminuição do rendimento e sobreaquecimento;
- aumento de vibrações e ruídos das máquinas elétricas em geral;
- aumento da corrente eficaz do sistema gerando sobrecarga;
- aumento da corrente que circula no neutro do sistema devido às componentes de terceira harmônica que são de sequência zero;
- aumento das perdas elétricas em cabos devido ao agravamento do efeito pelicular, o qual possui relação com a frequência;
- ressonância entre bancos de capacitores e reatâncias indutivas;

- interferências em sistemas de comunicação ou linhas telefônicas;
- ampliação dos estresses elétricos e térmicos que atuam sobre os materiais dielétricos que compõem os sistemas de isolamento.

### 2.6.3 Indicadores de distorção harmônica e limites definidos pelas normas técnicas

Devido à gravidade dos efeitos mencionados acima, as normas técnicas brasileiras que regulam a transmissão e a distribuição de energia elétrica definiram alguns indicadores para avaliação e limitação dos níveis de distorção harmônica de tensão no sistema (ONS, 2021; ANEEL, 2021). Estes indicadores estão listados na Tabela 2.1 a seguir:

Tabela 2.1 – Indicadores de distorção harmônica de tensão.

Indicador	Descrição
$DIT_h\%$	Distorção harmônica individual de tensão de ordem $h$
$DTT\%$	Distorção harmônica total de tensão
$DTT_p\%$	Distorção harmônica total de tensão para as componentes pares não múltiplas de 3
$DTT_i\%$	Distorção harmônica total de tensão para as componentes ímpares não múltiplas de 3
$DTT_3\%$	Distorção harmônica total de tensão para as componentes múltiplas de 3
$DTT_{95}\%$	Valor do indicador $DTT\%$ que foi superado em apenas 5% das 1008 leituras válidas
$DTT_{p,95}\%$	Valor do indicador $DTT_p\%$ que foi superado em apenas 5% das 1008 leituras válidas
$DTT_{i,95}\%$	Valor do indicador $DTT_i\%$ que foi superado em apenas 5% das 1008 leituras válidas
$DTT_{3,95}\%$	Valor do indicador $DTT_3\%$ que foi superado em apenas 5% das 1008 leituras válidas

Fonte: ONS (2021) e ANEEL (2021).

O indicador de distorção harmônica individual de tensão é calculado através da Equação (2.4):

$$DIT_h\% = \frac{V_h}{V_1} \times 100 \quad (2.4)$$

Os demais indicadores mostrados na Tabela 2.1 são calculados de acordo com as Equações (2.5), (2.6), (2.7) e (2.8):

$$DTT\% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{m\acute{a}x}} V_h^2}}{V_1} \times 100 \quad (2.5)$$

onde:

$h$  = todas as ordens harmônicas de 2 até  $h_{m\acute{a}x}$  ;

$h_{m\acute{a}x}$  = máxima ordem harmônica.

$$DTT_p \% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_p} V_h^2}}{V_1} \times 100 \quad (2.6)$$

onde:

$h$  = todas as ordens harmônicas pares, não múltiplas de 3 ( $h = 2, 4, 8, 10, 14, 16, 20, \dots$ ).

$h_p$  = máxima ordem harmônica par, não múltipla de 3.

$$DTT_i \% = \frac{\sqrt{\sum_{h=5}^{h_i} V_h^2}}{V_1} \times 100 \quad (2.7)$$

onde:

$h$  = todas as ordens harmônicas ímpares, não múltiplas de 3 ( $h = 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23, \dots$ ).

$h_i$  = máxima ordem harmônica ímpar, não múltipla de 3.

$$DTT_3 \% = \frac{\sqrt{\sum_{h=3}^{h_3} V_h^2}}{V_1} \times 100 \quad (2.8)$$

onde:

$h$  = todas as ordens harmônicas múltiplas de 3 ( $h = 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21, \dots$ ).

$h_3$  = máxima ordem harmônica múltipla de 3.

Os limites estabelecidos pelas normas técnicas ONS (2021) e ANEEL (2021) para os indicadores de distorção harmônica de tensão estão apresentados nas Tabelas 2.2, 2.3 e 2.4. Estes limites se referem aos valores medidos no ponto de acoplamento comum (PAC), que é um ponto no sistema elétrico onde uma carga específica compartilha da mesma tensão de outras cargas conectadas. Vale ressaltar que nos procedimentos de rede do ONS são definidos limites globais inferiores e superiores, e tmbm limites individuais para os indicadores  $DIT_h\%$  e  $DTT95\%$ , enquanto que nos procedimentos de distribuio da ANEEL so so estipulados limites gerais para os indicadores  $DTT95\%$ ,  $DTT_p95\%$ ,  $DTT_i95\%$  e  $DTT_395\%$ .

De acordo com ONS (2021), para determinao dos limites globais superiores, basta multiplicar os limites globais inferiores definidos na Tabela 2.2 pelo fator 4/3. Como exemplo, os limites globais superiores dos indicadores  $DTT95\%$  para  $V_n < 69$  kV e  $V_n \geq 69$  kV são, respectivamente, 8% e 4%.

Tabela 2.2 – Limites globais inferiores para os indicadores  $DIT_h\%$  e  $DTT95\%$  de acordo com os procedimentos de rede do ONS.

$V_n < 69 \text{ kV}$				$V_n \geq 69 \text{ kV}$			
$DIT_h\%, h \text{ ímpar}$		$DIT_h\%, h \text{ par}$		$DIT_h\%, h \text{ ímpar}$		$DIT_h\%, h \text{ par}$	
Ordem	Valor (%)	Ordem	Valor (%)	Ordem	Valor (%)	Ordem	Valor (%)
3, 5, 7	5%			3, 5, 7	2%		
		2, 4, 6	2%			2, 4, 6	1%
9, 11, 13	3%			9, 11, 13	1,5%		
		$\geq 8$	1%			$\geq 8$	0,5%
15 a 25	2%			15 a 25	1%		
$\geq 27$	1%			$\geq 27$	0,5%		
<b><math>DTT95\% = 6\%</math></b>				<b><math>DTT95\% = 3\%</math></b>			

Fonte: ONS (2021).

Tabela 2.3 – Limites individuais para os indicadores  $DIT_h\%$  e  $DTT95\%$  de acordo com os procedimentos de rede do ONS.

$13,8 \text{ kV} \leq V_n < 69 \text{ kV}$				$V_n \geq 69 \text{ kV}$			
$DIT_h\%, h \text{ ímpar}$		$DIT_h\%, h \text{ par}$		$DIT_h\%, h \text{ ímpar}$		$DIT_h\%, h \text{ par}$	
Ordem	Valor (%)	Ordem	Valor (%)	Ordem	Valor (%)	Ordem	Valor (%)
3 a 25	1,5%			3 a 25	0,6%		
		todos	0,6%			todos	0,3%
$\geq 27$	0,7%			$\geq 27$	0,4%		
<b><math>DTT95\% = 3\%</math></b>				<b><math>DTT95\% = 1,5\%</math></b>			

Fonte: ONS (2021).

Tabela 2.4 – Limites das distorções harmônicas totais de acordo com os procedimentos de distribuição da ANEEL.

Indicador	Tensão nominal		
	$V_n \leq 2,3 \text{ kV}$	$2,3 \text{ kV} < V_n < 69 \text{ kV}$	$69 \text{ kV} \leq V_n < 230 \text{ kV}$
$DTT95\%$	10%	8%	5%
$DTT_p95\%$	2,5%	2%	1%
$DTT_i95\%$	7,5%	6%	4%
$DTT_395\%$	6,5%	5%	3%

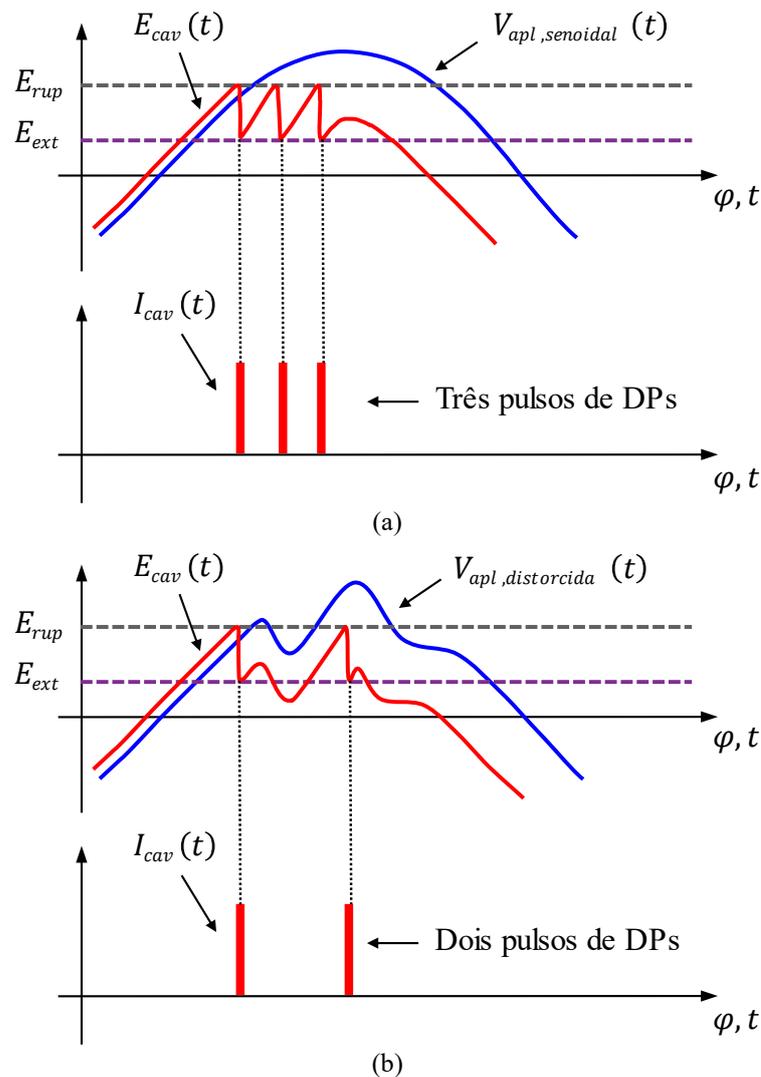
Fonte: ANEEL (2021).

### 2.6.4 Influência das distorções harmônicas sobre a ocorrência de descargas parciais

A incidência de descargas parciais em determinado defeito na isolação é afetada por vários fatores, sendo um deles a tensão aplicada. Diferentes tipos de tensão aplicada podem levar à obtenção de diferentes padrões PRPD e, conseqüentemente, a diferentes diagnósticos sobre o desempenho da isolação (ILLIAS *et al.*, 2012). Uma vez que a forma de onda da tensão é deformada na presença de componentes harmônicas, então é esperado que a atividade das DPs também seja impactada por esse fator.

A fim de ilustrar como as distorções harmônicas de tensão podem afetar as características das DPs, um mecanismo simples de ocorrência de DPs relacionado à condição do campo elétrico em uma cavidade de ar interna é ilustrado na Figura 2.10.

Figura 2.10 – Mecanismo de ocorrência de descargas parciais com a aplicação de tensões alternadas: (a) senoidal, (b) distorcida por componentes harmônicas.



Fonte: adaptado de Florkowski, Florkowska e Zydroń (2018).

Nas Figuras 2.10(a) e 2.10(b), considera-se que foram aplicadas tensões com formas de onda puramente senoidal e distorcida, respectivamente. Dessa forma, também são gerados campos elétricos na cavidade ( $E_{cav}(t)$ ) com formas de onda semelhantes às das tensões. Por simplificação, assume-se que uma DP acontece na cavidade de forma determinística toda vez que  $E_{cav}(t)$  atinge o valor do campo elétrico de ruptura ( $E_{rup}$ ), sendo interrompida quando  $E_{cav}(t)$  se reduz ao valor do campo elétrico de extinção ( $E_{ext}$ ).

Analisando o primeiro caso mostrado na Figura 2.10(a), observa-se a ocorrência de três DPs em ângulos de fase específicos. Já no segundo caso, como constatado na Figura 2.10(b), apenas duas DPs são verificadas devido à deformação da forma de onda da tensão. Além disso, nota-se também um maior deslocamento de fase entre a primeira e a segunda DP. Isso é explicado pelo fato de que a adição de componentes harmônicas causou o surgimento de pontos de inflexão na forma de onda da tensão, alterando localmente as variações  $dV_{apl}(t)/dt$ , e influenciando também, por consequência, a intensificação ou redução momentânea do campo elétrico na cavidade. Portanto, as distorções harmônicas são capazes de impactar a quantidade de DPs geradas e os ângulos de fase de ocorrência das DPs. Isso justifica as alterações observadas em padrões PRPD, conforme reportado na literatura (FLORKOWSKI *et al.*, 2013).

## 2.7 Considerações finais

Este capítulo apresentou conceitos teóricos importantes sobre o fenômeno da descarga parcial, os quais são necessários para compreensão do trabalho desenvolvido. Foi mostrado, por exemplo, que para uma DP ocorrer, a presença de um campo elétrico intenso não é suficiente, sendo necessária a existência de pelo menos um elétron livre para desencadear o processo de ionização. Esta necessidade torna a DP um fenômeno estocástico, pois é dependente dos mecanismos de geração de elétrons iniciais por emissão de superfície e ionização de volume. Também foi visto neste capítulo que as DPs são classificadas majoritariamente em três tipos: internas, superficiais e corona. Cada tipo de DP possui origens e características singulares, conforme explicado em detalhes. O principal modo de representação dos dados de DPs, o padrão PRPD, foi apresentado tanto na sua forma em 2D, quanto em 3D. Através da análise de um padrão PRPD é possível obter informações cruciais a respeito do tipo de DP e da condição da isolamento. Ainda neste capítulo, analisou-se criticamente cinco modelos reportados na literatura para simulação de DPs, optando-se pelo modelo de elementos finitos para continuidade do trabalho. Por fim, foram revisados fundamentos sobre as distorções harmônicas de tensão, sendo mostrado também, de forma introdutória, alguns de seus efeitos sobre as DPs.

## CAPÍTULO 3

---

---

### MODELAGEM DE DESCARGAS PARCIAIS

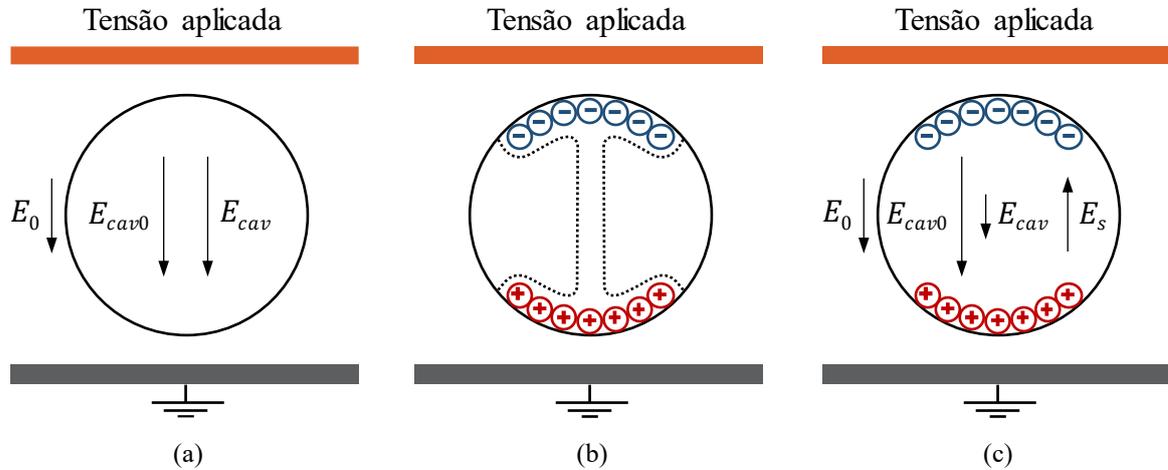
A descarga parcial é um fenômeno complexo, altamente estocástico e que está sujeito à influência de uma série de fatores, o que torna a sua modelagem desafiadora. Apesar disso, para analisar mais profundamente o comportamento das DPs, um modelo de simulação é necessário, o qual é desenvolvido neste capítulo. Este modelo é baseado no modelo de elementos finitos proposto por Illias (2011), que tem como escopo a simulação de DPs em cavidades internas com formatos esféricos. Neste capítulo, todas as etapas da modelagem das DPs são descritas com detalhes, juntamente com as equações utilizadas. O algoritmo implementado também é explicado. Além disso, no final do capítulo o modelo é validado através da comparação entre dados simulados e experimentais.

#### 3.1 Descargas parciais em cavidades e o mecanismo do *streamer*

Antes de iniciar a modelagem matemática das DPs, é necessário compreender as características de formação do *streamer*, que é um canal ionizado criado por ramos de avalanches de elétrons em decorrência do movimento de elétrons livres sob a influência de um campo elétrico aplicado (ILLIAS, 2011; FERREIRA, 2017). As descargas do tipo *streamer* foram escolhidas para modelagem neste trabalho porque são intensas o suficiente para serem detectadas por equipamentos de medição, danificam significativamente os materiais dielétricos e são precursoras de outros tipos de descargas mais severas (NIEMEYER, 1995; CALLENDER, 2018). Em geral, estas DPs são caracterizadas por pulsos com duração de 1 a 100 ns e com magnitudes superiores a 10 pC (NIEMEYER, 1995).

Durante uma DP interna, a condutividade do *streamer* aumenta devido ao movimento de elétrons livres, causando o aumento da corrente na cavidade. Isso faz com que a condutividade do meio gasoso na cavidade também seja incrementada. Além disso, a temperatura e a pressão do gás na cavidade também aumentam por causa da energia liberada no processo de ionização. Conforme o *streamer* se desenvolve, o campo elétrico na cavidade decai (ILLIAS, 2011; FERREIRA, 2017). A Figura 3.1 é apresentada na sequência com o intuito de ilustrar este evento.

Figura 3.1 – Diagrama esquemático do processo de ocorrência de uma DP interna: (a) antes da DP, (b) durante a DP, (c) após a DP.



Fonte: adaptado de Illias (2011).

Em relação à Figura 3.1(a), ao aplicar uma tensão em um material dielétrico contendo uma cavidade interna, dois campos elétricos podem ser distinguidos: o campo elétrico no material dielétrico ( $E_0(t)$ ) e o campo elétrico na cavidade ( $E_{cav}(t)$ ) (ILLIAS, 2011; FERREIRA, 2017). Inicialmente,  $E_{cav}(t)$  é igual ao campo de Laplace ( $E_{cav0}(t)$ ), dado pela Equação (3.1):

$$E_{cav0}(t) = f_c E_0(t) \quad (3.1)$$

Na Equação (3.1),  $E_{cav0}(t)$  é campo elétrico na cavidade sem a ocorrência de nenhuma DP e  $f_c$  é o fator de intensificação do campo elétrico aplicado na cavidade, o qual é dependente da geometria da cavidade e da permissividade relativa do material dielétrico ( $\epsilon_{rd}$ ) (ILLIAS, 2011; FERREIRA, 2017).

Durante a DP, cargas de sinais opostos atingem as extremidades da superfície da cavidade, conforme pode ser visto na Figura 3.1(b). O acúmulo de cargas na superfície da cavidade origina um campo elétrico oposto à  $E_{cav0}(t)$ , o qual é denotado por  $E_s(t)$  e é conhecido como campo de Poisson (ILLIAS, 2011; FERREIRA, 2017). Dessa forma, o campo elétrico resultante na cavidade é composto por duas parcelas, como mostra a Equação (3.2):

$$E_{cav}(t) = E_{cav0}(t) + E_s(t) \quad (3.2)$$

Como a cavidade se torna condutora durante a DP, o campo elétrico  $E_{cav}(t)$  é rapidamente reduzido, uma vez que a descarga ocorre de forma transitória por alguns nanossegundos. Devido à redução de  $E_{cav}(t)$ , os elétrons livres na cavidade perdem energia, fazendo com que a corrente e a condutividade do *streamer* também diminuam. Quando o campo

elétrico na cavidade se torna menor do que o campo elétrico de extinção ( $E_{ext}$ ), o *streamer* colapsa e a descarga é interrompida (ILLIAS, 2011). Conforme mostrado na Figura 3.1(c), após o fim da DP,  $E_{cav}(t)$  é menor e  $E_s(t)$  é aumentado em relação ao instante anterior ao início da descarga (FERREIRA, 2017).

### 3.2 Campos elétricos de ruptura e extinção

Conforme visto no Capítulo 2, a ignição de uma DP ocorre normalmente na presença de um campo elétrico muito intenso, o qual é necessário para acelerar os elétrons livres com energia suficiente para iniciar uma avalanche. O campo mínimo requerido para que uma DP possa se desenvolver é chamado de campo elétrico de ruptura ( $E_{rup}$ ). Para DPs em cavidades esféricas do tipo *streamer*,  $E_{rup}$  depende de vários fatores como o tamanho da cavidade, a pressão do gás na cavidade, a permissividade do material, as características do processo de ionização e a distância entre os eletrodos. De acordo com Gutfleisch e Niemeyer (1995) e Illias (2011),  $E_{rup}$  pode ser estimado através da Equação (3.3):

$$E_{rup} = \left( \frac{E}{p_{cav}} \right)_{cr} p_{cav} \left[ 1 + \frac{B}{(2r_{cav} p_{cav})^n} \right] \quad (3.3)$$

Na Equação (3.3), os termos  $p_{cav}$  e  $r_{cav}$  são respectivamente a pressão do ar na cavidade e o raio da cavidade. Já  $(E/p_{cav})_{cr}$ ,  $B$  e  $n$  são parâmetros utilizados para caracterizar os processos de ionização do gás (GUTFLEISCH; NIEMEYER, 1995; ILLIAS, 2011).

Uma outra característica importante do processo de ocorrência da DP é o campo elétrico de extinção, o qual determina o fim da DP. Segundo Gutfleisch e Niemeyer (1995) e Borghei (2022),  $E_{ext}$  é dependente de uma complexa interação entre ionização, anexação e movimento de portadores de carga, sendo estimado aproximadamente pela Equação (3.4):

$$E_{ext} = \gamma p_{cav} \left( \frac{E}{p_{cav}} \right)_{cr} \quad (3.4)$$

onde  $\gamma$  é um fator de proporcionalidade adimensional que depende do tipo de gás, da superfície em contato com o gás e da polaridade do *streamer*. Em geral,  $\gamma$  é estimado experimentalmente (GUTFLEISCH; NIEMEYER, 1995; BORGHEI, 2022).

### 3.3 Taxas de geração de elétrons

Mesmo após  $E_{cav}(t)$  superar  $E_{rup}$ , para que uma DP ocorra é necessária a existência de pelo menos um elétron livre na cavidade para desencadear o processo de ionização. Conforme detalhado no Capítulo 2, as principais fontes de elétrons livres para o início da descarga são a emissão de superfície e a ionização do volume da cavidade. A quantidade de elétrons livres fornecidos por estas fontes influencia as características de ocorrência das DPs em termos de magnitude, fase de ocorrência e número de DPs geradas (ILLIAS, 2011). Essa quantidade é representada neste trabalho por uma taxa de geração de elétrons total ( $N_{e,tot}(t)$ ), calculada através da Equação (3.5):

$$N_{e,tot}(t) = N_{e,sup}(t) + N_{e,vol} \quad (3.5)$$

Na Equação (3.5),  $N_{e,sup}(t)$  e  $N_{e,vol}$  representam as taxas de geração de elétrons devido à emissão de superfície e à ionização do volume da cavidade, respectivamente. Para o modelo de simulação utilizado,  $N_{e,vol}$  foi adotada como constante, enquanto que  $N_{e,sup}(t)$  foi considerada dependente do desprendimento de elétrons oriundos de cargas que foram presas na superfície da cavidade em DPs anteriores. Dessa forma, só haverá elétrons emitidos pela superfície da cavidade após a ocorrência da primeira descarga (ILLIAS, 2011).

O número de elétrons emitidos da superfície por segundo por causa de uma DP anterior ( $N_{e,DP}$ ) é definido pela Equação (3.6):

$$N_{e,DP} = N_{e,sup0} \left| \frac{E_{cav}(t_{DP})}{E_{rup}} \right| \quad (3.6)$$

sendo  $E_{cav}(t_{DP})$  o campo elétrico na cavidade no instante de ocorrência da DP anterior e  $N_{e,sup0}$  a taxa de elétrons gerados por segundo para o campo elétrico de ruptura inicial. Ainda, o termo  $N_{e,sup0}$  é dependente da polaridade do campo elétrico na cavidade, sendo subdividido em dois:  $N_{e,sup0A}$  e  $N_{e,sup0B}$ , que representam as taxas de geração de elétrons devido às emissões de superfície alta e baixa, respectivamente. Essa subdivisão é feita porque quando a polaridade do campo elétrico muda entre duas DPs consecutivas, se torna mais difícil retirar elétrons da superfície da cavidade (ILLIAS, 2011). Assim,  $N_{e,sup0}$  pode ser expressa pela Equação (3.7):

$$N_{e,sup0} = \begin{cases} N_{e,sup0A} , & \text{se } \frac{E_{cav}(t)}{E_{cav}(t_{DP})} > 0 \\ N_{e,sup0B} , & \text{se } \frac{E_{cav}(t)}{E_{cav}(t_{DP})} < 0 \end{cases} \quad (3.7)$$

Considerando que a quantidade de elétrons  $N_{e,DP}$  que podem ser desprendidos decai com o passar do tempo, então a Equação (3.8) é utilizada para determinação de  $N_{e,sup}(t)$ :

$$N_{e,sup}(t) = N_{e,DP} \exp\left(-\left(\frac{t-t_{DP}}{\tau_{dec}}\right)\right) \exp\left(\frac{E_{cav}(t)}{E_{rup}} \frac{T_d}{T_{amb}}\right) \quad (3.8)$$

onde  $\tau_{dec}$  é a constante de tempo de decaimento da carga efetiva,  $T_d$  é a temperatura do material dielétrico e  $T_{amb}$  é a temperatura ambiente de referência (ILLIAS, 2011).

### 3.4 Probabilidade de ocorrência de uma descarga parcial

A taxa de geração de elétrons total apresentada na seção anterior está associada à natureza estocástica do fenômeno da descarga parcial. Para considerar esse aspecto estatístico no modelo, uma função de probabilidade ( $P(t)$ ) é definida a fim de confirmar ou não a ocorrência de uma DP. De acordo com Illias (2011) e Ferreira (2017), pode-se assumir que  $P(t)$  é proporcional à  $N_{e,tot}(t)$  e ao passo de tempo de integração ( $\Delta t$ ), conforme expresso pela Equação (3.9):

$$P(t) = N_{e,tot}(t) \cdot \Delta t \quad (3.9)$$

O valor de  $P(t)$  calculado na Equação (3.9) para cada instante de tempo ( $t$ ) é comparado com um valor gerado por uma função randômica ( $R(t)$ ), que gera números aleatórios no intervalo de 0 a 1. Caso  $P(t)$  for maior que  $R(t)$  e  $E_{cav}(t)$  for maior que  $E_{rup}$ , a DP é confirmada, caso contrário, não há DP (ILLIAS, 2011; FERREIRA, 2017).

### 3.5 Condutividade da cavidade

Após a confirmação da ocorrência de uma DP, a cavidade de ar se torna condutora durante todo o período da descarga. Dessa forma, no modelo implementado, a condutividade da cavidade ( $\sigma_{cav}(t)$ ) é alterada de seu valor inicial ( $\sigma_{cav0}$ ), para um valor máximo ( $\sigma_{cavm\acute{a}x}$ ), enquanto há DP. Ao aumentar o valor de  $\sigma_{cav}(t)$ ,  $E_{cav}(t)$  se reduz até atingir o valor do campo elétrico de extinção ( $E_{ext}$ ), no momento correspondente ao fim da DP. Depois do fim da DP,  $\sigma_{cav}(t)$  é definida novamente com seu valor inicial  $\sigma_{cav0}$ . De acordo com o trabalho desenvolvido por Matsumura e Chen (1972), o valor de  $\sigma_{cavm\acute{a}x}$  pode ser estimado usando a condutividade dos elétrons no plasma através da Equação (3.10):

$$\sigma_{cavm\acute{a}x} = \frac{\alpha_e e^2 N_e \lambda_e}{m_e c_e} \quad (3.10)$$

Na Equação (3.10),  $\alpha_e$  é um coeficiente relacionado à distribuição de energia do elétron e ao caminho livre médio,  $e$  é a carga elétrica elementar,  $\lambda_e$  é o caminho livre médio do elétron,  $m_e$  é a massa do elétron,  $c_e$  é a velocidade térmica do elétron e  $N_e$  é a densidade de elétrons definida pela Equação (3.11):

$$N_e = \frac{q/e}{4/3 \cdot \pi r_{cav}^2} \quad (3.11)$$

sendo  $q/e$  é o número de elétrons no canal da descarga.

### 3.6 Cálculo das cargas reais e aparentes das descargas parciais

Quando as descargas parciais ocorrem, são gerados pulsos de corrente de curta duração (da ordem de ns). Todavia, é muito comum que as DPs sejam quantificadas pelas magnitudes das cargas elétricas envolvidas, que são classificadas em dois tipos: carga real ( $q_{re}$ ) e carga aparente ( $q_{ap}$ ). A carga real é a carga acumulada efetivamente na superfície da cavidade devido à ocorrência da DP. Já a carga aparente corresponde a carga que é induzida no eletrodo no qual foi instalado o equipamento de medição (normalmente o terminal de terra) (ILLIAS, 2011).

As magnitudes das cargas reais e aparentes podem ser obtidas por meio da integração no tempo das correntes  $I_{cav}(t)$  e  $I_{eletr}(t)$  que fluem durante a DP pela cavidade e pelo eletrodo de aterramento, respectivamente. Como o *software* de elementos finitos fornece como resultado as densidades de corrente  $J_{cav}(t)$  e  $J_{eletr}(t)$ , primeiramente é necessário integrá-las sobre as áreas das respectivas seções transversais  $S_{cav}$  e  $S_{eletr}$  para determinar as correntes  $I_{cav}(t)$  e  $I_{eletr}(t)$ , conforme as Equações (3.12) e (3.13). Logo após, são feitas as integrações no tempo, iniciando no instante no qual ocorre a ruptura do ar na cavidade ( $t_{rup}$ ) até o instante em que a DP é extinta ( $t_{ext}$ ), conforme as Equações (3.14) e (3.15).

$$I_{cav}(t) = \int_{S_{cav}} J_{cav}(t) \cdot dS \quad (3.12)$$

$$I_{eletr}(t) = \int_{S_{eletr}} J_{eletr}(t) \cdot dS \quad (3.13)$$

$$q_{re} = \int_{t_{rup}}^{t_{ext}} I_{cav}(t) dt \quad (3.14)$$

$$q_{ap} = \int_{t_{rup}}^{t_{ext}} I_{elctr}(t) dt \quad (3.15)$$

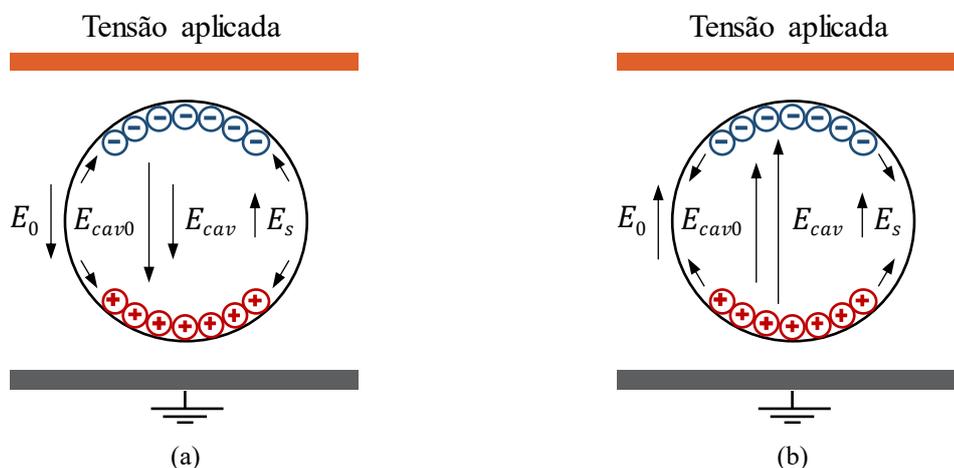
### 3.7 Decaimento das cargas de superfície

Após a ocorrência de uma DP, as cargas que ainda continuam livres na superfície da cavidade irão decair por meio de recombinações que ocorrem ao longo da parede da cavidade, antes que a próxima DP ocorra (ILLIAS, 2011; FERREIRA, 2017). No modelo implementado, o movimento das cargas ao longo da parede da cavidade é considerado como dependente do sentido de  $E_{cav}(t)$  e do campo elétrico devido às cargas da superfície,  $E_s(t)$ , que é calculado por meio da Equação (3.16):

$$E_s(t) = E_{cav}(t) - E_{cav0}(t) \quad (3.16)$$

No caso de uma tensão alternada ser aplicada, o sentido de  $E_{cav}(t)$  deve variar ao longo do tempo. Quando  $E_{cav}(t)$  tem sentido oposto de  $E_s(t)$ , as cargas acumuladas na superfície da cavidade devido a uma DP anterior tendem a se mover em direção aos centros da superfície da cavidade superior e inferior, conforme mostrado na Figura 3.2(a). Dessa forma, não há recombinação de cargas positivas e negativas e, portanto, não há decaimento de carga. Já quando  $E_{cav}(t)$  possui o mesmo sentido de  $E_s(t)$ , as cargas na superfície da cavidade tendem a se mover no sentido oposto aos das regiões em que foram acumuladas, conforme pode ser visto na Figura 3.2(b). Como nesta situação há movimentação de cargas positivas e negativas em sentidos contrários ao longo da superfície da cavidade, recombinações acontecem entre estas, resultando em decaimento (ILLIAS, 2011; FERREIRA, 2017).

Figura 3.2 – Movimento das cargas livres ao longo da superfície da cavidade: (a) quando  $E_{cav}(t)$  e  $E_s(t)$  possuem sentidos opostos, (b) quando  $E_{cav}(t)$  e  $E_s(t)$  possuem sentidos iguais.



Fonte: adaptado de Illias (2011).

Durante a ocorrência da DP, quando as primeiras cargas chegam à superfície da cavidade, elas repelem as cargas subsequentes, atrasando seus tempos de chegada. Algumas destas cargas podem ficar presas em armadilhas na superfície da cavidade, enquanto que outras podem continuar livres para movimentarem-se ao longo da parede da cavidade (ILLIAS, 2011; FERREIRA, 2017). Estes dois tipos de carga contribuem com a formação do campo  $E_s(t)$ , conforme mostra a Equação (3.17):

$$E_s(t) = E_{s,apresa}(t) + E_{s,qlivre}(t) \quad (3.17)$$

onde  $E_{s,apresa}(t)$  é o campo elétrico devido às cargas presas na superfície da cavidade e  $E_{s,qlivre}(t)$  é o campo elétrico devido às cargas livres na superfície da cavidade.

Após o término da DP, a quantidade de cargas livres na superfície da cavidade ( $q_{s,qlivre}(t_{DP})$ ) pode ser determinada a partir da integração da densidade de fluxo elétrico ao longo da área da parte superior da superfície da cavidade, de acordo com a Equação (3.18):

$$q_{s,qlivre}(t_{DP}) = \int_{S_{supcav}} [D_{s,sup}(t_{DP}) - D_{s,inf}(t_{DP})] \cdot dS \quad (3.18)$$

sendo  $D_{s,sup}(t_{DP})$  e  $D_{s,inf}(t_{DP})$  as densidades de fluxo elétrico nos lados superior e inferior da parte superior da superfície da cavidade, sendo ambas calculadas no instante imediatamente após o fim da DP ( $t_{DP}$ ).

A partir do valor obtido na Equação (3.18), o campo elétrico devido às cargas livres na superfície da cavidade instantaneamente após o término da DP ( $E_{s,qlivre}(t_{DP})$ ), pode ser calculado pela Equação (3.19):

$$E_{s,qlivre}(t_{DP}) = \frac{q_{s,qlivre}(t_{DP})}{q_{DPs,total}(t_{DP})} E_s(t_{DP}) \quad (3.19)$$

onde  $q_{DPs,total}(t_{DP})$  é carga total obtida pela soma das cargas reais geradas por todas as DPs que ocorreram até o instante  $t_{DP}$ , de acordo com a Equação (3.20):

$$q_{DPs,total}(t_{DP}) = \sum_{i=1}^N q_{re}[i] \quad (3.20)$$

sendo  $N$  o número total de DPs geradas até o instante  $t_{DP}$  e  $q_{re}[i]$  a carga real da  $i$ -ésima DP.

Deste modo, o campo elétrico devido às cargas presas na superfície da cavidade imediatamente após o fim da DP ( $E_{s,apresa}(t_{DP})$ ) pode ser determinado pela Equação (3.21):

$$E_{s,apresa}(t_{DP}) = E_s(t_{DP}) - E_{s,qlivre}(t_{DP}) \quad (3.21)$$

Durante o decaimento das cargas de superfície, no momento em que  $E_s(t)$  alcançar o valor de  $E_{s,qpresa}(t_{DP})$ , nenhuma carga livre existirá para ser conduzida ao longo da parede da cavidade, encerrando-se, portanto, o processo de recombinação.

Para considerar o decaimento das cargas de superfície no modelo de simulação, foi utilizada uma condutividade para superfície da cavidade ( $\sigma_{sup}(t)$ ), a qual depende dos sentidos de  $E_{cav}(t)$  e  $E_s(t)$ , da intensidade de  $E_s(t)$  em relação à  $E_{s,qpresa}(t_{DP})$  e da magnitude do campo elétrico na superfície da cavidade ( $E_{sup}(t)$ ), sendo expressa matematicamente através da Equação (3.22):

$$\sigma_{sup}(t) = \begin{cases} \sigma_{sup0} \exp(\alpha |E_{sup}(t)|), & \text{se } \frac{E_{cav}(t)}{E_s(t)} > 0 \text{ e } E_s(t) > E_{s,qpresa}(t_{DP}) \\ \sigma_{sup0} & , \text{ caso contrário.} \end{cases} \quad (3.22)$$

onde  $\sigma_{sup0}$  é a condutividade inicial da superfície da cavidade,  $\alpha$  é o coeficiente de stress e  $E_{sup}(t)$  é calculado através da aplicação do método dos elementos finitos na geometria. Percebe-se na Equação (3.22) que à medida que  $E_{sup}(t)$  aumenta,  $\sigma_{sup}(t)$  pode assumir valores muito elevados. Para evitar problemas de convergência na simulação,  $\sigma_{sup}(t)$  é limitada ainda por um valor máximo ( $\sigma_{supm\acute{a}x}$ ), que é estimado através de dados experimentais (ILLIAS, 2011).

Vale ressaltar que no modelo proposto por Illias (2011),  $\sigma_{sup}(t)$  foi também considerada dependente da temperatura na superfície da cavidade, a qual pode sofrer variações no tempo devido ao calor liberado durante as ocorrências das DPs. Todavia, este fator foi negligenciado neste trabalho porque, de acordo Illias (2011), os resultados obtidos através do modelo que despreza as variações de temperatura foram muito semelhantes aos do modelo no qual este efeito foi considerado. Esta simplificação é muito importante porque reduz a necessidade do uso de uma interface para cálculo da transferência de calor no *software* de elementos finitos, o que contribui significativamente para diminuição do tempo de simulação.

### 3.8 Equações fundamentais para análise de elementos finitos

Para simular as DPs, é necessário conhecer as distribuições do campo elétrico ( $\vec{E}$ ), do potencial elétrico ( $V$ ) e da densidade de corrente ( $\vec{J}$ ) na geometria (ILLIAS, 2011, FERREIRA, 2017). Para isso, a Equação (3.23) da lei de Gauss e a Equação (3.24) da continuidade devem ser resolvidas:

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho_v \quad (3.23)$$

$$\nabla \cdot \vec{J} + \frac{\partial \rho_v}{\partial t} = 0 \quad (3.24)$$

onde  $\vec{D}$  é a densidade de fluxo elétrico e  $\rho_v$  é a densidade volumétrica das cargas elétricas.

Sendo  $\varepsilon$  a permissividade do meio, e assumindo que o dielétrico é linear, homogêneo e isotrópico, então:

$$\vec{D} = \varepsilon \vec{E} = -\varepsilon \nabla V \quad (3.25)$$

Substituindo a Equação (3.25) na Equação (3.23), obtém-se a Equação (3.26):

$$\nabla \cdot (-\varepsilon \nabla V) = -\nabla \cdot (\varepsilon \nabla V) = \rho_v \quad (3.26)$$

Além disso, sendo  $\sigma$  a condutividade elétrica do meio, sabe-se que:

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} = \sigma (-\nabla V) \quad (3.27)$$

Substituindo as Equações (3.26) e (3.27) na Equação (3.24), obtém-se:

$$-\nabla \cdot (\sigma \nabla V) - \frac{\partial}{\partial t} (\nabla \cdot \varepsilon \nabla V) = 0 \quad (3.28)$$

Finalmente, usando a propriedade da derivada do divergente, a Equação (3.28) pode ser reescrita na forma apresentada pela Equação (3.29):

$$-\nabla \cdot (\sigma \nabla V) - \nabla \cdot \frac{\partial}{\partial t} (\varepsilon \nabla V) = 0 \quad (3.29)$$

A Equação (3.29) é resolvida para o potencial elétrico através da aplicação do método dos elementos finitos internamente no *software* COMSOL Multiphysics®. Em seguida, o campo elétrico e a densidade de corrente são calculados a partir dos valores obtidos para o potencial elétrico em todas as partes da geometria.

### 3.9 Implementação do modelo

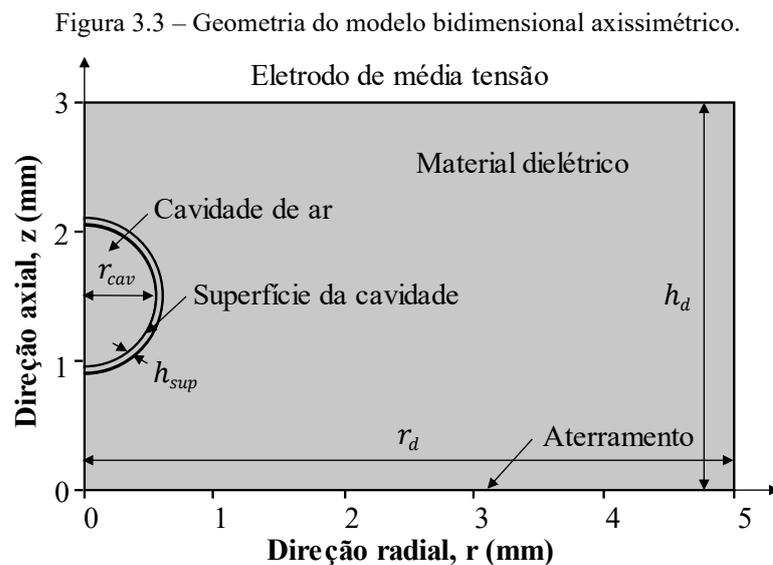
Com base em todas as informações fornecidas nas seções anteriores, foi implementado o modelo para simulação das DPs. Nesta seção, a geometria do modelo é apresentada, a malha de elementos finitos é definida, os parâmetros utilizados são descritos e o algoritmo desenvolvido para modelagem dinâmica das DPs é explicado.

#### 3.9.1 Geometria

A geometria do modelo a ser simulado consiste em um cilindro de altura  $h_d = 3$  mm e raio  $r_d = 5$  mm, preenchido por um material dielétrico homogêneo (resina epóxi,  $\varepsilon_{rd} = 4,4$ ), no

qual foi inserida uma cavidade de ar esférica de raio  $r_{cav} = 0,55$  mm e cuja superfície possui espessura  $h_{sup} = 0,05$  mm. A superfície da cavidade é implementada na geometria para modelar o decaimento das cargas de superfície, definindo sua condutividade maior que a do dielétrico, de acordo com a Equação (3.22) apresentada anteriormente. Na face superior do cilindro dielétrico são aplicadas tensões alternadas com amplitudes da ordem de quilovolts, enquanto que sua face inferior é aterrada.

A Figura 3.3 mostra os detalhes da geometria do modelo implementado no *software* de elementos finitos COMSOL Multiphysics®. Conforme pode ser visto na Figura 3.3, utilizou-se da simetria axial para transformar o modelo tridimensional (3D) em um modelo bidimensional (2D) axissimétrico. Com o uso da simetria axial, o cilindro e a esfera são representados por um retângulo e um semicírculo, respectivamente. Essa transformação possibilita a redução do tamanho da malha de elementos finitos e, conseqüentemente, do tempo de simulação computacional, sem perder precisão na solução (CARDOSO, 2016).



Fonte: elaboração própria.

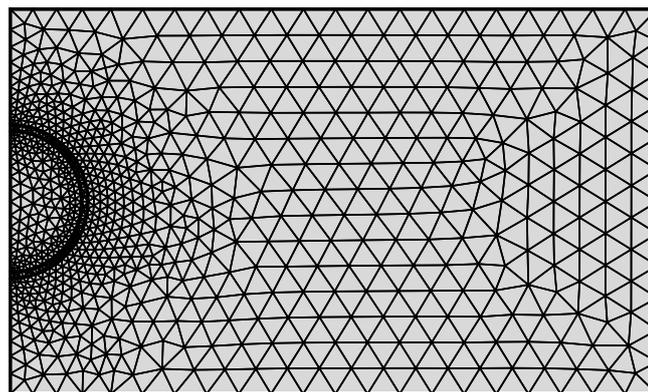
### 3.9.2 Malha de elementos finitos

A definição da malha de elementos finitos é uma etapa importante para garantir resultados precisos na simulação, uma vez que com a aplicação do MEF erros de aproximação podem acontecer. Para reduzir estes erros, é necessário que a malha de elementos finitos tenha uma boa quantidade de nós e que os elementos utilizados sejam adequados de acordo com a geometria do problema a ser resolvido. Pode-se dizer que quanto mais refinada for a malha, ou seja, quanto maior for a quantidade de elementos, maior será a precisão dos dados obtidos via

interpolação. No entanto, a utilização de malhas extremamente refinadas pode aumentar drasticamente o tempo de simulação computacional, tornando inconveniente a aplicação do MEF (CARDOSO, 2016).

Neste trabalho, visando obter resultados precisos sem elevar muito o tempo de simulação, optou-se por gerar uma malha de elementos finitos com diferentes níveis de refinamento ao longo da geometria. Na cavidade, em sua superfície e na parte do material dielétrico que faz fronteira com estas, foram utilizados elementos com tamanhos menores, pois estas regiões são sujeitas a maiores variações de tensão, campo elétrico e corrente durante a ocorrência de uma DP. Enquanto isso, nos locais do material dielétrico que estão mais afastados da cavidade, onde as grandezas físicas pouco variam espacialmente, foram criados elementos com tamanhos maiores. A malha de elementos finitos gerada no COMSOL Multiphysics® está ilustrada na Figura 3.4, enquanto que suas propriedades estão descritas na Tabela 3.1.

Figura 3.4 – Malha de elementos finitos gerada.



Fonte: elaboração própria.

Tabela 3.1 – Propriedades da malha de elementos finitos.

<b>Parâmetro</b>	<b>Especificação</b>
Tipo de elemento utilizado	Triangular
Tipo de interpolação utilizada	Quadrática
Quantidade total de elementos da malha	1630
Tamanho máximo de um elemento	0,25 mm
Tamanho mínimo de um elemento	0,0015 mm
Taxa máxima de crescimento dos elementos	1,15
Fator de curvatura	0,15
Resolução em regiões estreitas	1,2

Fonte: elaboração própria.

### 3.9.3 Parâmetros

Todos os parâmetros utilizados para implementação do modelo estão apresentados na Tabela 3.2. Os valores de  $\sigma_{supm\acute{a}x}$ ,  $\tau_{dec}$ ,  $N_{e,vol}$ ,  $N_{e,sup0A}$  e  $N_{e,sup0B}$  mostrados na Tabela 3.2 só são obtidos a partir de estudos empíricos. Dessa forma, utilizou-se os mesmos valores determinados por Illias (2011), os quais possuem validação experimental para a mesma configuração de geometria apresentada neste trabalho. Além disso, é válido ressaltar que, para a realização dos estudos propostos nesta dissertação, adotou-se a premissa de que estes parâmetros são mantidos constantes para todos os casos simulados com tensões distorcidas.

Tabela 3.2 – Parâmetros do modelo de simulação.

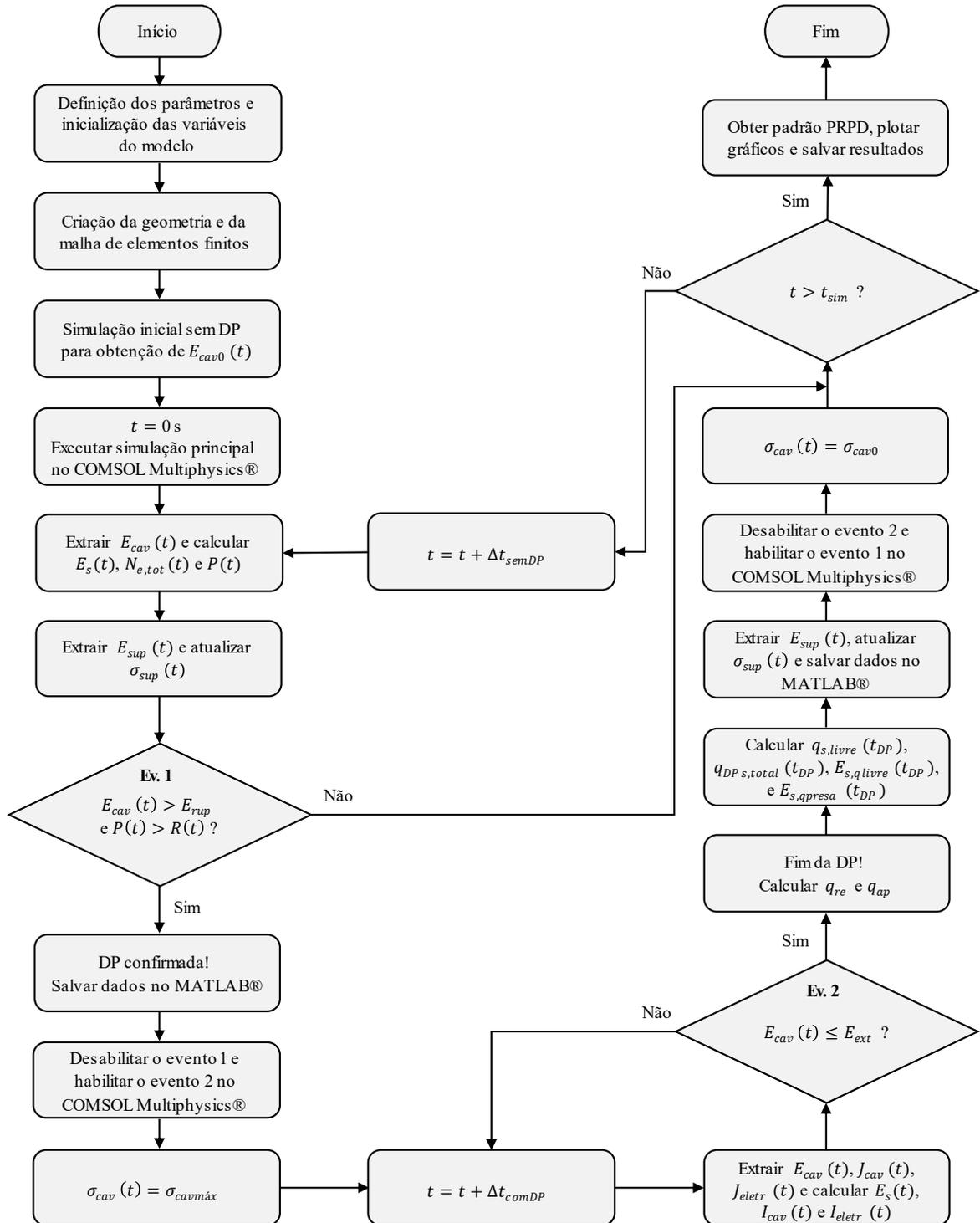
Parâmetro	Símbolo	Valor	Unidade
Altura do cilindro preenchido pelo material dielétrico	$h_d$	3	mm
Raio do cilindro preenchido pelo material dielétrico	$r_d$	5	mm
Raio da cavidade de ar	$r_{cav}$	0,55	mm
Espessura da superfície da cavidade de ar	$h_{sup}$	0,05	mm
Amplitude da tensão aplicada (sem distorção harmônica)	$V_{aplm\acute{a}x}$	18	kV
Frequência fundamental da tensão aplicada	$f$	50	Hz
Temperatura do material dielétrico	$T_d$	293,15	K
Temperatura ambiente de referência	$T_{amb}$	293,15	K
Campo elétrico de ruptura	$E_{rup}$	3,35	kV.mm <sup>-1</sup>
Campo elétrico de extinção	$E_{ext}$	0,31	kV.mm <sup>-1</sup>
Passo de tempo de integração sem DP	$\Delta t_{semDP}$	$4 \times 10^{-5}$	s
Passo de tempo de integração com DP	$\Delta t_{comDP}$	$1 \times 10^{-9}$	s
Permissividade relativa do material dielétrico	$\epsilon_{rd}$	4,4	-
Permissividade relativa da cavidade de ar	$\epsilon_{rcav}$	1	-
Permissividade relativa da superfície da cavidade de ar	$\epsilon_{rsup}$	4,4	-
Condutividade do material dielétrico	$\sigma_d$	$1 \times 10^{-13}$	S.m <sup>-1</sup>
Condutividade da cavidade de ar sem DP	$\sigma_{cav0}$	0	S.m <sup>-1</sup>
Condutividade da cavidade de ar com DP	$\sigma_{cavm\acute{a}x}$	0,005	S.m <sup>-1</sup>
Condutividade inicial da superfície da cavidade de ar	$\sigma_{sup0}$	$1 \times 10^{-13}$	S.m <sup>-1</sup>
Condutividade máxima da superfície da cavidade de ar	$\sigma_{supm\acute{a}x}$	$5 \times 10^{-13}$	S.m <sup>-1</sup>
Constante de tempo de decaimento da carga efetiva de superfície	$\tau_{dec}$	0,002	s
Taxa de geração de elétrons pela ionização do volume da cavidade	$N_{e,vol}$	10	s <sup>-1</sup>
Taxa de geração de elétrons por emissão de superfície alta	$N_{e,sup0A}$	12000	s <sup>-1</sup>
Taxa de geração de elétrons por emissão de superfície baixa	$N_{e,sup0B}$	6000	s <sup>-1</sup>

Fonte: elaboração própria.

### 3.9.4 Algoritmo

O algoritmo apresentado no fluxograma da Figura 3.5 foi implementado no *software* MATLAB® para modelar o processo de ocorrência dinâmico das DPs na cavidade de ar interna. Este algoritmo interage com o *software* COMSOL Multiphysics®, onde o método dos elementos finitos é aplicado para calcular as grandezas físicas associadas ao fenômeno da DP.

Figura 3.5 – Fluxograma do algoritmo implementado para simulação das DPs.



Fonte: elaboração própria.

Conforme a Figura 3.5, primeiramente todos os parâmetros utilizados no modelo são definidos e todas as variáveis são inicializadas. É neste momento que se define também as características da forma de onda da tensão aplicada, seja ela puramente senoidal ou com distorção harmônica. Em seguida, a geometria do modelo é criada e a malha de elementos finitos é definida. Todas estas operações são realizadas no COMSOL Multiphysics® através de comandos executados em paralelo no MATLAB®.

A princípio, o modelo é simulado sem a ocorrência de DPs, pois é necessário determinar  $E_{cav0}(t)$ , para posteriormente calcular  $E_s(t)$  e então modelar o decaimento das cargas de superfície através de  $\sigma_{sup}(t)$ . Feito isso, a simulação principal é executada definindo  $t = 0$  s.

No COMSOL Multiphysics® são usados dois passos de tempo de integração diferentes, um para quando a DP é confirmada ( $\Delta t_{comDP}$ ) e outro para quando não há DP ( $\Delta t_{semDP}$ ). Isso é feito porque a DP ocorre em um período de tempo muito curto (da ordem de ns), necessitando, portanto, de um passo de integração menor enquanto há a ocorrência da DP. Em contrapartida, nos momentos em que não há confirmação da DP, utiliza-se um passo de integração maior para reduzir o tempo total da simulação.

No modelo proposto por Illias (2011), o passo de tempo de integração é controlado pelo algoritmo no MATLAB®. Para isso, todas as variáveis do modelo são recalculadas e os critérios para ocorrência ou extinção de uma DP são checados no MATLAB® a cada iteração. Como o processo de envio de informações entre o MATLAB® e o COMSOL Multiphysics® consome um tempo considerável, isso torna a simulação muito demorada. Dependendo do número de ciclos estipulados, a simulação pode levar até dias para ser concluída.

Sabendo disso, o autor propõe nesta dissertação uma melhoria do modelo original através do uso da *Events Interface* do COMSOL Multiphysics®. Com esta abordagem, dois eventos são criados, um para confirmação da DP e outro para extinção. Ambos estão representados no fluxograma da Figura 3.5 através de estruturas de decisão. Utilizando a *Events Interface*, as variáveis do modelo  $E_s(t)$ ,  $N_{e,sup}(t)$ ,  $N_{e,tot}(t)$ ,  $P(t)$  e  $\sigma_{sup}(t)$  são atualizadas diretamente no próprio COMSOL Multiphysics® a partir dos valores de  $E_{cav}(t)$  e  $E_{sup}(t)$  extraídos a cada iteração. Assim, o MATLAB® só recebe as informações do COMSOL Multiphysics® quando um dos eventos é acionado, o que possibilita uma redução significativa do tempo de simulação.

De acordo com o fluxograma da Figura 3.5, a DP só é confirmada quando as duas condições necessárias para iniciar a avalanche de elétrons são satisfeitas, ou seja, quando

$E_{cav}(t) > E_{rup}$  e  $P(t) > R(t)$ . Quando a DP é confirmada, a condutividade da cavidade é incrementada para seu valor máximo  $\sigma_{cavm\acute{a}x}$ , tornando a cavidade de ar condutora, o que reduz rapidamente a intensidade de  $E_{cav}(t)$ . Quando  $E_{cav}(t)$  se torna inferior a  $E_{ext}$ , a DP é interrompida, e as cargas reais e aparentes geradas pelas DPs são calculadas a partir dos valores das densidades de corrente  $J_{cav}(t)$  e  $J_{elctr}(t)$  que são armazenados durante o processo da DP. Além disso, os valores de  $q_{s,livre}(t_{DP})$ ,  $q_{DPs,total}(t_{DP})$ ,  $E_{s,qlivre}(t_{DP})$ ,  $E_{s,qpresa}(t_{DP})$  e  $E_{sup}(t)$  também são determinados a fim de atualizar o valor de  $\sigma_{sup}(t)$  ao final da DP. Logo após, a condutividade da cavidade é alterada para seu valor inicial  $\sigma_{cav0}$ , e caso ainda não se tenha atingido o tempo total estipulado para a simulação ( $t_{sim}$ ), então  $t$  é incrementado com  $\Delta t_{semDP}$  e o processo descrito acima se repete. Caso contrário, o padrão PRPD composto por todas as cargas produzidas ao longo da simulação é obtido, todos os resultados são salvos, os respectivos gráficos são plotados e a simulação é encerrada.

### 3.10 Validação do modelo

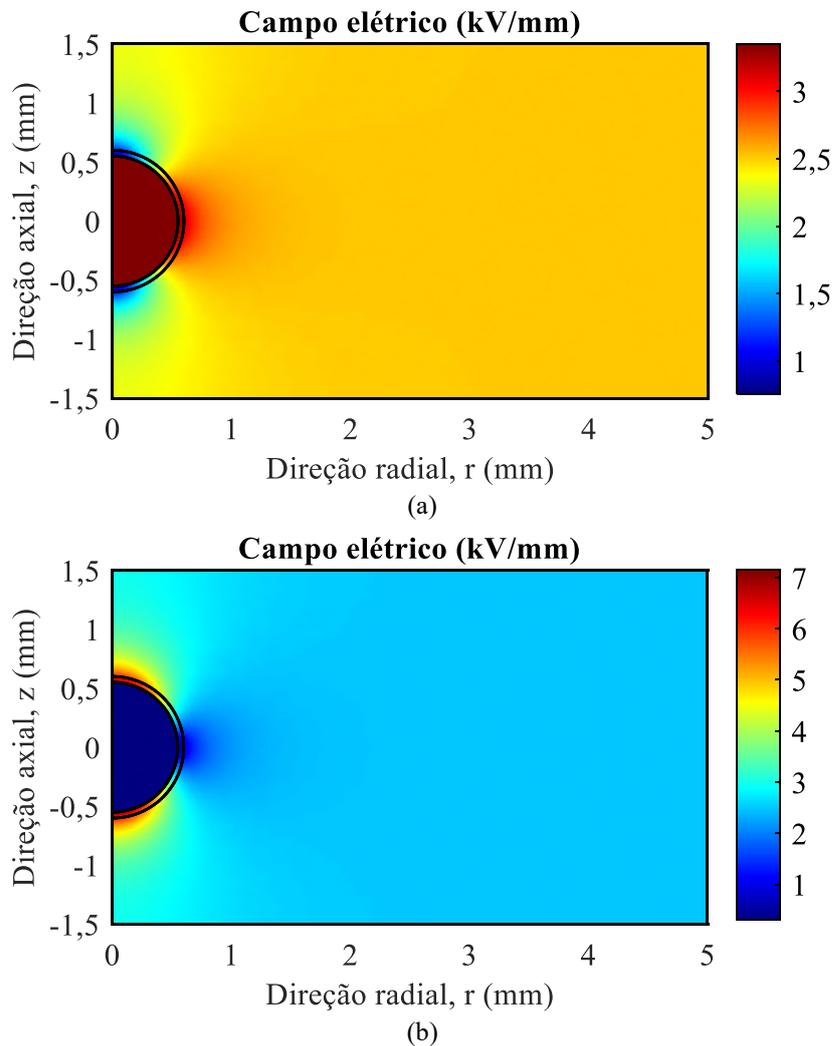
O modelo implementado foi inicialmente simulado através da aplicação de uma tensão senoidal de amplitude de 18 kV e frequência igual a 50 Hz, com o intuito de verificar a coerência dos resultados obtidos na simulação com a teoria do fenômeno da DP e com os dados experimentais levantados por Illias (2011). A simulação foi realizada por um período de tempo equivalente a 100 ciclos da tensão aplicada. Nesta seção, os resultados obtidos são apresentados graficamente e discutidos de forma a facilitar a compreensão do modelo para o leitor.

#### 3.10.1 Ocorrência da primeira descarga parcial

As Figura 3.6(a) e 3.6(b) mostram as distribuições do campo elétrico na geometria nos instantes anterior e posterior à ocorrência da primeira DP. Verifica-se na Figura 3.6(a) que no momento anterior à ocorrência da DP o campo elétrico no interior da cavidade é mais intenso do que no material dielétrico circundante, uma vez que a permissividade relativa do ar é menor do que a da resina epóxi. A magnitude de  $E_{cav}(t)$  no centro da cavidade nesse instante é igual a 3,35 kV/mm, ou seja, igual a  $E_{rup}$ . Além disso, nota-se na Figura 3.6(a) que o campo elétrico é um pouco menos intenso nas regiões da superfície da cavidade próximas dos eletrodos, pois o campo elétrico aplicado é quase perpendicular à superfície nestes locais.

Quando a DP ocorre, a cavidade se torna condutora e  $E_{cav}(t)$  se reduz até o momento de extinção da DP quando  $E_{cav}(t) = E_{ext} = 0,31$  kV/mm, como mostrado na Figura 3.6(b). Ao final da DP, verifica-se também que o campo elétrico nas faces superior e inferior da cavidade se torna mais intenso. Isso ocorre porque durante a DP há um grande acúmulo de cargas elétricas na superfície da cavidade. Estas cargas podem ser emitidas posteriormente em outras descargas, contribuindo com a taxa de geração de elétrons total.

Figura 3.6 – Distribuição do campo elétrico na geometria: (a) antes da DP, (b) ao final da DP.

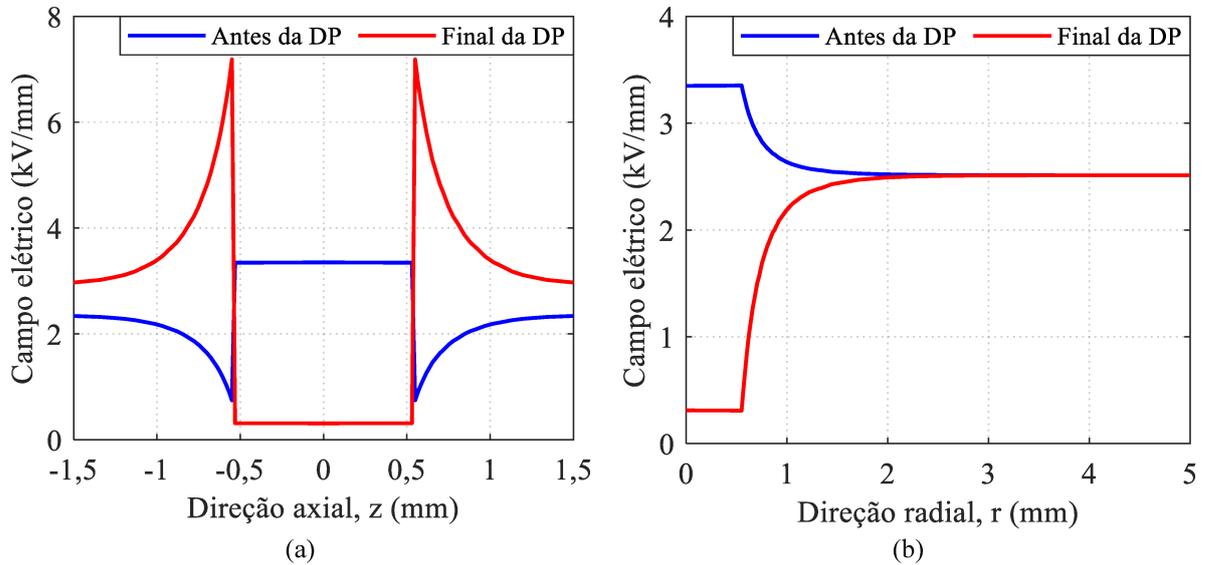


Fonte: elaboração própria.

A Figura 3.7 apresenta os valores do campo elétrico nas direções axial e radial da geometria, para os instantes imediatamente antes da DP e no final da DP. Os comportamentos observados na Figura 3.7 corroboram com a análise realizada acima. Além disso, constata-se que o campo elétrico no interior da cavidade é aproximadamente constante tanto na direção

axial quanto na direção radial, em virtude de o diâmetro da cavidade ser consideravelmente menor do que a espessura do material dielétrico.

Figura 3.7 – Campo elétrico imediatamente antes e após a ocorrência da primeira DP nas direções: (a) axial, (b) radial.

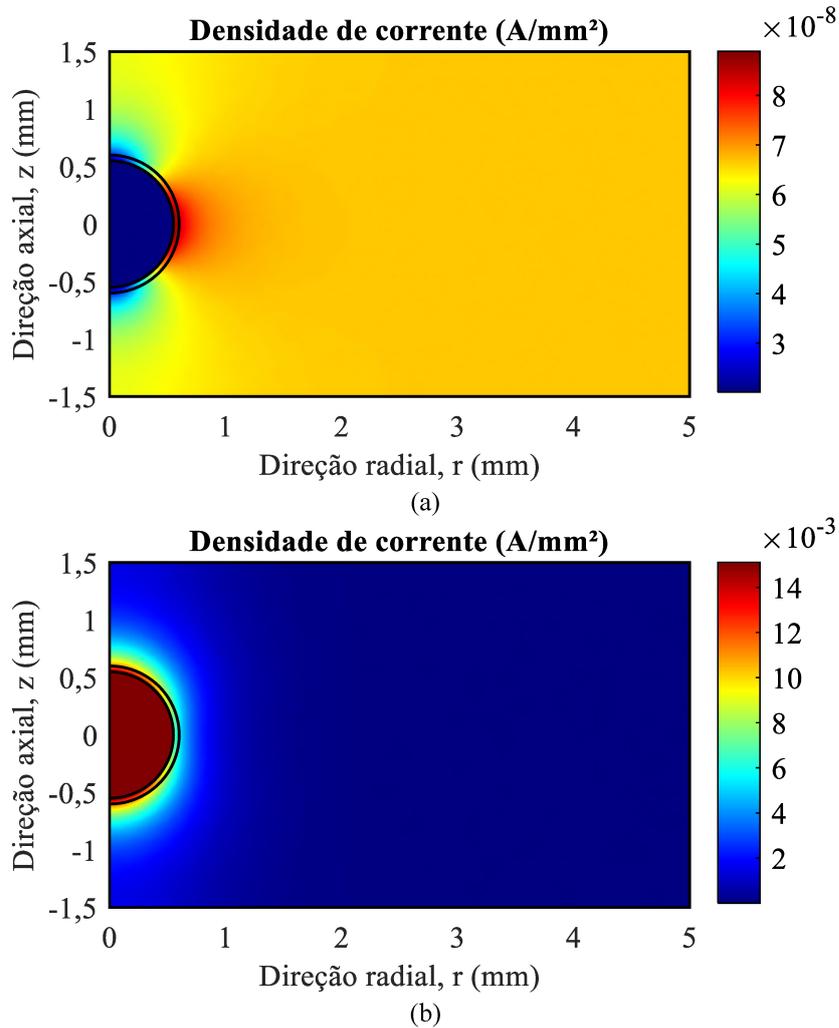


Fonte: elaboração própria.

As distribuições da densidade de corrente nos instantes imediatamente antes da DP e no início da DP são apresentadas na Figura 3.8. Verifica-se na Figura 3.8(a) que antes da DP a densidade de corrente na cavidade é nula, pois o ar em seu estado natural não possui condutividade elétrica. No material dielétrico a densidade de corrente é diferente de zero, porém com baixa magnitude, da ordem de  $10^{-8}$  A/mm<sup>2</sup>. Isso ocorre porque a resina epóxi possui um pequeno valor de condutividade igual a  $1.10^{-13}$  S/m. Em contrapartida, quando a DP é confirmada, a cavidade se torna condutora, tendo sua condutividade alterada para o valor máximo  $\sigma_{cavm\acute{a}x}$ . Isso causa um enorme aumento da densidade de corrente na cavidade no início da DP, como mostrado na Figura 3.8(b).

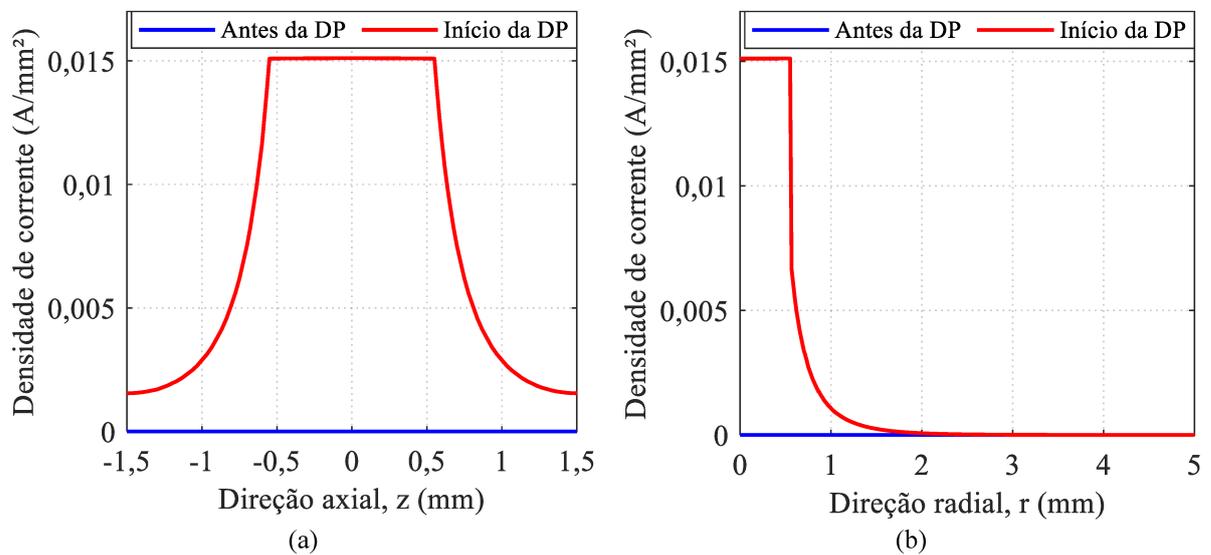
Na Figura 3.9 são apresentadas as distribuições da densidade de corrente em relação às direções axial e radial da geometria, no instante anterior à DP e no início da DP. Percebe-se que a densidade de corrente no interior da cavidade é constante em ambas as direções, atingindo um valor máximo de aproximadamente 0,015 A/mm<sup>2</sup> no início da DP.

Figura 3.8 – Distribuição da densidade de corrente na geometria: (a) antes da DP, (b) no início da DP.



Fonte: elaboração própria.

Figura 3.9 – Densidade de corrente instantaneamente antes e no início da primeira DP nas direções: (a) axial, (b) radial.

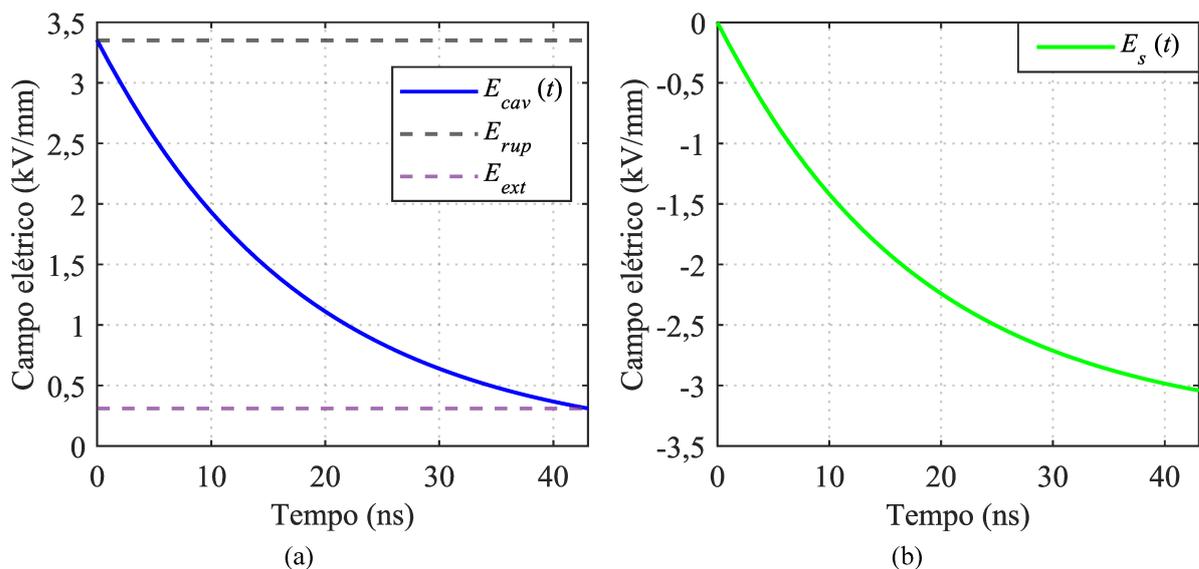


Fonte: elaboração própria.

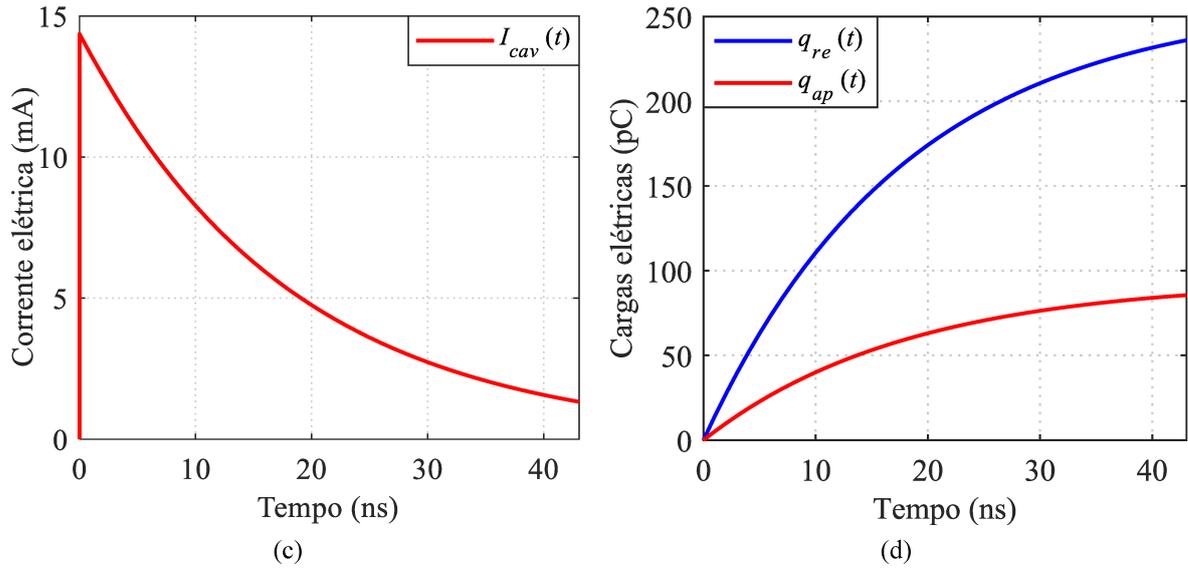
Com o modelo de simulação implementado é possível obter o comportamento dinâmico de diversas grandezas físicas durante o evento da DP, como mostrado na Figura 3.10. A primeira DP simulada teve duração de 43ns e se iniciou no instante em que  $E_{cav}(t)$  atingiu o valor de  $E_{rup}$ , não ocorrendo nesta situação o atraso de tempo estatístico. Nota-se na Figura 3.10(a) que a partir do momento em que a DP é iniciada,  $E_{cav}(t)$  diminui de intensidade e o evento da DP termina quando  $E_{cav}(t) = E_{ext}$ . Além disso, durante a DP cargas elétricas atingem a superfície da cavidade, fazendo com que  $E_s(t)$  seja incrementado. Porém,  $E_s(t)$  possui sentido contrário de  $E_{cav}(t)$ , sendo representado por valores negativos conforme exibido na Figura 3.10(b).

No início da DP, a corrente na cavidade é aumentada rapidamente até o seu valor máximo e em seguida se reduz conforme o campo elétrico na cavidade se torna menos intenso (Figura 3.10(c)). As cargas reais e aparentes também são incrementadas durante o processo de ocorrência da DP, atingindo valores máximos no final da DP, como pode ser visto na Figura 3.10(d). Percebe-se na Figura 3.10(d) que a carga aparente da DP é menor do que a carga real, uma vez que ela representa a carga induzida no eletrodo de aterramento.

Figura 3.10 – Comportamento de  $E_{cav}(t)$ ,  $E_s(t)$ ,  $I_{cav}(t)$ ,  $q_{re}(t)$  e  $q_{ap}(t)$  durante a ocorrência da primeira DP na cavidade.

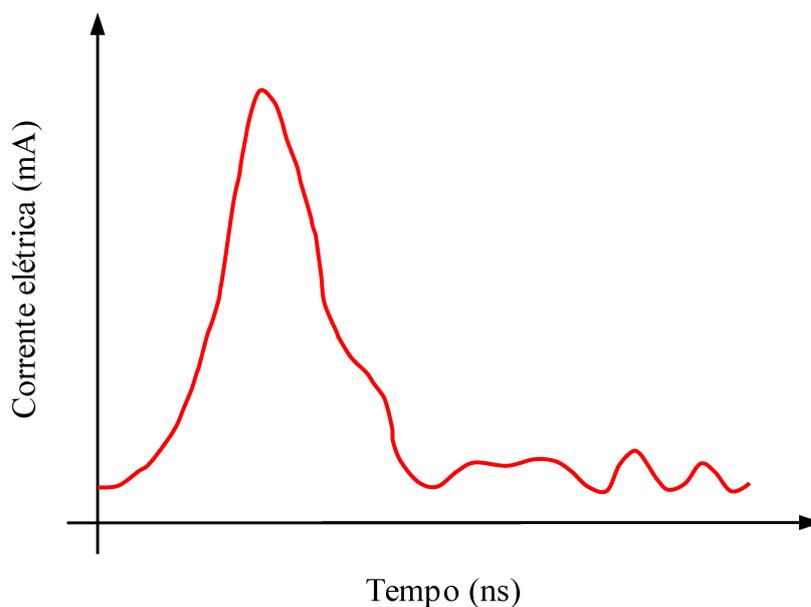


continua na próxima página...



O pulso de corrente da DP mostrado na Figura 3.10(c) possui o formato ideal previsto na teoria. No entanto, um sinal de DP real sofre atenuação de alta frequência e distorção ao se propagar da cavidade até o local do equipamento de medição, resultando em um comportamento oscilatório, conforme ilustrado na Figura 3.11 a título de informação para o leitor. Os tempos de subida e queda, o período de oscilação e as magnitudes dos picos subsequentes do sinal podem variar dependendo da geometria do objeto de teste, do material dielétrico e da localização da cavidade (WU *et al.*, 2015; BRASIL, 2016).

Figura 3.11 – Pulso de corrente de uma DP observado no local de medição.

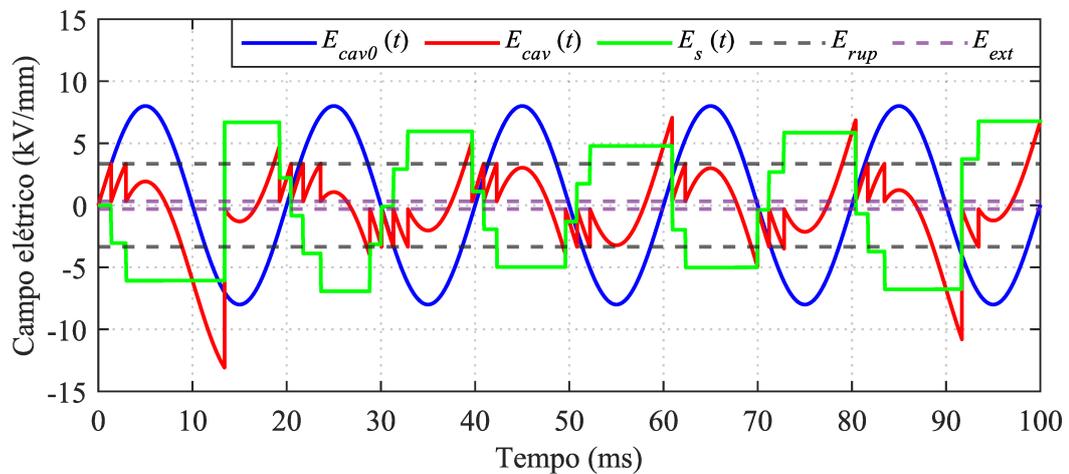


Fonte: adaptado de Wu *et al.* (2015).

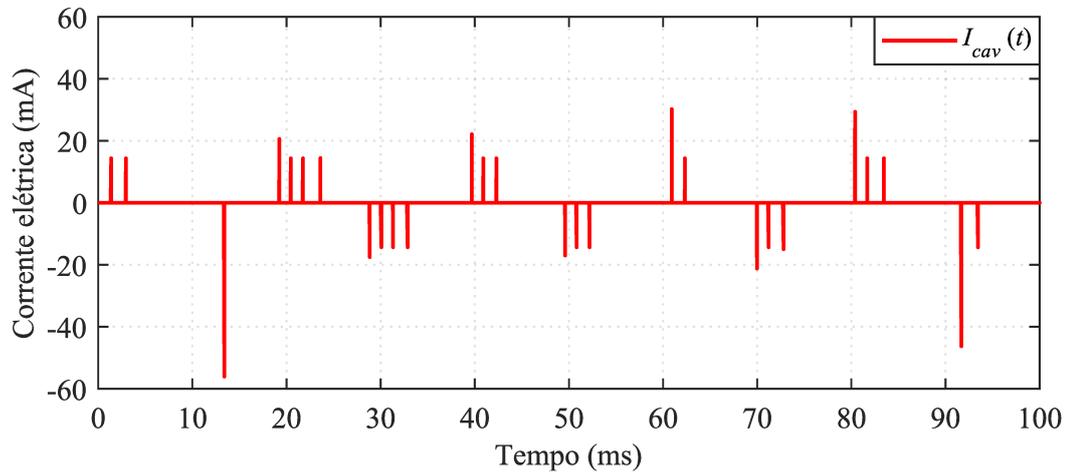
### 3.10.2 Evolução temporal das descargas parciais

A Figura 3.12(a) apresenta o desenvolvimento de  $E_{cav0}(t)$ ,  $E_{cav}(t)$  e  $E_s(t)$  com o passar do tempo, considerando os efeitos das ocorrências das DPs. Neste gráfico também são destacados  $E_{rup}$  e  $E_{ext}$  através de linhas fixas pontilhadas. Na Figura 3.12(b) são mostrados os pulsos de corrente causados pelas DPs na cavidade, enquanto que na Figura 3.12(c) são apresentadas as cargas real e aparente de cada DP gerada no intervalo de 0 a 100 ms.

Figura 3.12 – Evolução temporal de diversas grandezas físicas envolvidas no processo de ocorrência das DPs: (a)  $E_{cav0}(t)$ ,  $E_{cav}(t)$ ,  $E_s(t)$ ,  $E_{rup}$  e  $E_{ext}$ , (b)  $I_{cav}(t)$ , (c)  $q_{re}(t)$  e  $q_{ap}(t)$ .

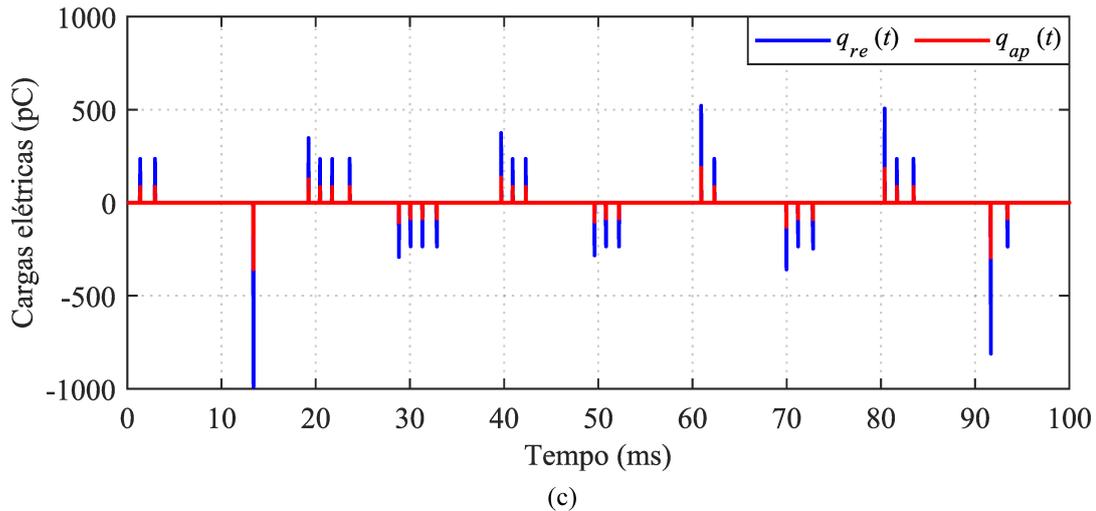


(a)



(b)

continua na próxima página...



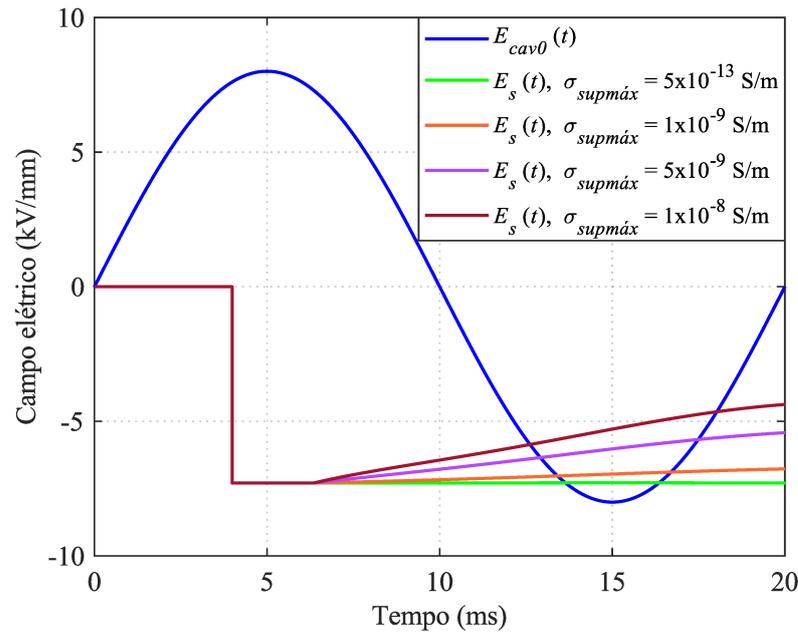
Fonte: elaboração própria.

Conforme mostrado na Figura 3.12(a),  $E_{cav0}(t)$  possui comportamento senoidal correspondente à forma de onda da tensão aplicada. Já  $E_{cav}(t)$  e  $E_s(t)$  dependem também da dinâmica das DPs que ocorrem na cavidade ao longo do tempo. Percebe-se na Figura 3.12(a) que nem sempre que  $E_{cav}(t)$  supera  $E_{rup}$  há uma DP, pois foi considerado no modelo de simulação a necessidade da existência de um elétron livre para iniciar a DP, o que resulta em atrasos para ocorrência da mesma. Devido a este caráter estocástico, pulsos de corrente com diferentes magnitudes são originados. Quando os tempos de atraso estatísticos são grandes, as DPs ocorrem em instantes nos quais o campo elétrico é mais intenso na cavidade, causando pulsos de corrente de magnitudes elevadas, conforme pode ser notado na Figura 3.12(b). As cargas real e aparente das DPs mostradas na Figura 3.12(c) são obtidas via integração dos valores das correntes na cavidade e no eletrodo de aterramento, utilizando as Equações (3.14) e (3.15), respectivamente.

No final de cada DP, o campo elétrico devido às cargas de superfície,  $E_s(t)$ , é igual a diferença entre  $E_{cav}(t)$  e  $E_{cav0}(t)$ , como constatado na Figura 3.12(a). Todavia, as cargas armazenadas na superfície da cavidade decaem com o passar do tempo devido às recombinações, então  $E_s(t)$  é reduzido quando possui o mesmo sentido de  $E_{cav}(t)$ . Embora este efeito tenha sido considerado para implementação do modelo de simulação, nota-se na Figura 3.12(a) que o efeito do decaimento das cargas de superfície não foi muito relevante para a forma de onda de  $E_s(t)$  obtida na simulação. Isso ocorreu porque o valor de  $\sigma_{supm\acute{a}x}$  utilizado como parâmetro neste trabalho não foi tão grande, sendo apenas cinco vezes maior do que o da condutividade do ar, conforme mostrado anteriormente na Tabela 3.2.

A fim de elucidar melhor para o leitor o efeito do decaimento das cargas de superfície na forma de onda de  $E_s(t)$ , foram realizadas simulações com diferentes valores de  $\sigma_{supm\acute{a}x}$ . A partir dos resultados obtidos nestas simulações, pode ser observado na Figura 3.13 que quanto maior for o valor de  $\sigma_{supm\acute{a}x}$ , maior será o decaimento de  $E_s(t)$  com o passar do tempo.

Figura 3.13 – Campo elétrico devido às cargas de superfície para diferentes valores de condutividade máxima da superfície da cavidade.

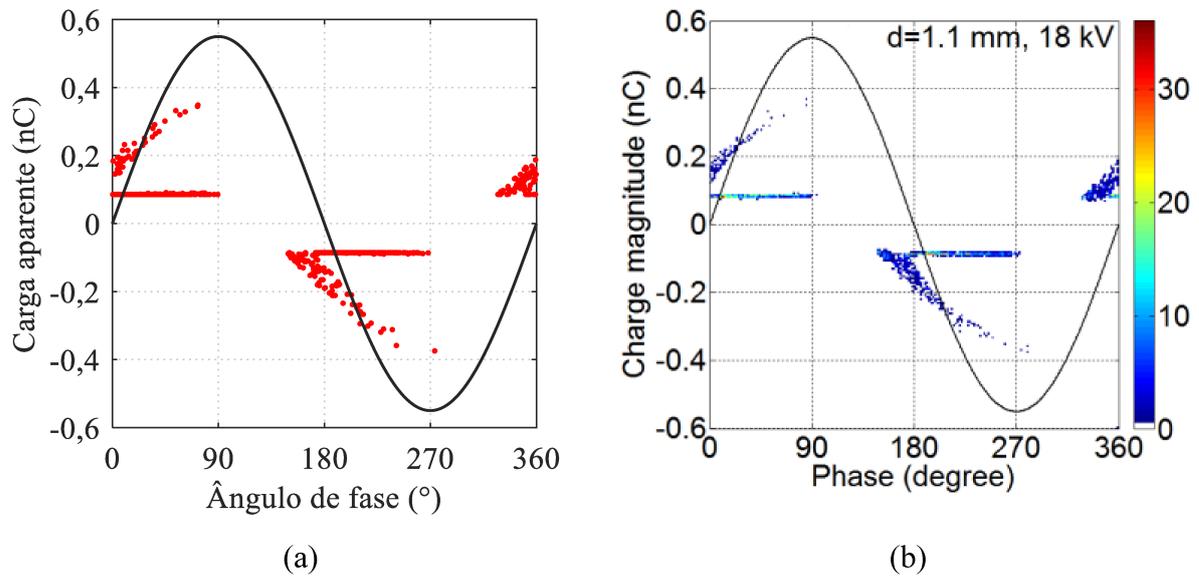


Fonte: elaboração própria.

### 3.10.3 Comparação entre dados simulados e experimentais

Ao longo da simulação, as cargas aparentes das diversas DPs que ocorreram na cavidade foram registradas. Com isso, ao final da simulação foi possível levantar o padrão PRPD que caracteriza o fenômeno simulado, o qual pode ser útil na prática para avaliação da gravidade do defeito que causou as DPs e da condição do isolamento. Na Figura 3.14, o padrão PRPD simulado é comparado com o padrão PRPD obtido experimentalmente por Illias (2011) para a mesma configuração de geometria e materiais. Nota-se em ambos os padrões a presença de linhas retas onde as DPs ocorrem com baixas magnitudes de carga e de curvas semelhantes à “orelha de um coelho” onde as DPs ocorrem com elevadas magnitudes de carga. Estes comportamentos são característicos de DPs internas que ocorrem em cavidades na fase inicial de envelhecimento de um material dielétrico (GUTFLEISCH, NIEMEYER, 1995). As grandes semelhanças entre os dois padrões PRPD apresentados na Figura 3.14 servem de validação para o modelo de simulação implementado.

Figura 3.14 – Comparação entre os padrões PRPD obtidos: (a) na simulação, (b) experimentalmente por Illias (2011).



Fonte: (a) elaboração própria, (b) Illias (2011).

O número médio de DPs geradas por ciclo ( $N_{DPs/ciclo}$ ), a carga aparente média por DP ( $q_{ap/DP}$ ), a carga aparente total por ciclo ( $q_{ap/ciclo}$ ), carga aparente máxima ( $q_{apmáx}$ ) e a carga aparente mínima ( $q_{apmín}$ ) são parâmetros importantes para avaliação da gravidade dos eventos das DPs e dos possíveis danos causados no sistema de isolamento. Verifica-se na Tabela 3.3 que os valores destes parâmetros obtidos na simulação estão coerentes com os dados experimentais levantados por Illias (2011). As pequenas diferenças entre os dados simulados e experimentais mostrados na Tabela 3.3 se devem ao caráter estocástico da DP e às eventuais simplificações matemáticas realizadas para modelagem do fenômeno da DP sem a necessidade da utilização da teoria quântica para calcular as taxas de geração de elétrons iniciais.

Tabela 3.3 – Comparação entre os resultados gerais simulados e experimentais.

Grandeza	Símbolo	Simulado	Experimental	Erro (%)
Número médio de DPs por ciclo	$N_{DPs/ciclo}$	6,46	6,50	-0,62
Carga aparente média por DP	$q_{ap/DP}$	102,37 pC	101,00 pC	1,58
Carga aparente total por ciclo	$q_{ap/ciclo}$	661,31 pC	651,00 pC	1,36
Carga aparente máxima	$q_{apmáx}$	374,50 pC	373,00 pC	0,40
Carga aparente mínima	$q_{apmín}$	83,46 pC	80,00 pC	4,32

Fonte: dados do autor e de Illias (2011).

O padrão PRPD mostrado na Figura 3.14(a) e os resultados apresentados na Tabela 3.3, obtidos na simulação inicial onde  $V_{aplmax} = 18$  kV e  $f = 50$  Hz, servirão como base para comparação com os resultados de diversas simulações que serão abordadas no Capítulo 4.

### 3.11 Considerações finais

Este capítulo apresentou todas as etapas do desenvolvimento do modelo para simulação de DPs em cavidades internas. Neste modelo foram incluídas equações matemáticas para calcular as taxas de geração de elétrons iniciais, a fim de representar o fenômeno da DP de forma realística, considerando seu aspecto estocástico. Para simular o transitório da DP, a condutividade da cavidade foi alterada sempre que as condições de ocorrência foram satisfeitas. O decaimento das cargas na superfície da cavidade foi modelado através da utilização de uma condutividade que se modifica com o passar do tempo. Com o modelo implementado é possível obter a evolução temporal do campo elétrico na cavidade, bem como sua distribuição espacial em toda a geometria. Os pulsos de corrente gerados pelas DPs ao longo do tempo também podem ser registrados. As cargas reais e aparentes das DP são facilmente calculadas a partir da integração das correntes na cavidade e no eletrodo de aterramento. Com isso, os padrões PRPD também podem ser obtidos. O algoritmo desenvolvido pelo autor foi explicado com detalhes, mostrando ainda a aprimoração feita em relação ao modelo original para reduzir os tempos de simulação. No final do capítulo, foi realizada uma primeira simulação aplicando-se uma tensão puramente senoidal, a fim de validar o modelo. O padrão PRPD e os demais resultados obtidos na simulação se mostraram bastante coerentes com os dados experimentais encontrados na literatura. Estes resultados serão úteis para comparação com outros que serão apresentados no Capítulo 4, para avaliar os efeitos das distorções harmônicas de tensão sobre as DPs.

## CAPÍTULO 4

### RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para avaliar os impactos das distorções harmônicas de tensão sobre o desenvolvimento de descargas parciais, o modelo desenvolvido no Capítulo 3 foi simulado com a aplicação de tensões distorcidas por diferentes componentes harmônicas individuais, com vários níveis de distorção e com ângulos de fase variados. Além disso, também foram feitas simulações a fim de avaliar os efeitos da combinação de várias ordens harmônicas com diferentes magnitudes, porém mantendo o mesmo nível de distorção total. Os resultados obtidos nas simulações são apresentados e discutidos neste capítulo.

#### 4.1 Distorções causadas por componentes harmônicas individuais

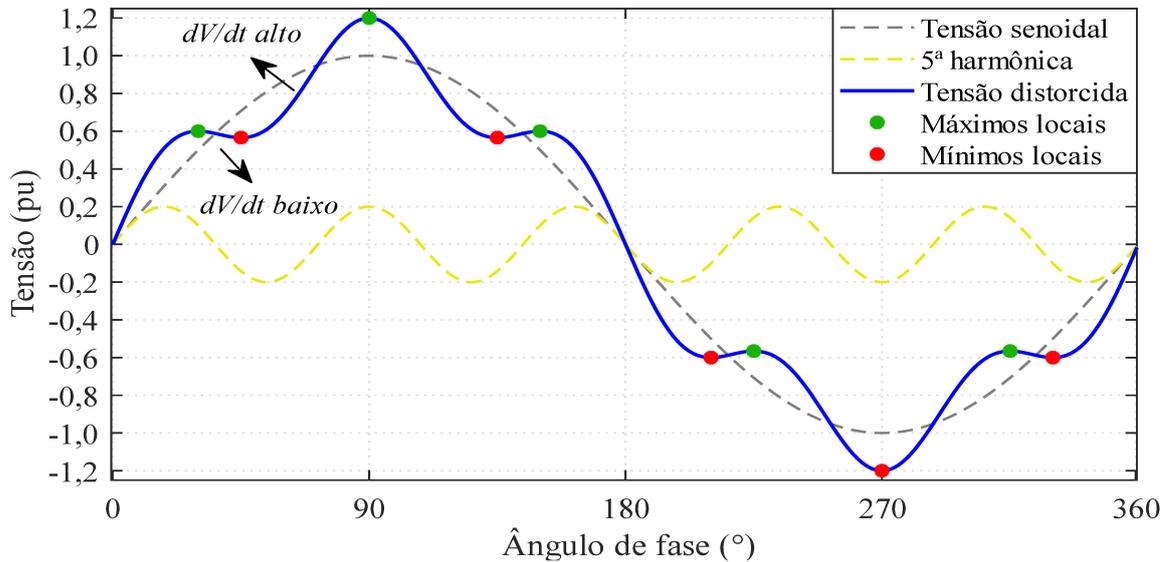
Inicialmente, tem-se o objetivo de avaliar os efeitos individuais de várias componentes harmônicas sobre as descargas parciais. Para isso, o modelo foi simulado com a presença das componentes harmônicas de 3ª, 5ª, 7ª, 9ª, 11ª e 13ª ordem e com níveis de distorção individual  $DIT_h\% = 1\%, 3\%, 5\%, 10\%, 15\%$  e  $20\%$ . Cada simulação foi executada por um período de 100 ciclos da tensão aplicada. Apenas harmônicas ímpares foram aplicadas porque são as que aparecem com mais frequência na rede elétrica (DE LA ROSA, 2006). Ressalta-se também que, nestas primeiras simulações, os ângulos de fase de todas as componentes harmônicas foram considerados iguais a  $0^\circ$ .

##### 4.1.1 Efeitos sobre o comportamento dinâmico das descargas parciais

As componentes harmônicas, quando somadas com a fundamental, deformam a forma de onda da tensão criando pontos de inflexão, os quais podem ser máximos ou mínimos locais. Desse modo, surgem variações locais da inclinação  $dV_{apl}(t)/dt$  na forma de onda da tensão aplicada, conforme ilustrado na Figura 4.1. Conseqüentemente, também são causadas variações locais das inclinações  $dE_{cav0}(t)/dt$  e  $dE_{cav}(t)/dt$  na forma de onda do campo elétrico na cavidade, sem ou com DP. Assim, a evolução temporal da atividade das DPs na cavidade é impactada por estas alterações de inclinação. Nas regiões da forma de onda em que  $dE_{cav0}(t)/dt$  é elevada, o valor de ruptura  $E_{rup}$  é mais facilmente atingido por  $E_{cav}(t)$ , tornando propícia a ocorrência das DPs. Já quando  $dE_{cav0}(t)/dt$  é baixa, dificilmente o valor de ruptura

$E_{rup}$  é alcançado, a não ser nos casos em que há um grande tempo de atraso estatístico, resultando em DPs com maiores magnitudes.

Figura 4.1 – Pontos de inflexão e alterações de inclinação na forma de onda da tensão devido à presença de uma componente harmônica.



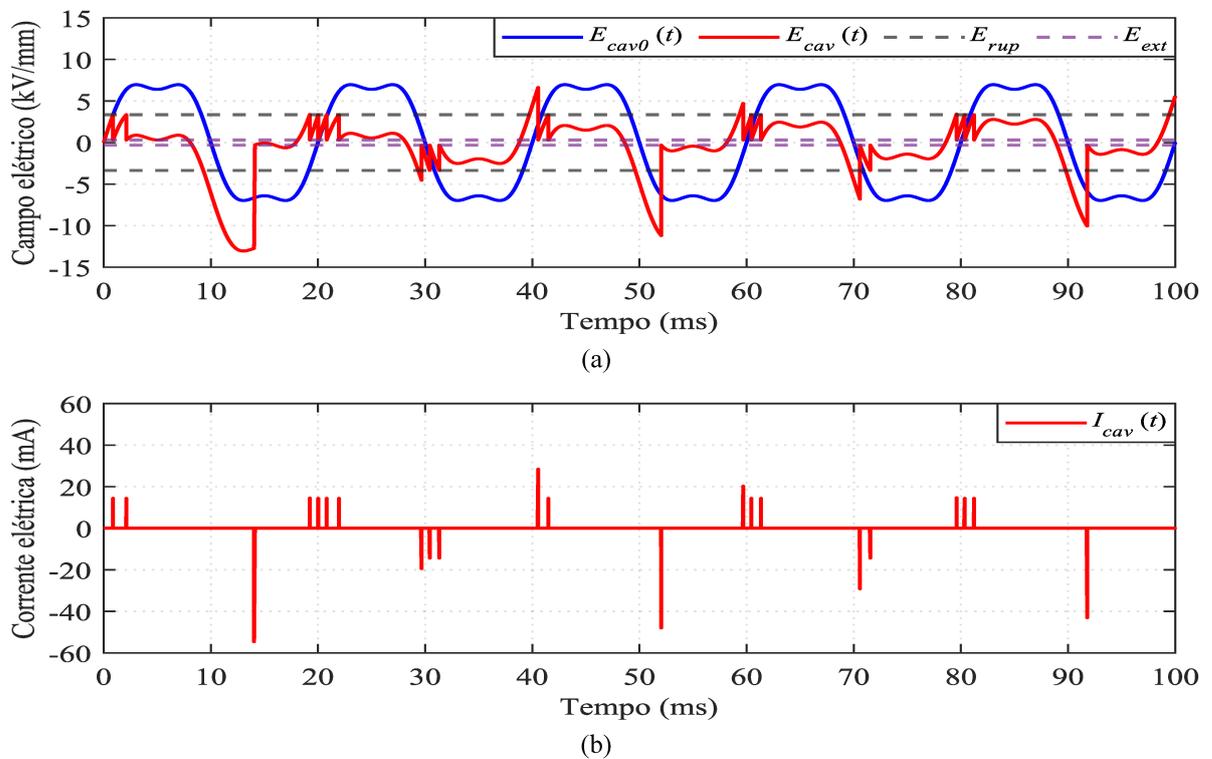
Fonte: elaboração própria.

Desse modo, o comportamento dinâmico das DPs é afetado pela diminuição ou aumento local das inclinações nas formas de onda de  $V_{apl}(t)$  e  $E_{cav0}(t)$ . Em alguns casos, um mínimo local pode causar até a interrupção do processo de descarga, enquanto que em outros o aumento da inclinação local pode resultar em uma forte amplificação da atividade das DPs.

Outro fator importante que impacta no desenvolvimento das DPs é o valor de pico da forma de onda, o qual é alterado na presença de componentes harmônicas. Por exemplo, considerando  $DIT_h\% = 20\%$ , a adição da terceira harmônica reduz o valor de pico em aproximadamente 13%, enquanto que a presença da quinta harmônica causa um aumento de 20% no valor de pico. Quando o valor de pico é incrementado, o número de DPs geradas na cavidade pode ser aumentado, pois com valores de pico maiores, mais vezes o campo elétrico  $E_{cav}(t)$  pode superar  $E_{rup}$  dentro de determinado intervalo de tempo. O efeito contrário também pode ser observado, ou seja, quando o valor de pico é reduzido, menos DPs podem acontecer na cavidade. Vale ressaltar que, além das características das formas de onda de  $V_{apl}(t)$  e  $E_{cav0}(t)$ , a evolução temporal da atividade das DPs é também muito influenciada pelo caráter estocástico da geração de elétrons iniciais, conforme explicado nos Capítulos 2 e 3.

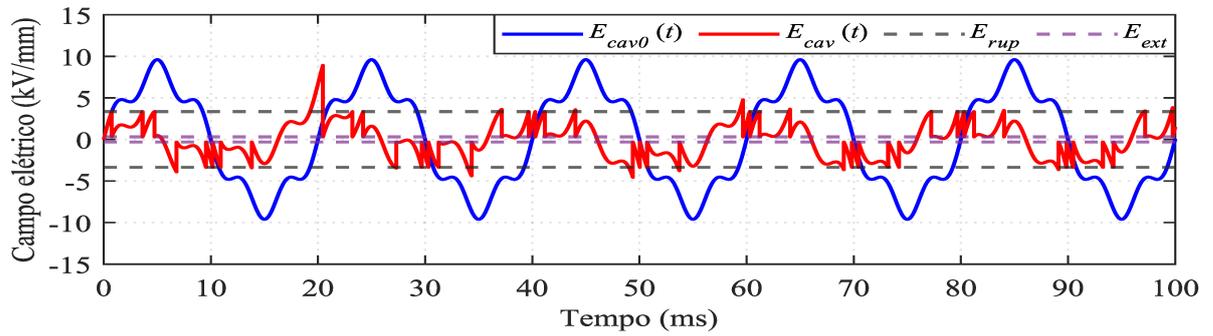
Os efeitos mencionados acima foram observados através dos resultados obtidos nas simulações, os quais podem ser constatados nas Figuras 4.2-4.7. Nestas figuras são apresentados os desenvolvimentos dos campos elétricos  $E_{cav0}(t)$  e  $E_{cav}(t)$ , e dos pulsos de corrente na cavidade  $I_{cav}(t)$ , durante os cinco primeiros ciclos das tensões distorcidas pelas componentes harmônicas de 3ª, 5ª, 7ª, 9ª, 11ª e 13ª ordem, respectivamente. Para esta primeira análise, são exibidos os resultados obtidos para  $DIT_h\% = 20\%$ , a fim de evidenciar os efeitos de cada distorção harmônica individual sobre o comportamento das DPs.

Figura 4.2 – Resultados obtidos com a aplicação da tensão distorcida pela 3ª harmônica: (a) campos elétricos em função do tempo, (b) pulsos de corrente das DPs geradas na cavidade ao longo do tempo.

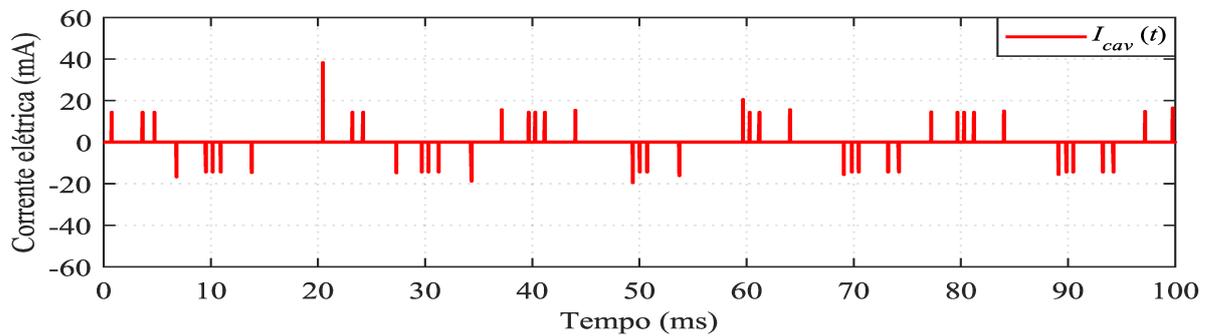


Fonte: elaboração própria.

Figura 4.3 – Resultados obtidos com a aplicação da tensão distorcida pela 5ª harmônica: (a) campos elétricos em função do tempo, (b) pulsos de corrente das DPs geradas na cavidade ao longo do tempo.



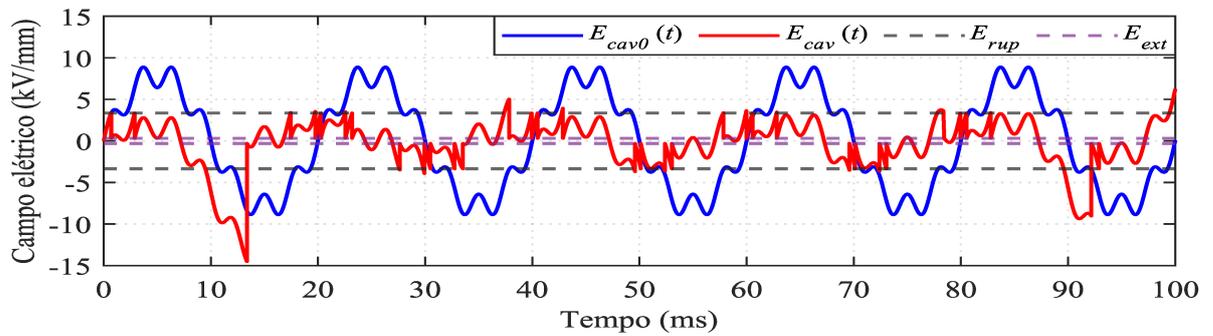
(a)



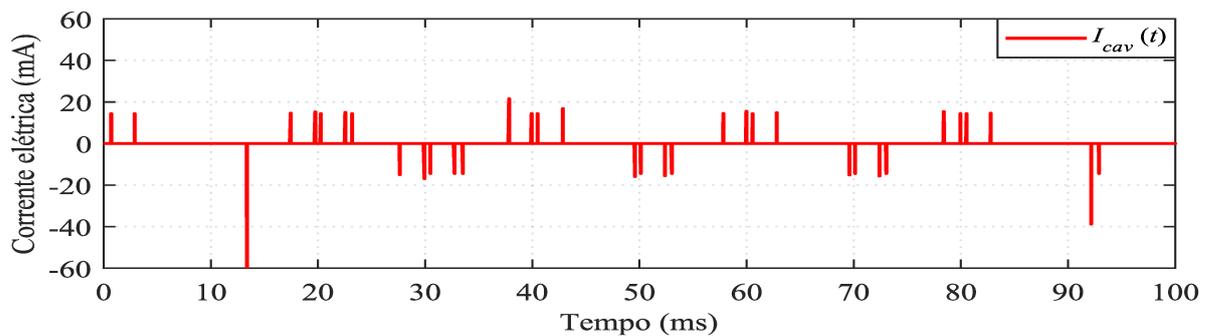
(b)

Fonte: elaboração própria.

Figura 4.4 – Resultados obtidos com a aplicação da tensão distorcida pela 7ª harmônica: (a) campos elétricos em função do tempo, (b) pulsos de corrente das DPs geradas na cavidade ao longo do tempo.



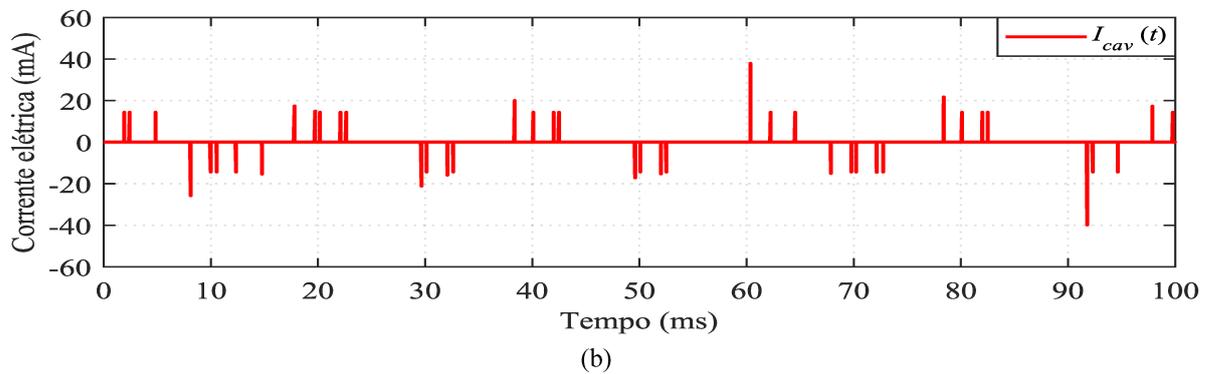
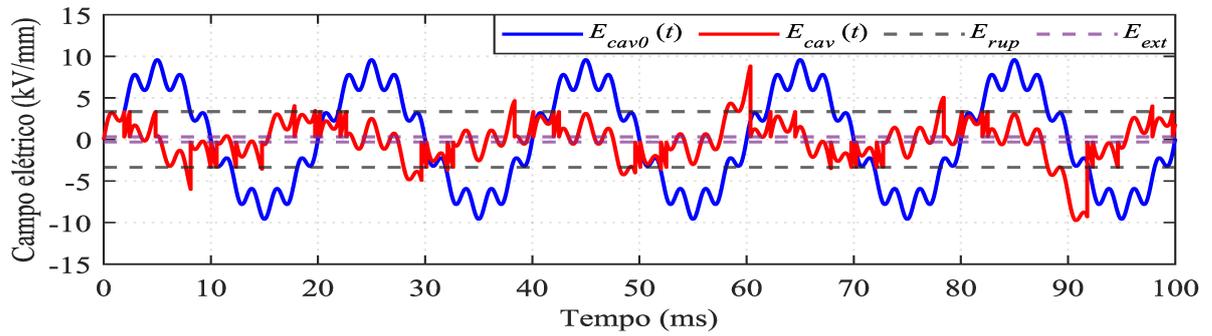
(a)



(b)

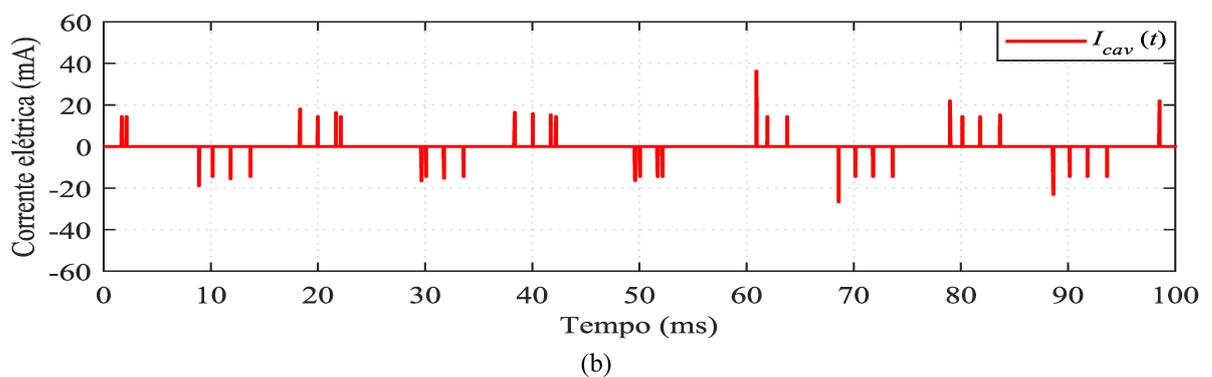
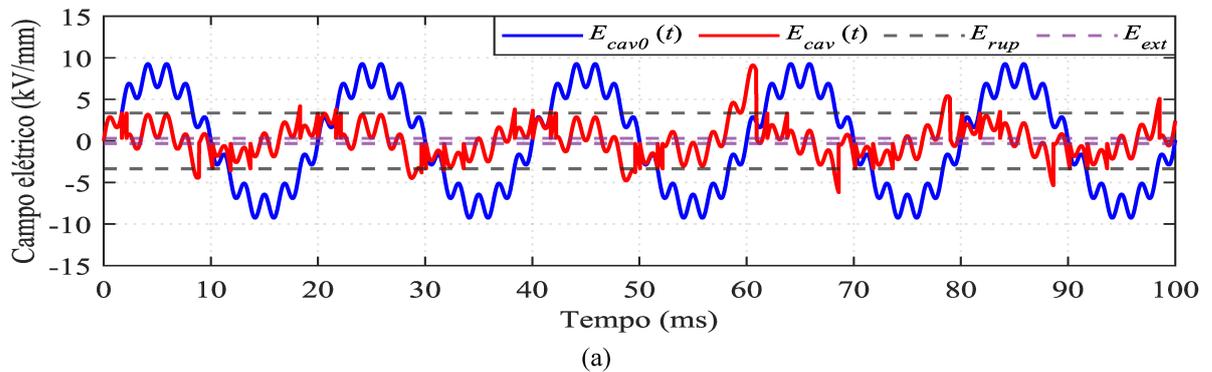
Fonte: elaboração própria.

Figura 4.5 – Resultados obtidos com a aplicação da tensão distorcida pela 9ª harmônica: (a) campos elétricos em função do tempo, (b) pulsos de corrente das DPs geradas na cavidade ao longo do tempo.



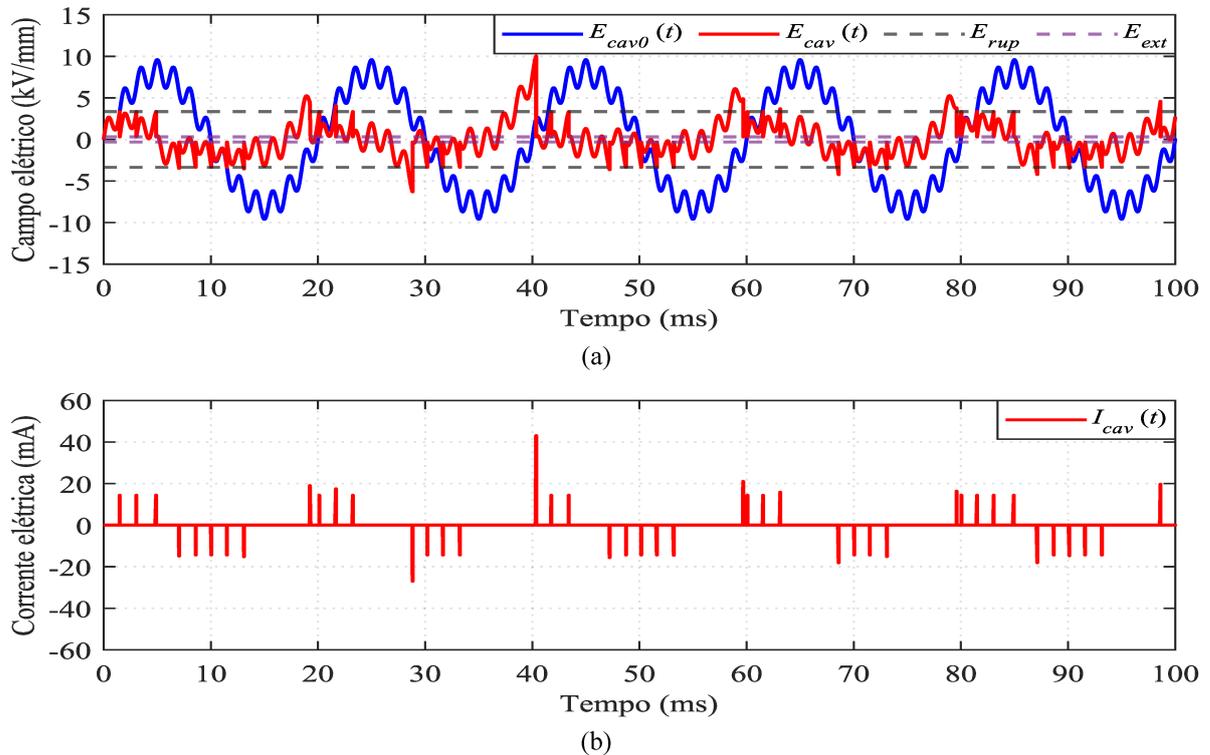
Fonte: elaboração própria.

Figura 4.6 – Resultados obtidos com a aplicação da tensão distorcida pela 11ª harmônica: (a) campos elétricos em função do tempo, (b) pulsos de corrente das DPs geradas na cavidade ao longo do tempo.



Fonte: elaboração própria.

Figura 4.7 – Resultados obtidos com a aplicação da tensão distorcida pela 13ª harmônica: (a) campos elétricos em função do tempo, (b) pulsos de corrente das DPs geradas na cavidade ao longo do tempo.



Fonte: elaboração própria.

Verifica-se nas Figuras 4.2-4.7 que a ocorrência das DPs variou de forma considerável para aplicação de cada componente harmônica individual. Com a adição da componente de terceira harmônica, observa-se na Figura 4.2(a) o aparecimento de seis pontos de inflexão na forma de onda  $E_{cav0}(t)$ , sendo três máximos e três mínimos locais. Nos intervalos entre os máximos e mínimos locais, as inclinações  $dE_{cav0}(t)/dt$  são muito baixas, o que dificulta a ocorrência das DPs, causando grandes defasagens entre descargas consecutivas, como pode ser visto na Figura 4.2(b). Além disso, o valor de pico de  $E_{cav0}(t)$  foi bastante reduzido. Por estes motivos, pode-se observar na Figura 4.2(b) que o número de DPs geradas com a presença da terceira harmônica foi menor em comparação com o caso de referência no qual a tensão aplicada foi puramente senoidal (Figura 3.11).

Na Figura 4.3(a), constata-se os efeitos da componente de quinta harmônica no grande aumento do valor de pico da forma de onda de  $E_{cav0}(t)$  e na criação de cinco máximos e cinco mínimos locais. Nota-se na Figura 4.3(a) que a maioria das DPs aconteceram nas regiões da forma de onda de alta inclinação  $dE_{cav0}(t)/dt$ . Este fato, aliado ao fato do valor de pico de  $E_{cav0}(t)$  ter se elevado bastante, justifica o aumento do número de DPs geradas por causa da

adição da componente de quinta harmônica, como pode ser visto na Figura 4.3(b). Por outro lado, também pode ser observado na Figura 4.3(b) que em regiões de baixa inclinação  $dE_{cav0}(t)/dt$ , a atividade das DPs foi interrompida, causando também, neste caso, atrasos entre DPs consecutivas e a criação de regiões chamadas de ‘zonas mortas’, onde não ocorreram DPs.

A adição da componente de sétima harmônica produziu os efeitos na forma de onda  $E_{cav0}(t)$  mostrados na Figura 4.4(a). Neste caso, observa-se o surgimento de sete máximos e sete mínimos locais, os quais influenciam nas variações da inclinação  $dE_{cav0}(t)/dt$ , afetando os momentos de ocorrência das DPs. Nos pontos centrais da forma de onda (em  $\varphi = 90^\circ$  e  $\varphi = 270^\circ$ ), percebe-se uma redução significativa da magnitude de  $E_{cav0}(t)$ , resultando em grandes interrupções para ocorrência de DPs nestas regiões. Todavia, o valor de pico de  $E_{cav0}(t)$  foi aumentado em comparação com o caso de referência sem distorção harmônica, porém este aumento foi menor do que para a componente de quinta harmônica. Dessa forma, o número de DPs geradas na presença da sétima harmônica foi maior do que nos casos sem distorção e com a terceira harmônica, porém foi inferior quando comparado com a adição da quinta harmônica.

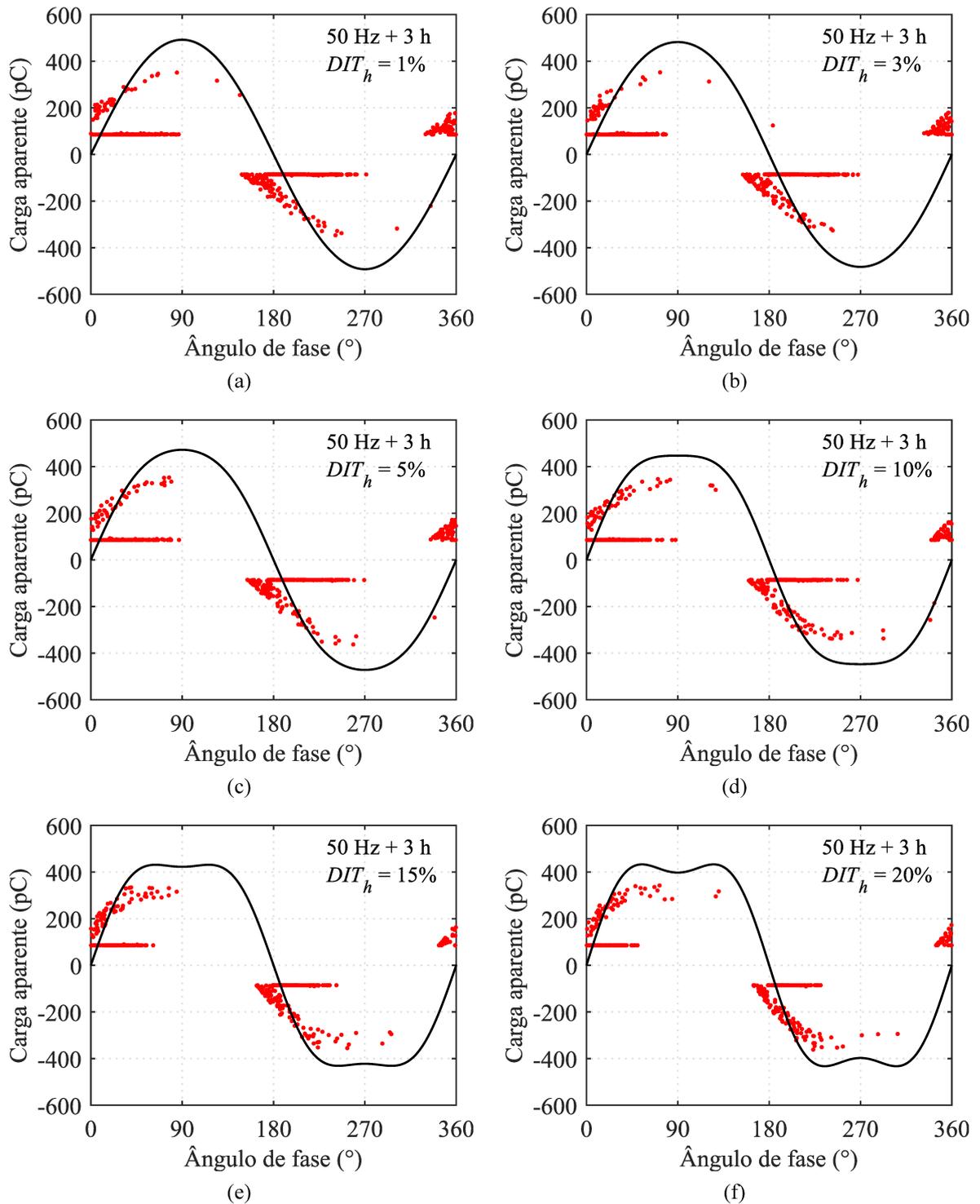
Nas Figuras 4.5-4.7 foram apresentados os impactos das componentes harmônicas de 9ª, 11ª e 13ª ordem no desenvolvimento das DPs. Percebe-se nestes casos a criação de uma grande quantidade de pontos de inflexão nas formas de onda de  $E_{cav0}(t)$ , aumentando consideravelmente o número de vezes em que a inclinação  $dE_{cav0}(t)/dt$  é alterada. Mais uma vez, pode ser constatado que as ocorrências das DPs foram concentradas nas regiões de elevada inclinação  $dE_{cav0}(t)/dt$ . Também podem ser notados os atrasos e interrupções de eventos consecutivos de descarga nos intervalos onde a magnitude de  $E_{cav0}(t)$  é reduzida devido à presença de mínimos locais. Além disso, verifica-se nas Figuras 4.5-4.7 que os valores de pico de  $E_{cav0}(t)$  foram elevados em 20%, 16% e 20% com a adição das componentes de 9ª, 11ª e 13ª ordem, respectivamente. Isso faz com que o número de DPs geradas aumente nestes três casos, sendo este aumento mais expressivo para a 9ª e 13ª harmônica, conforme pode ser visto nas Figuras 4.5(b) e 4.7(b).

#### 4.1.2 Efeitos sobre os padrões PRPD

As deformações nas formas de onda causadas pelas componentes harmônicas também impactaram nas características dos padrões PRPD, os quais sofreram alterações significativas à medida que o valor de  $DIT_h\%$  foi incrementado. As Figuras 4.8–4.13 mostram os padrões

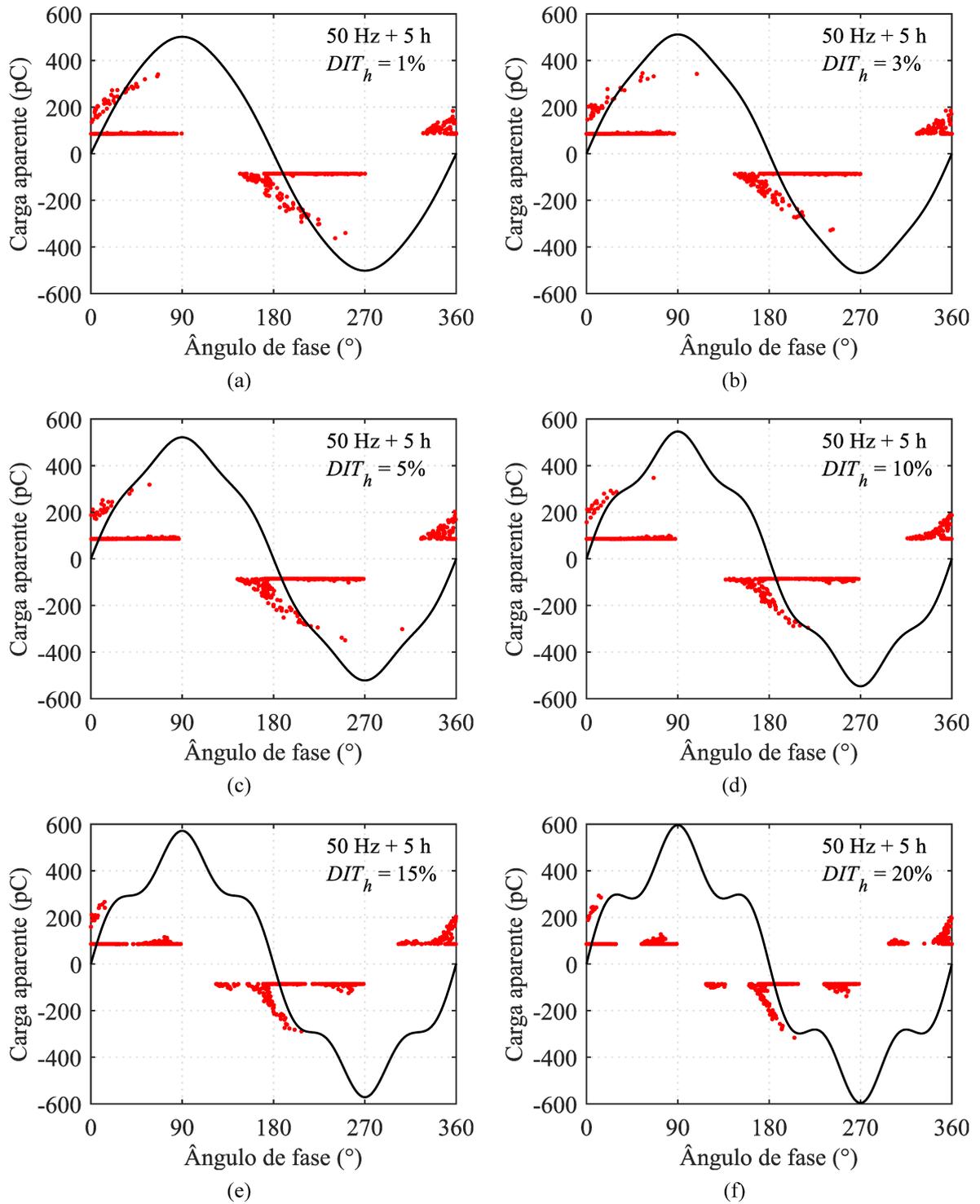
PRPD obtidos nas simulações com a presença das componentes harmônicas de 3<sup>a</sup>, 5<sup>a</sup>, 7<sup>a</sup>, 9<sup>a</sup>, 11<sup>a</sup> e 13<sup>a</sup> ordem, respectivamente. Em cada um dos casos, aplicou-se também diferentes porcentagens de  $DIT_h\%$  (1%, 3%, 5%, 10%, 15% e 20%).

Figura 4.8 – Padrões PRPD obtidos nos casos em que foram aplicadas tensões distorcidas pela 3<sup>a</sup> harmônica com  $DIT_h\% =$ : (a) 1%, (b) 3%, (c) 5%, (d) 10%, (e) 15%, (f) 20%.



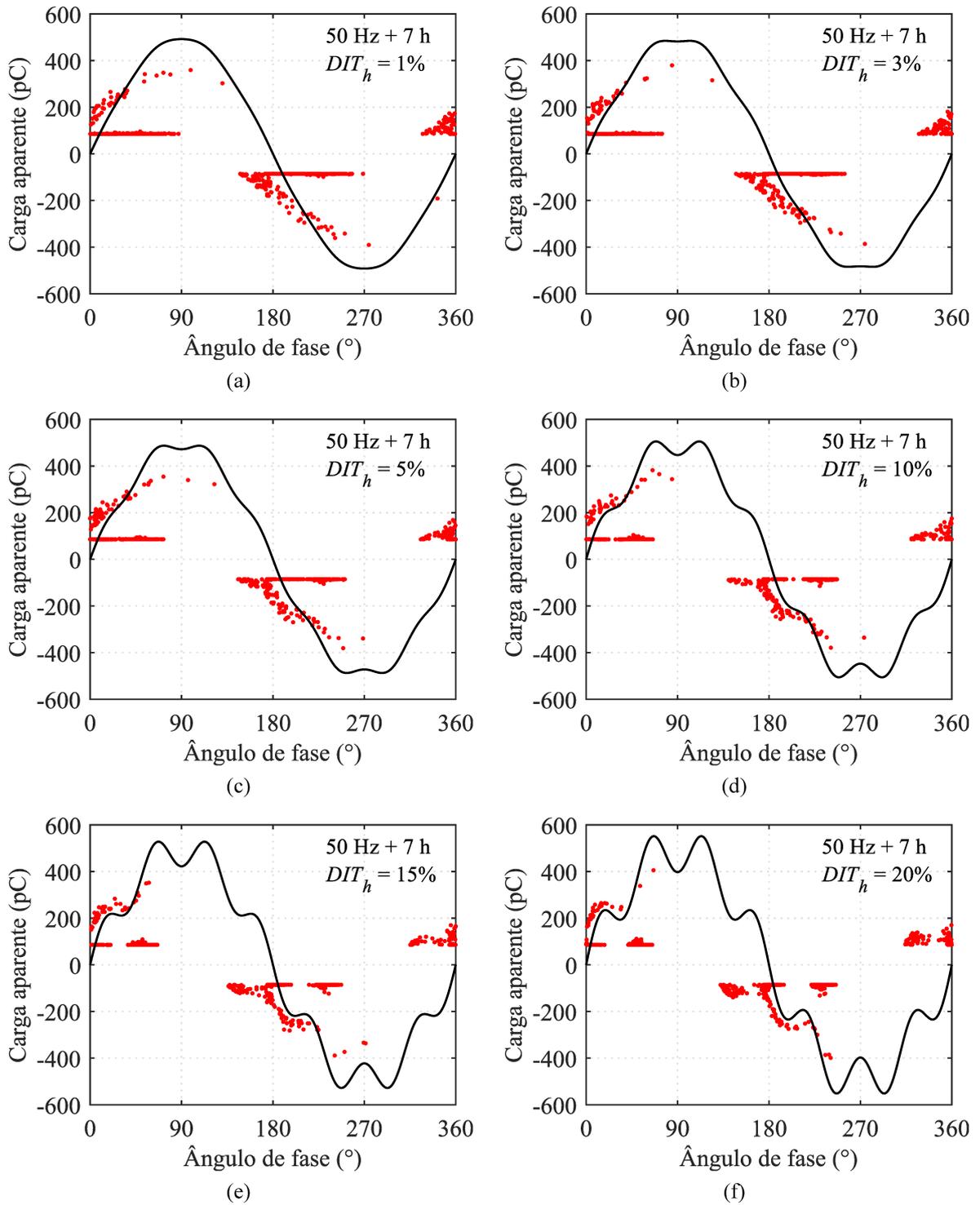
Fonte: elaboração própria.

Figura 4.9 – Padrões PRPD obtidos nos casos em que foram aplicadas tensões distorcidas pela 5ª harmônica com  $DIT_h\% =$  : (a) 1%, (b) 3%, (c) 5%, (d) 10%, (e) 15%, (f) 20%.



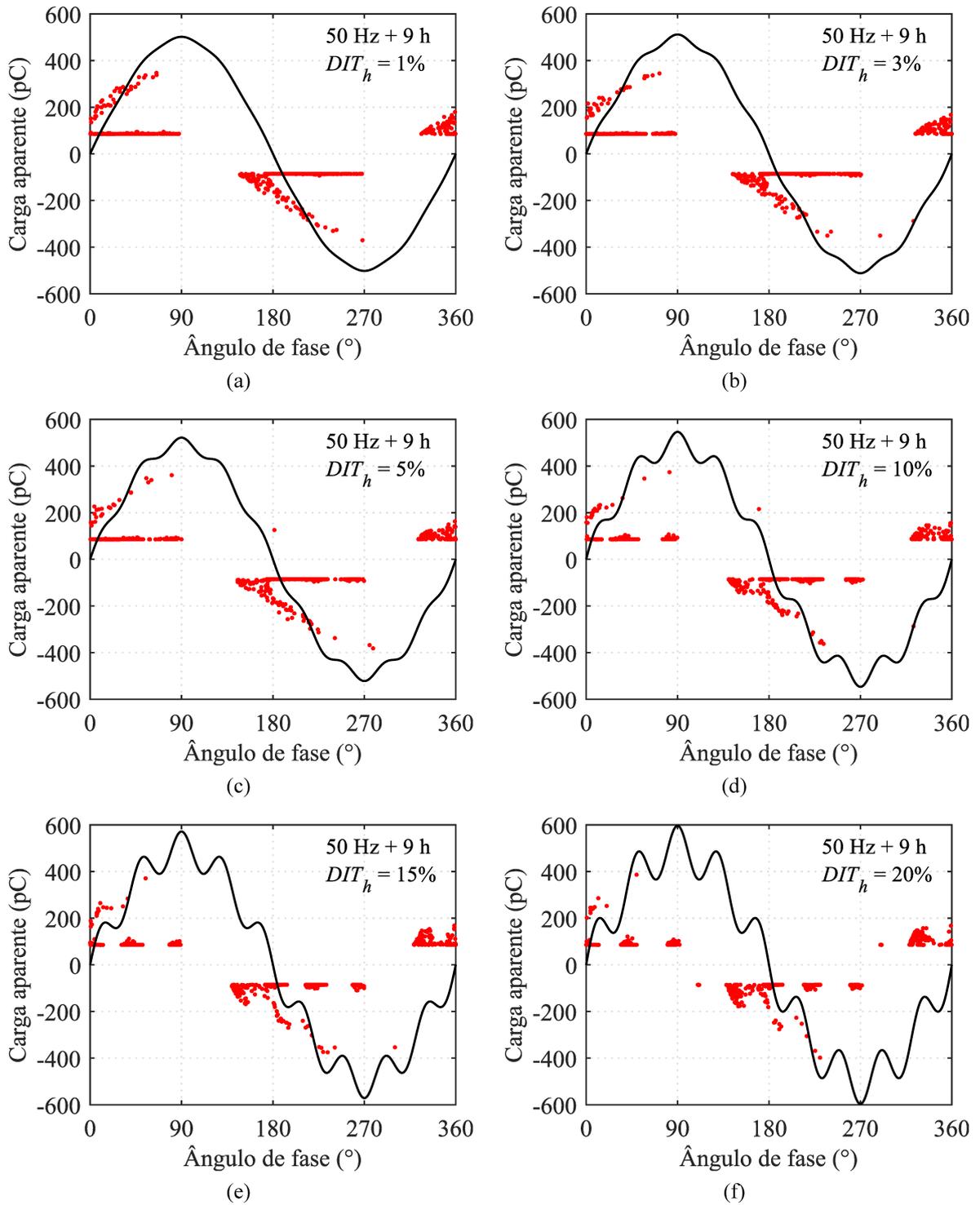
Fonte: elaboração própria.

Figura 4.10 – Padrões PRPD obtidos nos casos em que foram aplicadas tensões distorcidas pela 7ª harmônica com  $DIT_h\%$  = : (a) 1%, (b) 3%, (c) 5%, (d) 10%, (e) 15%, (f) 20%.



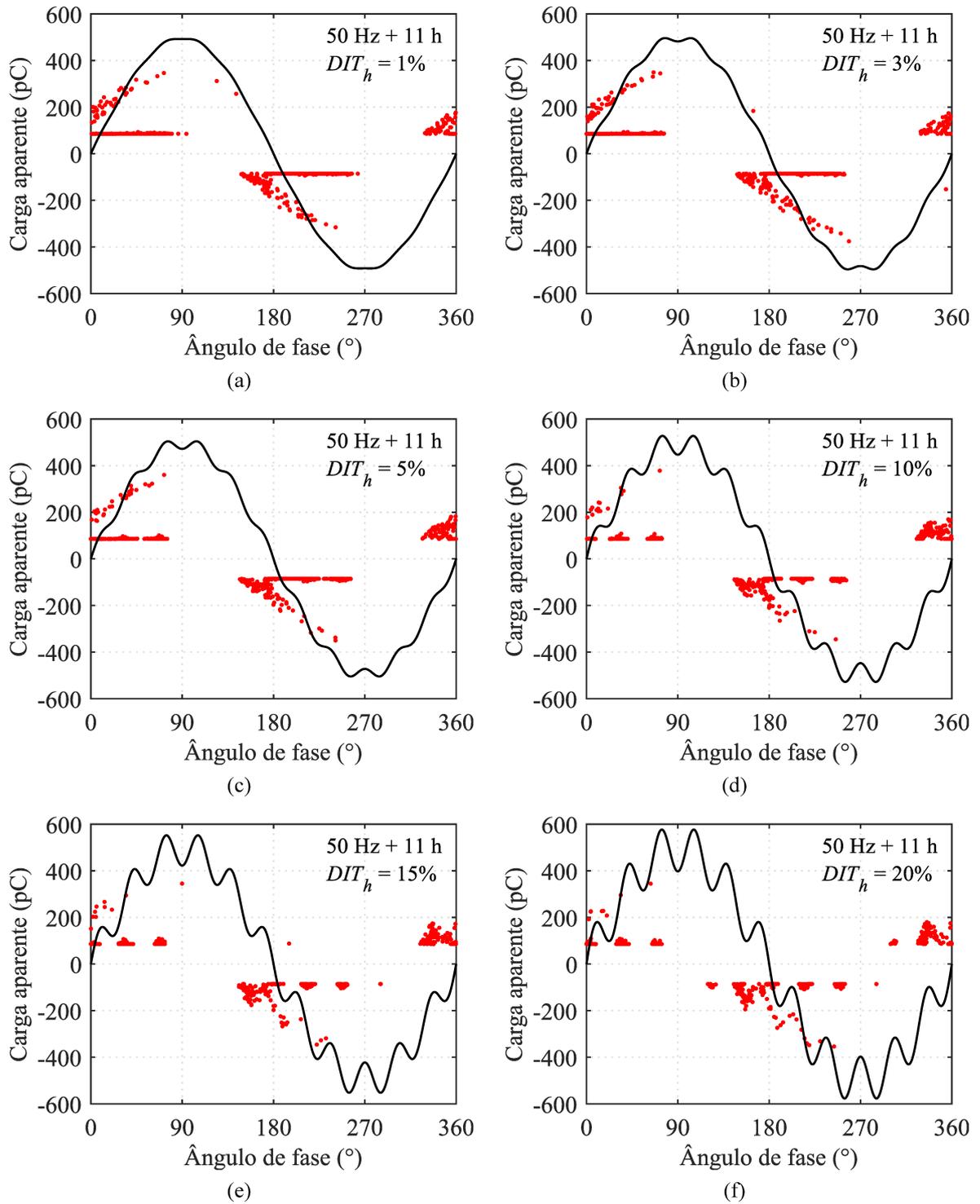
Fonte: elaboração própria.

Figura 4.11 – Padrões PRPD obtidos nos casos em que foram aplicadas tensões distorcidas pela 9ª harmônica com  $DIT_h\%$  = : (a) 1%, (b) 3%, (c) 5%, (d) 10%, (e) 15%, (f) 20%.



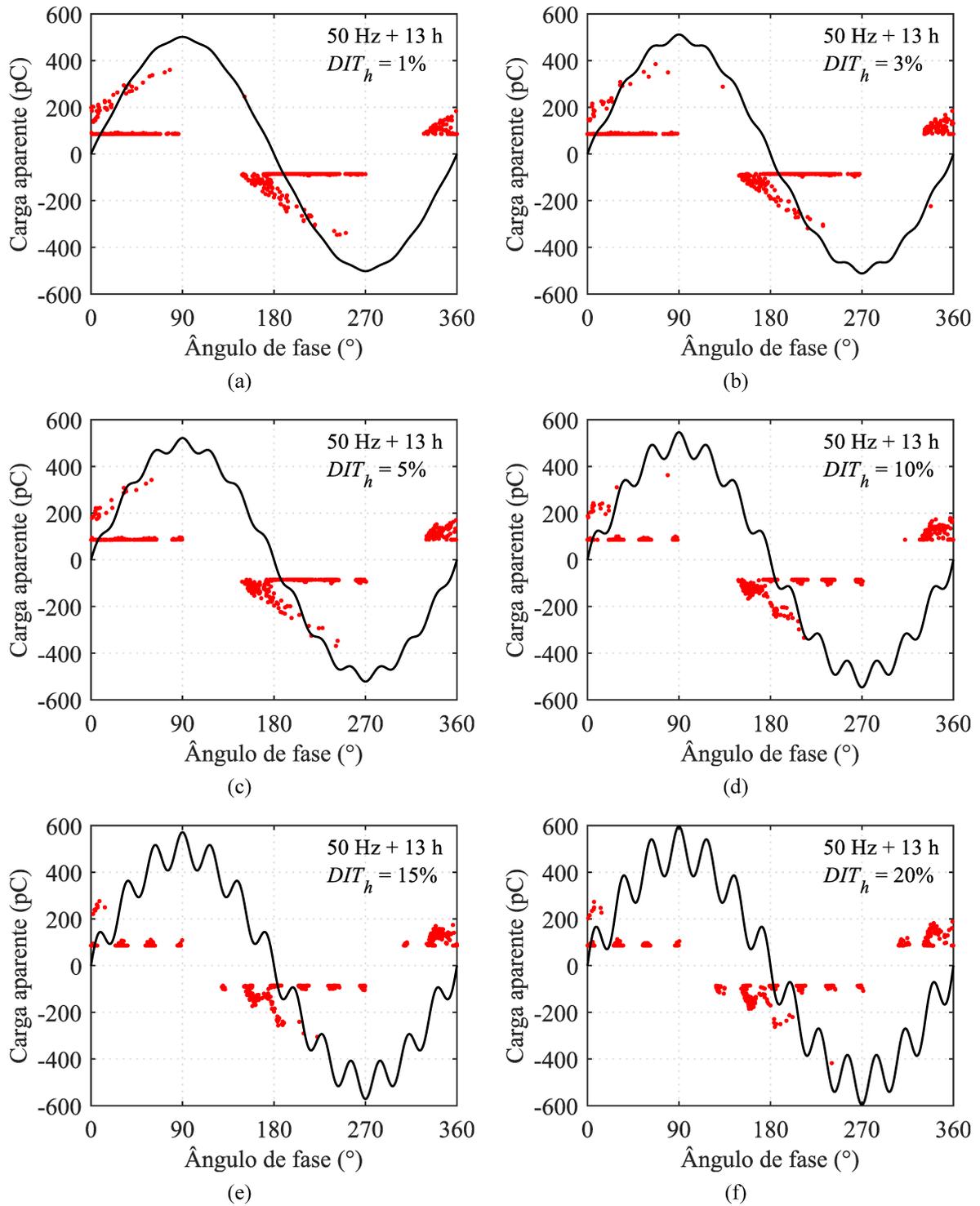
Fonte: elaboração própria.

Figura 4.12 – Padrões PRPD obtidos nos casos em que foram aplicadas tensões distorcidas pela 11ª harmônica com  $DIT_h\%$  = : (a) 1%, (b) 3%, (c) 5%, (d) 10%, (e) 15%, (f) 20%.



Fonte: elaboração própria.

Figura 4.13 – Padrões PRPD obtidos nos casos em que foram aplicadas tensões distorcidas pela 13ª harmônica com  $DIT_h\%$  = : (a) 1%, (b) 3%, (c) 5%, (d) 10%, (e) 15%, (f) 20%.



Fonte: elaboração própria.

Os efeitos causados pelas distorções harmônicas explicados na subseção 4.1.1 também podem ser observados nos padrões PRPD. Analisando a Figura 4.8, verifica-se que conforme o valor de  $DIT_h\%$  foi aumentado para a componente de terceira harmônica, as DPs ocorreram

em faixas de ângulo de fase menores (com exceção das DPs atrasadas pela necessidade do suprimento de elétrons iniciais). Por exemplo, para valores de  $DIT_h\% = 15\%$  e  $20\%$  (Figuras 4.8(e) e 4.8(f)), a mudança na concentração de cargas para as regiões fora dos pontos de inflexão centrais pode ser vista claramente.

Nos gráficos da Figura 4.9 também podem ser percebidas mudanças substanciais nas características dos padrões PRPD à medida que a forma de onda da tensão é distorcida pela componente de quinta harmônica. Nota-se que para valores elevados de  $DIT_h\%$ , foram criadas zonas mortas nos intervalos de fase em que a magnitude de  $E_{cav0}(t)$  foi reduzida devido às alterações na inclinação  $dE_{cav0}(t)/dt$ . Por outro lado, verifica-se também grandes concentrações de cargas das DPs nas regiões em que a inclinação  $dE_{cav0}(t)/dt$  foi elevada.

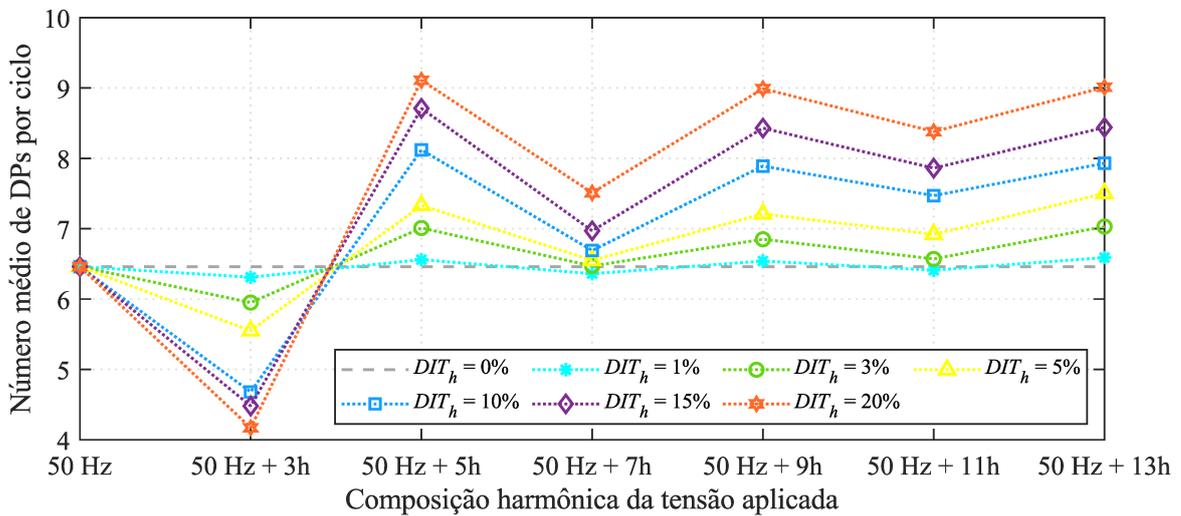
Comportamentos semelhantes aos mencionados acima podem ser observados também nas Figuras 4.10-4.13, nas quais foram apresentados os padrões PRPD obtidos nas simulações para as demais componentes harmônicas de 7ª, 9ª, 11ª e 13ª ordem. Analisando estas figuras, percebe-se que a quantidade de pontos de inflexão aumenta para ordens harmônicas mais elevadas, resultando no surgimento de maiores quantidades de zonas mortas nos padrões PRPD. Este efeito foi mais notável para valores mais altos de  $DIT_h\%$ . Portanto, pode-se concluir que quanto maiores forem a ordem harmônica e o nível de distorção  $DIT_h\%$ , mais significativa será a deformação visível no padrão PRPD em comparação com o caso sem distorção.

As alterações nos padrões PRPD mostrados nas Figuras 4.8-4.13, causadas pelas distorções harmônicas de tensão, podem prejudicar a identificação do tipo da DP e a avaliação de sua gravidade. A partir de publicações científicas e normas internacionais, sabe-se que cada tipo de DP produz um padrão PRPD característico (IEC, 2012; IEEE, 2014; FRUTH; FUHR, 1990; HUDSON; BELEC, 2005; FLORKOWSKI, 2020; ARAÚJO; DE OLIVEIRA; BARROS, 2022), o que normalmente permite que um sistema de monitoramento reconheça imediatamente o defeito e a intensidade das DPs, após comparar as características do padrão PRPD obtido com as de padrões PRPD previamente registrados. Como visto nas Figuras 4.8–4.13, com a presença de uma componente harmônica, o padrão PRPD pode ser completamente alterado dependendo do nível de distorção. Como consequência, torna-se difícil correlacionar o padrão PRPD obtido com os padrões PRPD típicos das diferentes fontes de DPs, o que pode dificultar o diagnóstico da condição do sistema de isolamento.

### 4.1.3 Resultados gerais

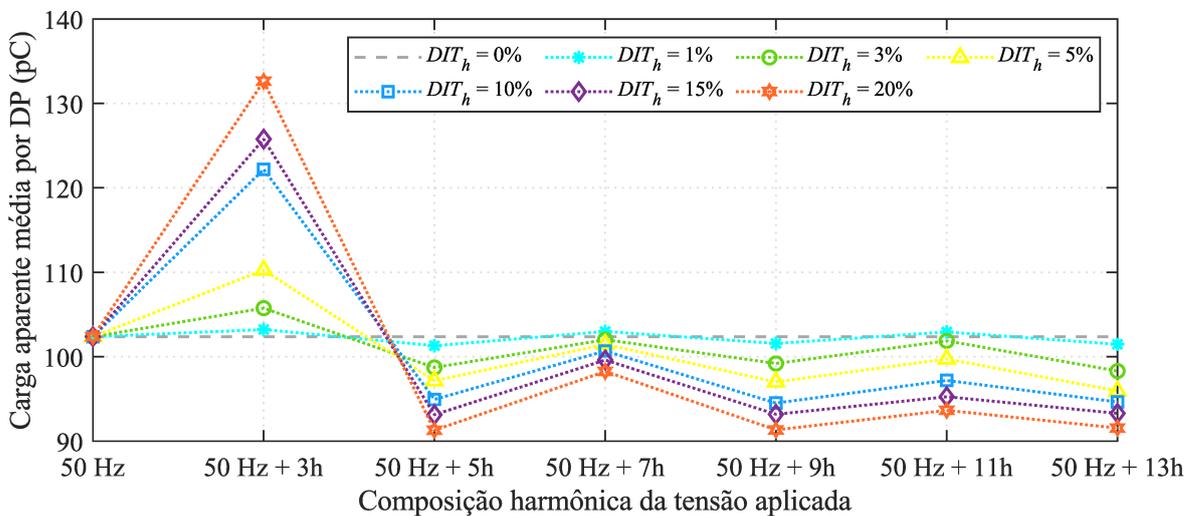
Na Tabela 3.3 foram apresentados os resultados gerais da simulação inicial onde foi aplicada uma tensão puramente senoidal. Estes dados servem de referência para comparação com os resultados obtidos nas demais simulações realizadas com a aplicação de tensões distorcidas. Desse modo, pode ser visto nas Figuras 4.14-4.17 que os parâmetros  $N_{DPs/ciclo}$ ,  $q_{ap/DP}$ ,  $q_{ap/ciclo}$  e  $q_{apm\acute{a}x}$  sofreram alterações para diferentes ordens harmônicas e níveis de distorção  $DIT_h\%$ . A exceção foi  $q_{apm\acute{i}n}$ , que se manteve constante em todas as simulações devido ao fato de que o valor do campo de ruptura mínimo ( $E_{rup}$ ) foi mantido inalterado.

Figura 4.14 – Número médio de DPs geradas por ciclo em função da composição harmônica e do nível de distorção da tensão aplicada.



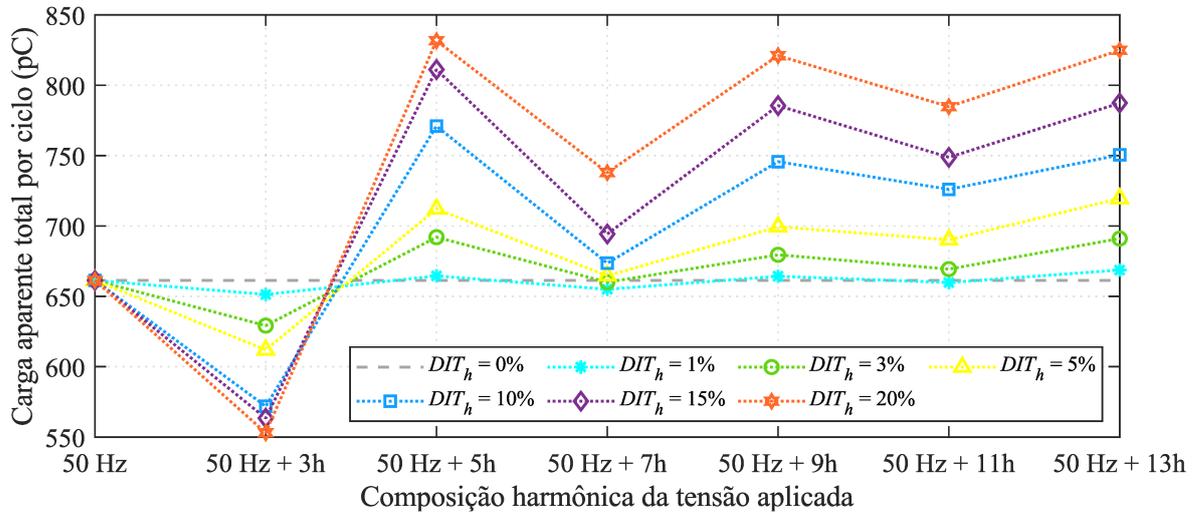
Fonte: elaboração própria.

Figura 4.15 – Carga aparente média por DP em função da composição harmônica e do nível de distorção da tensão aplicada.



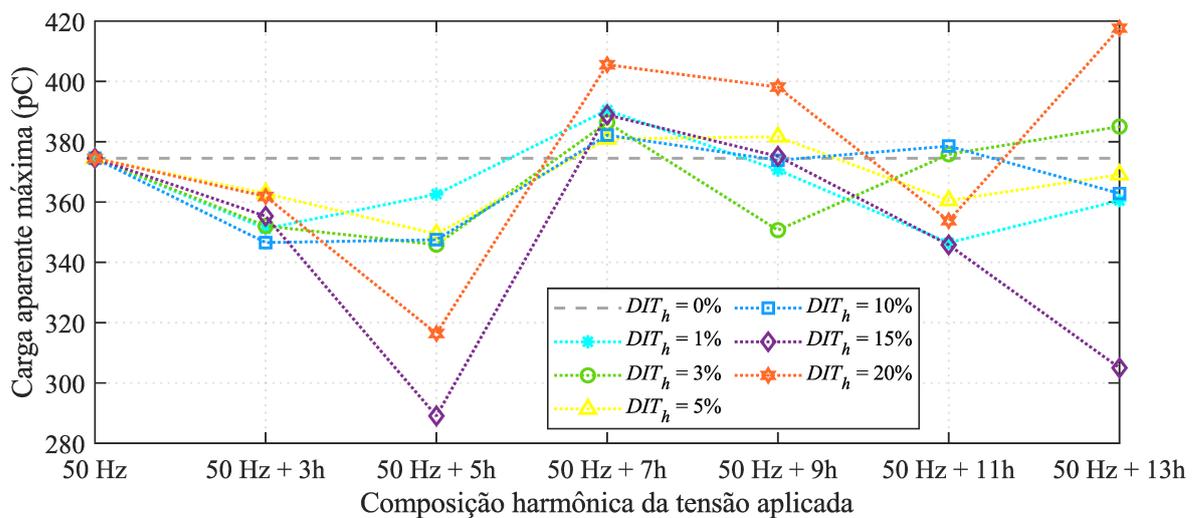
Fonte: elaboração própria.

Figura 4.16 – Carga aparente total por ciclo em função da composição harmônica e do nível de distorção da tensão aplicada.



Fonte: elaboração própria.

Figura 4.17 – Carga aparente máxima em função da composição harmônica e do nível de distorção da tensão aplicada.



Fonte: elaboração própria.

Analisando as Figuras 4.14-4.16, observa-se que para  $DIT_h\% = 1\%$ , as variações de  $N_{DPs/ciclo}$ ,  $q_{ap/DP}$  e  $q_{ap/ciclo}$  foram mínimas (quase imperceptíveis) em relação ao caso de referência sem distorção. No entanto, para valores de  $DIT_h\%$  acima de 3%, nota-se que as distorções harmônicas passam a afetar as características das DPs, causando variações significativas nos valores de  $N_{DPs/ciclo}$ ,  $q_{ap/DP}$  e  $q_{ap/ciclo}$  conforme  $DIT_h$  é incrementado.

Observa-se na Figura 4.14 que as distorções causadas por quase todas as componentes harmônicas analisadas resultaram em aumento do  $N_{DPs/ciclo}$  à medida que  $DIT_h$  foi aumentado,

com exceção da componente de terceira harmônica, que gerou efeito contrário. Conforme visto anteriormente, a quantidade de DPs geradas é influenciada pelas regiões de alta e baixa inclinação  $dE_{cav0}(t)/dt$ , pelas posições dos máximos e mínimos locais, pelos atrasos estatísticos e, predominantemente, pelo valor de pico da forma de onda de  $E_{cav0}(t)$ . Dessa forma, percebe-se na Figura 4.14 que como a componente de terceira harmônica causou grandes reduções nos valores de pico ao passo que  $DIT_h$  foi aumentado, então  $N_{DPs/ciclo}$  reduziu. No caso extremo em que  $DIT_h\% = 20\%$ , obteve-se  $N_{DPs/ciclo} = 4,17$ , ou seja, houve uma redução de 35,45% em relação ao caso em que a tensão aplicada foi puramente senoidal.

As componentes harmônicas que causaram os maiores aumentos no número de DPs geradas por ciclo foram as de quinta, nona e décima terceira ordem, como evidenciado na Figura 4.14. Isso ocorreu principalmente porque estas componentes causaram grandes elevações dos valores de pico nas regiões centrais da forma de onda conforme  $DIT_h\%$  foi aumentado. Com  $DIT_h\% = 20\%$ , obteve-se  $N_{DPs/ciclo} = 9,11$  para a 5ª harmônica (aumento de 41,02%),  $N_{DPs/ciclo} = 8,99$  para a 9ª harmônica (aumento de 39,16%) e  $N_{DPs/ciclo} = 9,01$  para a 13ª harmônica (aumento de 39,47%).

Em relação aos efeitos das distorções causadas pelas componentes de 7ª e 11ª ordem, nota-se na Figura 4.14 que estas também promoveram aumentos do  $N_{DPs/ciclo}$ , porém foram um pouco menos expressivos, uma vez que para estas componentes os valores de picos atingidos foram menores do que para as componentes de 5ª, 9ª e 13ª ordem e, além disso, estão localizados fora das regiões centrais da forma de onda. Assim, no caso extremo quando  $DIT_h\% = 20\%$ , registrou-se  $N_{DPs/ciclo} = 7,51$  para a 7ª harmônica (aumento de 16,25%) e  $N_{DPs/ciclo} = 8,38$  para a 11ª harmônica (aumento de 29,72%).

As distorções harmônicas de tensão também afetaram a carga aparente média das DPs geradas, conforme mostrado na Figura 4.15. Percebe-se nesta figura que os valores de  $q_{ap/DP}$  se alteraram de forma contrária aos dos valores de  $N_{DPs/ciclo}$  mostrados na Figura 4.14. Isso aconteceu porque quando o número de DPs geradas foi menor (como no caso da 3ª harmônica), mais descargas aconteceram de forma atrasada devido ao menor fornecimento de elétrons iniciais, resultando em DPs com maiores magnitudes de carga. Já nos casos em que o  $N_{DPs/ciclo}$  aumentou, observou-se a ocorrência de DPs com magnitudes de carga um pouco menores, conforme esperado.

Na Figura 4.16 foram mostrados os valores da carga aparente total gerada por ciclo pelas DPs em função das composições harmônicas e do nível de  $DIT_h\%$ . O parâmetro  $q_{ap/ciclo}$  depende do número de DPs por ciclo e das magnitudes das cargas aparentes individuais de cada DP, sendo calculado pela multiplicação entre  $N_{DPs/ciclo}$  e  $q_{ap/DP}$ . Analisando a Figura 4.16, podem ser observados comportamentos muito semelhantes aos da Figura 4.14, o que mostra que na presença das distorções harmônicas, as variações de  $N_{DPs/ciclo}$  foram predominantes sobre as variações de  $q_{ap/DP}$ .

Os valores máximos das cargas aparentes obtidas em cada simulação foram apresentados na Figura 4.17. A princípio, constata-se nesta figura que o comportamento de  $q_{apmáx}$  não teve nenhuma relação direta com o aumento da ordem harmônica e do nível de  $DIT_h\%$ . Neste caso, predominou-se o fator estocástico da geração de elétrons iniciais, resultando em valores de  $q_{apmáx}$  aparentemente aleatórios.

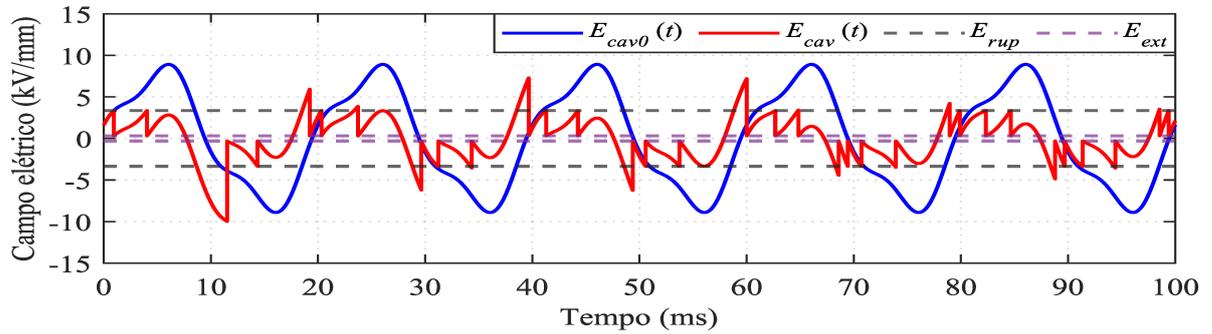
## 4.2 Distorções causadas por componentes harmônicas com ângulos de fase variados

Todos os resultados apresentados na Seção 4.1 foram obtidos considerando os ângulos de fase das harmônicas ( $\varphi_h$ ) iguais a  $0^\circ$ . No entanto, sabe-se que devido à presença de cargas não lineares e de outras perturbações no sistema elétrico, podem surgir diferentes tipos de componentes harmônicas, inclusive aquelas com ângulos de fase diferentes de  $0^\circ$ . Portanto, para avaliar a influência de  $\varphi_h$  nas características das DPs, o modelo implementado foi simulado para as componentes harmônicas de 3ª e 5ª ordem aplicando-se outros três ângulos de fase diferentes ( $90^\circ$ ,  $180^\circ$  e  $270^\circ$ ). Nas seis simulações, o valor de  $DIT_h\%$  foi mantido em 20%.

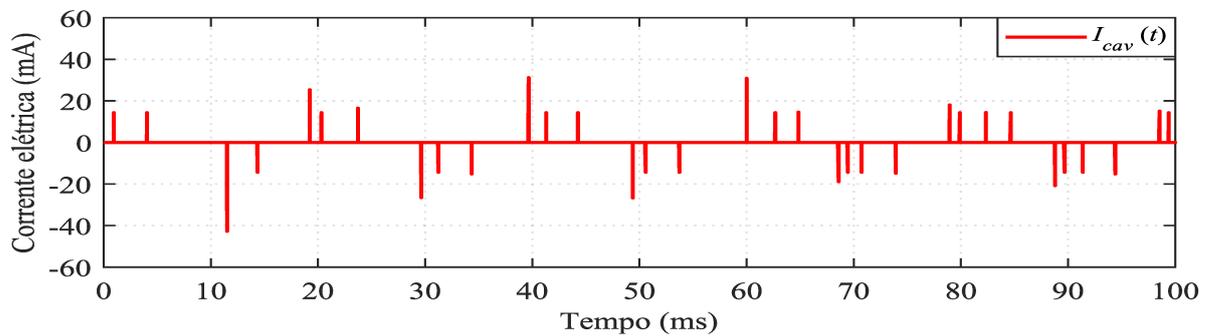
### 4.2.1 Efeitos sobre o comportamento dinâmico das descargas parciais

Os resultados obtidos nas simulações mostraram que, além das magnitudes das componentes harmônicas, seus ângulos de fase também afetaram a dinâmica de ocorrência das DPs. Nas Figuras 4.18-4.23 são exibidos os comportamentos dos campos elétricos  $E_{cav0}(t)$  e  $E_{cav}(t)$ , e dos pulsos de corrente  $I_{cav}(t)$ , na presença da terceira e da quinta harmônica, considerando  $\varphi_h = 90^\circ$ ,  $\varphi_h = 180^\circ$  e  $\varphi_h = 270^\circ$  para ambas as componentes.

Figura 4.18 – Resultados obtidos com a aplicação da tensão distorcida pela 3ª harmônica com  $\varphi_h = 90^\circ$  : (a) campos elétricos em função do tempo, (b) pulsos de corrente das DPs geradas na cavidade ao longo do tempo.



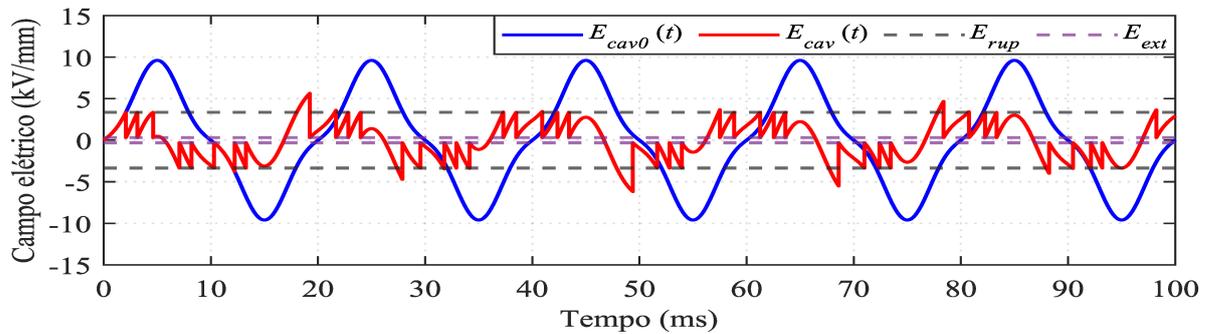
(a)



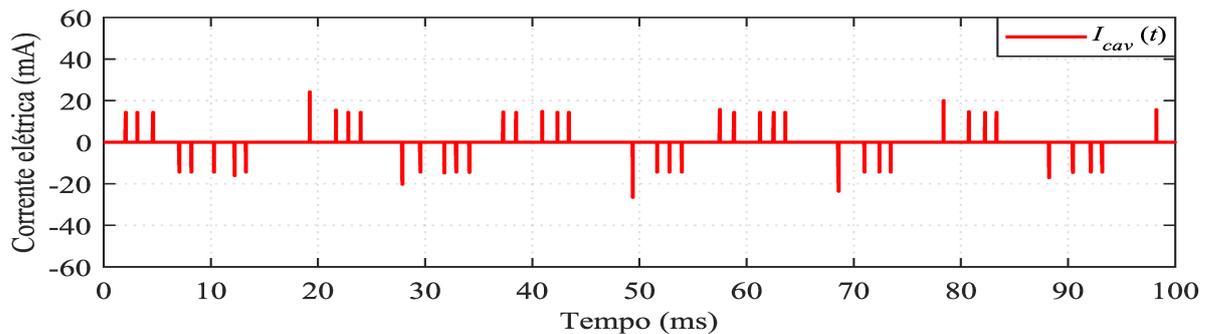
(b)

Fonte: elaboração própria.

Figura 4.19 – Resultados obtidos com a aplicação da tensão distorcida pela 3ª harmônica com  $\varphi_h = 180^\circ$  : (a) campos elétricos em função do tempo, (b) pulsos de corrente das DPs geradas na cavidade ao longo do tempo.



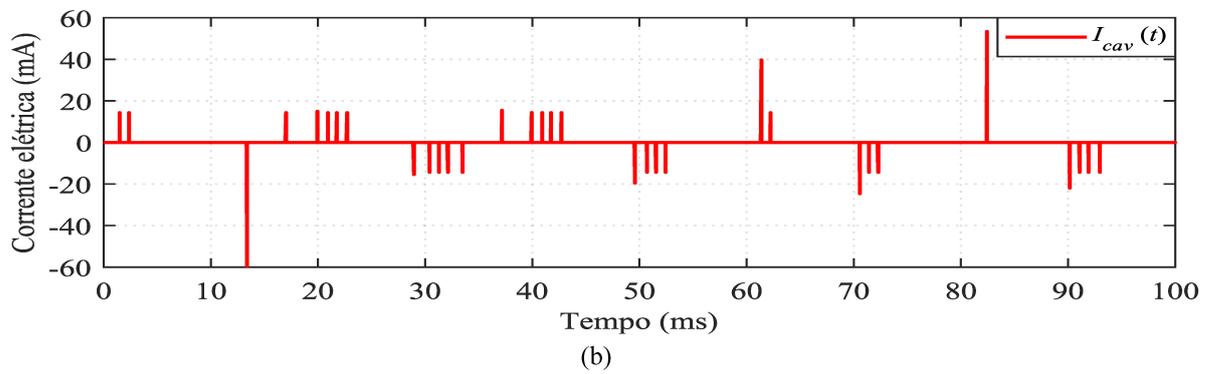
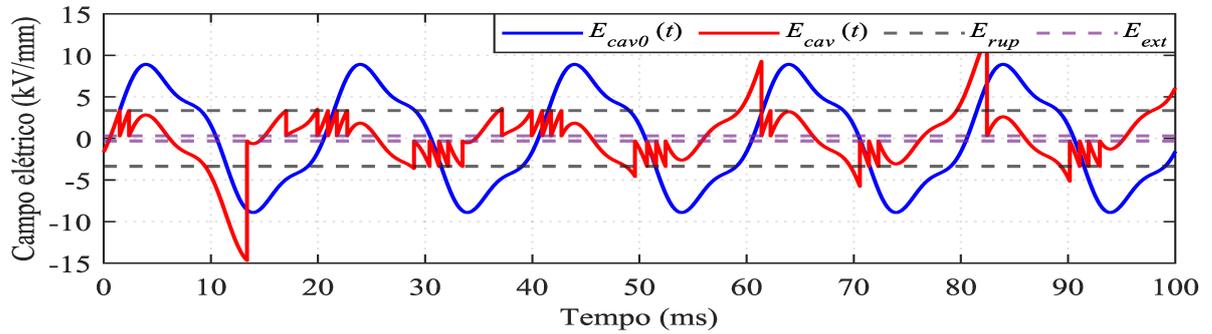
(a)



(b)

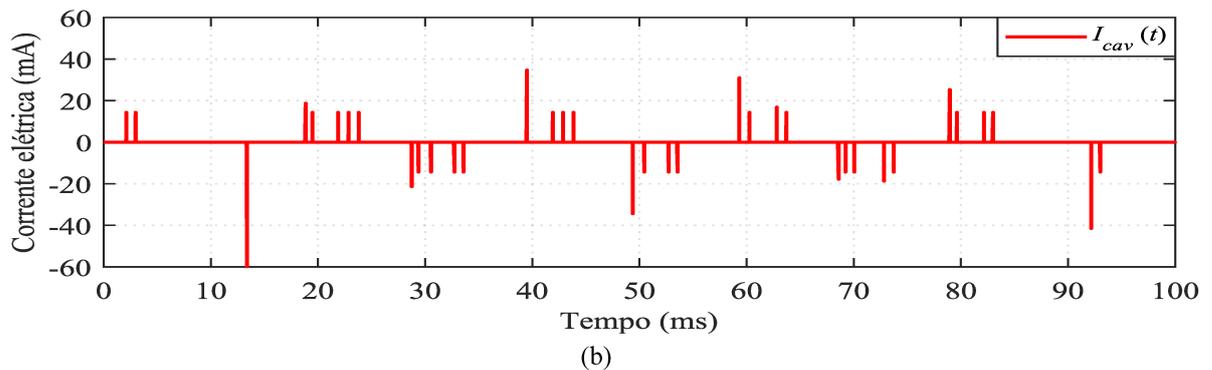
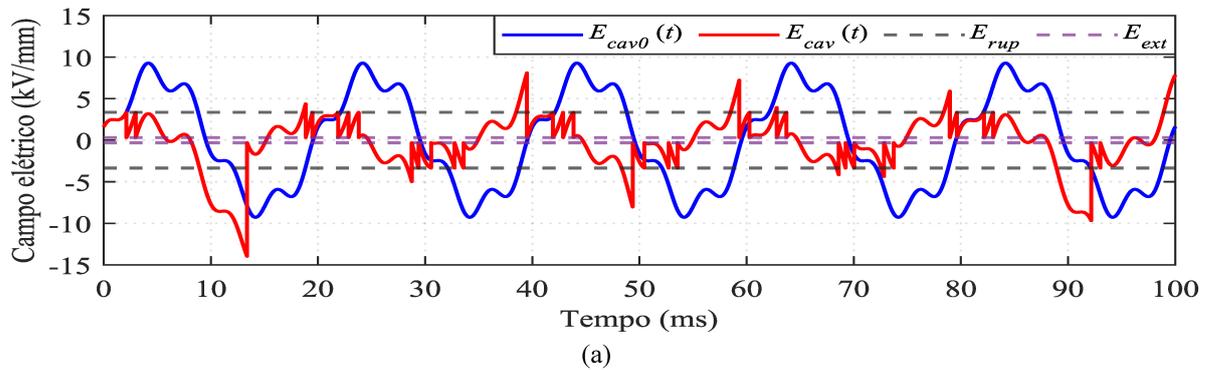
Fonte: elaboração própria.

Figura 4.20 – Resultados obtidos com a aplicação da tensão distorcida pela 3ª harmônica com  $\varphi_h = 270^\circ$  : (a) campos elétricos em função do tempo, (b) pulsos de corrente das DPs geradas na cavidade ao longo do tempo.



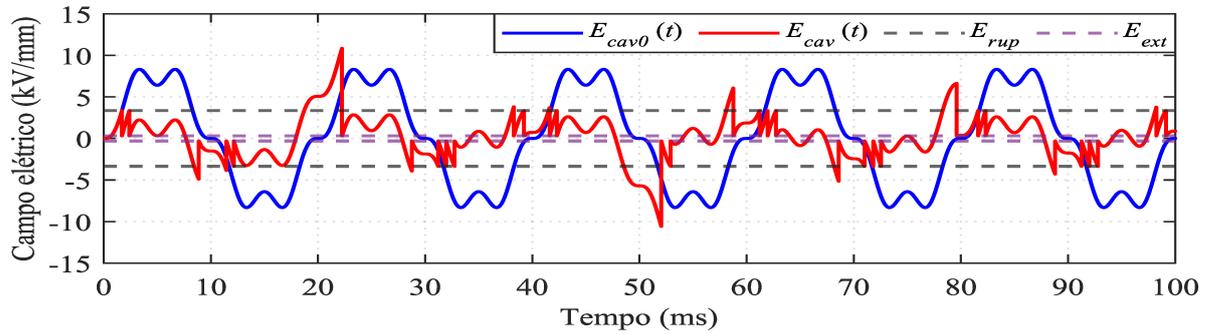
Fonte: elaboração própria.

Figura 4.21 – Resultados obtidos com a aplicação da tensão distorcida pela 5ª harmônica com  $\varphi_h = 90^\circ$  : (a) campos elétricos em função do tempo, (b) pulsos de corrente das DPs geradas na cavidade ao longo do tempo.

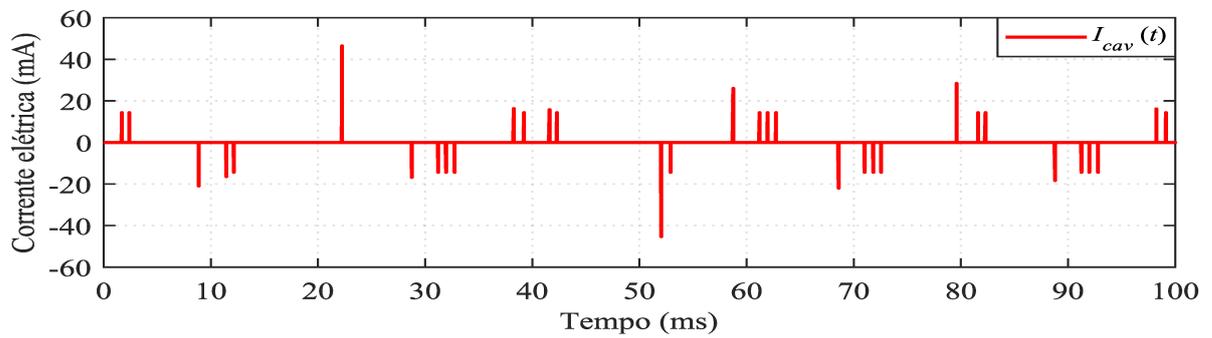


Fonte: elaboração própria.

Figura 4.22 – Resultados obtidos com a aplicação da tensão distorcida pela 5ª harmônica com  $\varphi_h = 180^\circ$ : (a) campos elétricos em função do tempo, (b) pulsos de corrente das DPs geradas na cavidade ao longo do tempo.



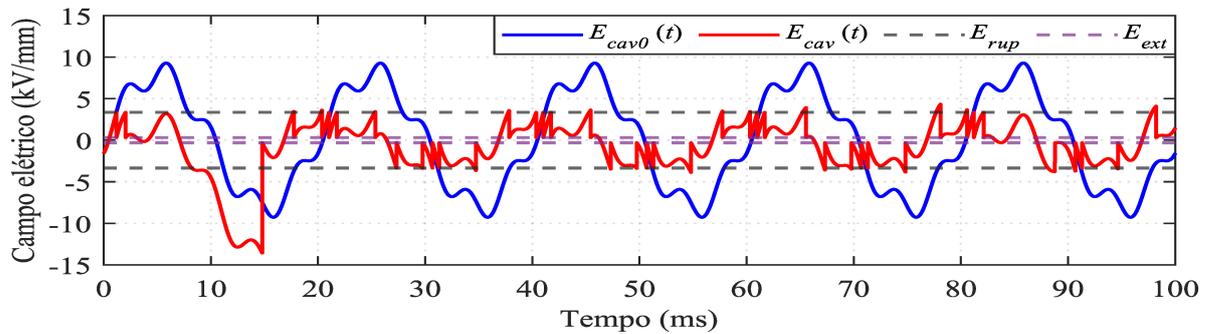
(a)



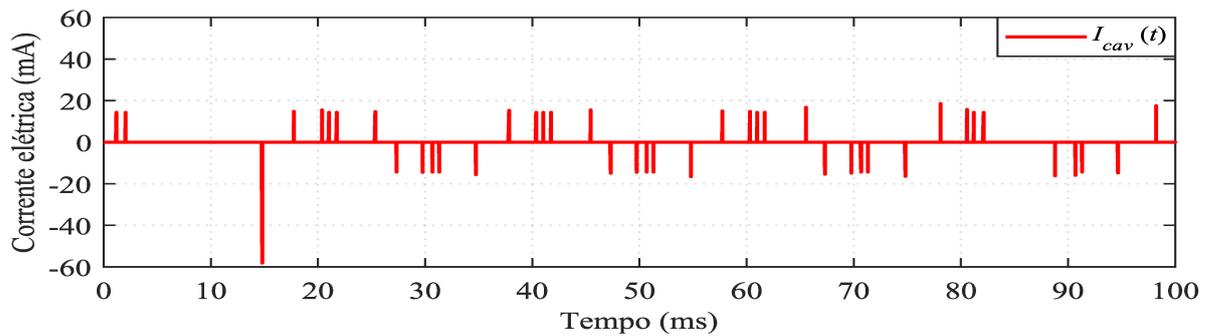
(b)

Fonte: elaboração própria.

Figura 4.23 – Resultados obtidos com a aplicação da tensão distorcida pela 5ª harmônica com  $\varphi_h = 270^\circ$ : (a) campos elétricos em função do tempo, (b) pulsos de corrente das DPs geradas na cavidade ao longo do tempo.



(a)



(b)

Fonte: elaboração própria.

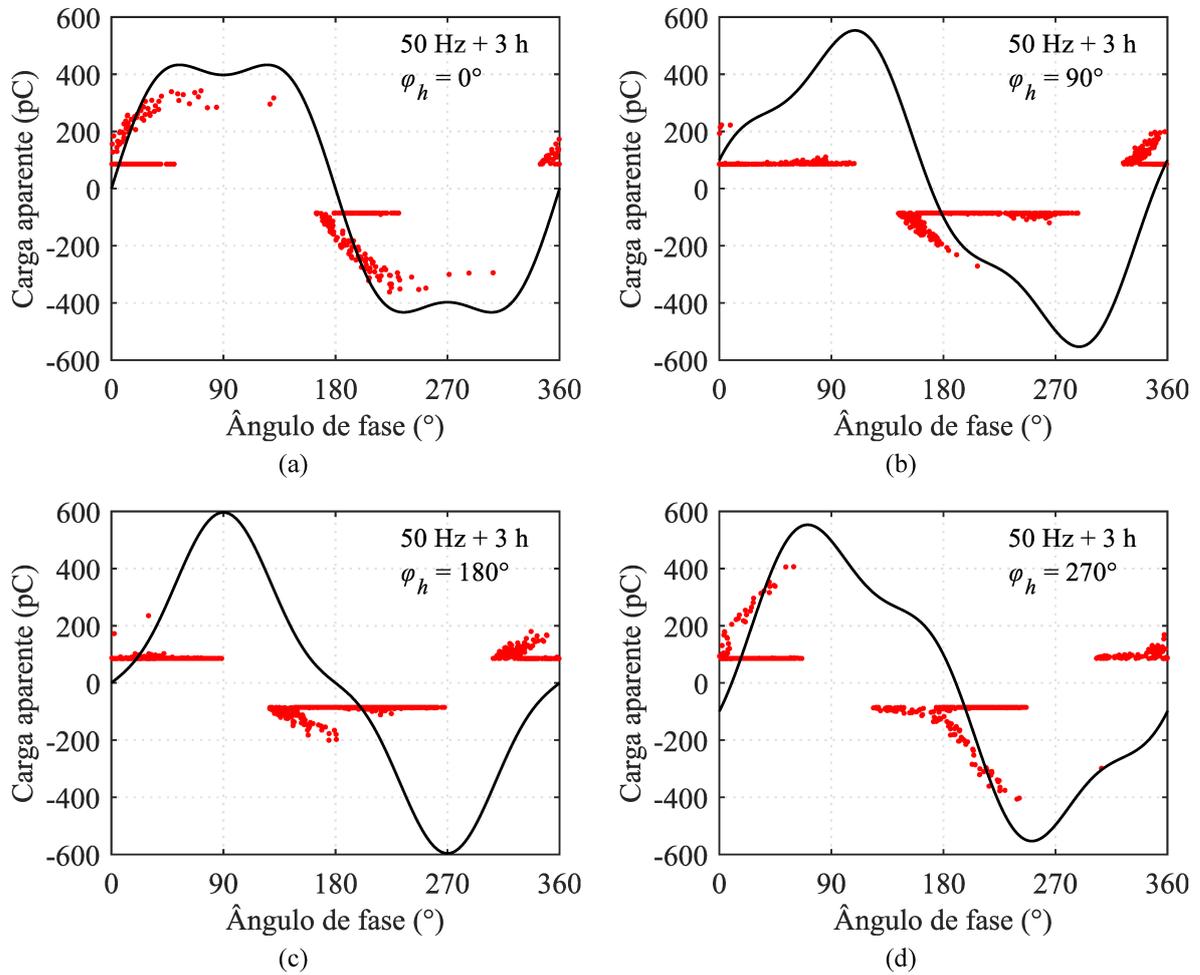
Verifica-se nas Figuras 4.18-4.20 que, para a terceira harmônica, diferentemente do caso da Figura 4.2 no qual  $\varphi_h = 0^\circ$ , as deformações causadas na forma de onda de  $E_{cav0}(t)$  pelos deslocamentos dos ângulos de fase para  $\varphi_h = 90^\circ$ ,  $\varphi_h = 180^\circ$  e  $\varphi_h = 270^\circ$  levaram a aumentos dos valores de pico. Isso fez com que o número de DPs geradas aumentasse nos três casos, em vez de reduzir conforme aconteceu para  $\varphi_h = 0^\circ$ . A configuração que gerou a maior quantidade de DPs foi a com  $\varphi_h = 180^\circ$ , pois foi nesta que se teve o maior valor de pico. Adicionalmente, também se nota nas Figuras 4.18-4.20 mudanças nas faixas de ocorrência das DPs, uma vez que os deslocamentos de  $\varphi_h$  alteraram as localizações das regiões de alta inclinação  $dE_{cav0}(t)/dt$ .

Nas Figuras 4.21-4.23 foram apresentados os efeitos dos ângulos de fase para a componente de quinta harmônica. Nestes casos, percebe-se que a quantidade de DPs geradas aumentou para  $\varphi_h = 90^\circ$ ,  $\varphi_h = 180^\circ$  e  $\varphi_h = 270^\circ$ , em comparação com o caso sem distorção (Figura 3.11). Porém, estes aumentos foram menos significativos do que para  $\varphi_h = 0^\circ$  (Figura 4.3), pois um maior valor de pico foi gerado para  $\varphi_h = 0^\circ$ . Para  $\varphi_h = 180^\circ$ , percebe-se na Figura 4.22 que mesmo com  $DIT_h \% = 20\%$ , o valor de pico foi aumentado em apenas 3,9% em relação ao pico da onda senoidal, gerando bem menos DPs neste caso. Isso mostra que o ângulo de fase também é um fator muito relevante para análise dos efeitos das distorções harmônicas.

#### 4.2.2 Efeitos sobre os padrões PRPD

Os ângulos de fase das componentes harmônicas causaram deslocamentos das posições dos máximos e mínimos das formas de onda da tensão e do campo elétrico, alterando os intervalos de fase de ocorrência das DPs. Dessa forma, os padrões PRPD também foram modificados de acordo com o valor de  $\varphi_h$ , como pode ser visto nas Figuras 4.24 e 4.25 mostradas nas próximas páginas.

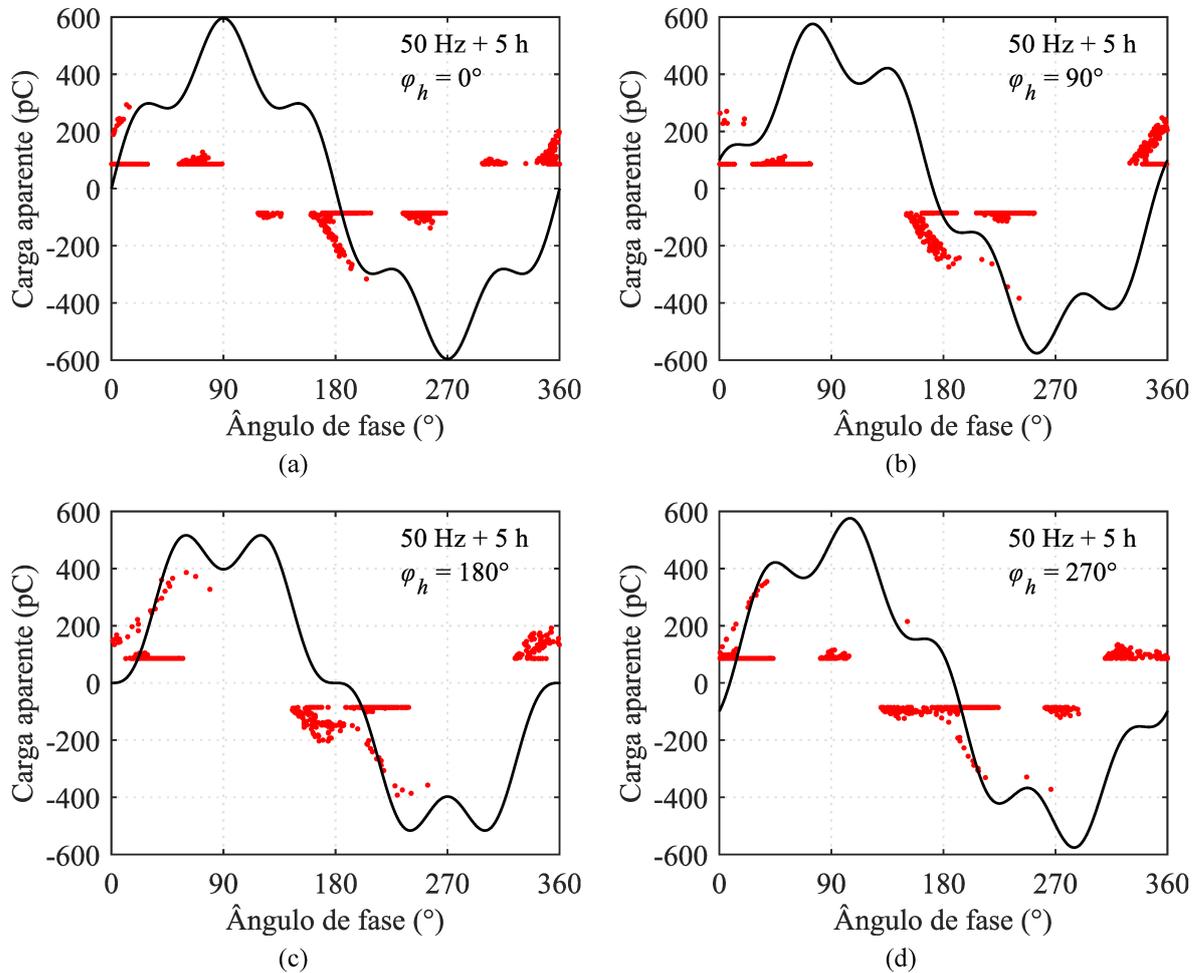
Figura 4.24 – Padrões PRPD obtidos nos casos em que foram aplicadas tensões distorcidas pela 3ª harmônica com  $DIT_h\% = 20\%$  e  $\varphi_h =$  : (a)  $0^\circ$ , (b)  $90^\circ$ , (c)  $180^\circ$ , (d)  $270^\circ$ .



Fonte: elaboração própria.

Para a terceira harmônica, pode-se observar na Figura 4.24 que quando  $\varphi_h = 90^\circ$ , o pico da forma de onda é deslocado para a direita, fazendo com que a concentração de cargas no padrão PRPD fosse também deslocada para este sentido. Já quando  $\varphi_h = 270^\circ$ , o pico da forma de onda foi deslocado para a esquerda, causando o mesmo efeito no padrão PRPD. Com  $\varphi_h = 180^\circ$ , o padrão PRPD também foi alterado devido ao maior número de DPs geradas.

Figura 4.25 – Padrões PRPD obtidos nos casos em que foram aplicadas tensões distorcidas pela 5ª harmônica com  $DIT_h = 20\%$  e  $\varphi_h =$  : (a)  $0^\circ$ , (b)  $90^\circ$ , (c)  $180^\circ$ , (d)  $270^\circ$ .



Fonte: elaboração própria.

Na Figura 4.25 percebe-se que, ao variar o ângulo de fase da quinta harmônica, os padrões PRPD foram completamente modificados. Pôde-se observar nestes padrões que, tanto as regiões de concentração das cargas das DPs, quanto as zonas mortas, foram alteradas à medida que  $\varphi_h$  foi variado, pois as posições dos diversos pontos de inflexão criados foram diferentes para cada configuração simulada.

### 4.2.3 Resultados gerais

Nas Tabelas 4.1 e 4.2 são mostrados os resultados obtidos nas simulações para as grandezas  $N_{DPs/ciclo}$ ,  $q_{ap/DP}$ ,  $q_{ap/ciclo}$ ,  $q_{apmáx}$  e  $q_{apmin}$  ao variar os ângulos de fase das componentes harmônicas de 3ª e 5ª ordem de  $0^\circ$  até  $270^\circ$ .

Tabela 4.1 – Comparação entre os resultados gerais obtidos nas simulações em que o ângulo de fase da 3ª harmônica foi variado.

Ângulo de fase	Número médio de DPs por ciclo	Carga aparente média por DP	Carga aparente total por ciclo	Carga aparente máxima	Carga aparente mínima
$\varphi_h$	$N_{DPs/ciclo}$	$q_{ap/DP}$	$q_{ap/ciclo}$	$q_{apmáx}$	$q_{apmín}$
0°	4,17	132,62 pC	553,03 pC	361,83 pC	83,46 pC
90°	8,16	94,19 pC	768,59 pC	271,16 pC	83,46 pC
180°	9,49	87,50 pC	830,58 pC	235,33 pC	83,46 pC
270°	7,86	96,18 pC	755,69 pC	406,68 pC	83,46 pC

Fonte: elaboração própria.

Tabela 4.2 – Comparação entre os resultados gerais obtidos nas simulações em que o ângulo de fase da 5ª harmônica foi variado.

Ângulo de fase	Número médio de DPs por ciclo	Carga aparente média por DP	Carga aparente total por ciclo	Carga aparente máxima	Carga aparente mínima
$\varphi_h$	$N_{DPs/ciclo}$	$q_{ap/DP}$	$q_{ap/ciclo}$	$q_{apmáx}$	$q_{apmín}$
0°	9,11	91,29 pC	831,65 pC	316,39 pC	83,46 pC
90°	8,04	96,69 pC	777,39 pC	383,58 pC	83,46 pC
180°	6,79	100,24 pC	681,05 pC	392,52 pC	83,46 pC
270°	8,73	91,72 pC	801,10 pC	372,23 pC	83,46 pC

Fonte: elaboração própria.

Constata-se na Tabela 4.1 que o  $N_{DPs/ciclo}$  aumentou consideravelmente para a terceira harmônica com  $\varphi_h = 90^\circ$ ,  $\varphi_h = 180^\circ$  e  $\varphi_h = 270^\circ$  em comparação com quando  $\varphi_h = 0^\circ$ . Isso pode ser justificado pelas elevações dos valores de pico de  $E_{cav0}(t)$  causadas pelos deslocamentos angulares da terceira harmônica. Já em relação à  $q_{ap/DP}$ , observa-se comportamentos contrários, ou seja, para os casos em que  $N_{DPs/ciclo}$  aumentou,  $q_{ap/DP}$  se reduziu. Multiplicando-se  $N_{DPs/ciclo}$  por  $q_{ap/DP}$ , obteve-se a  $q_{ap/ciclo}$ . Assim, pôde ser observado que  $q_{ap/ciclo}$  também aumentou em relação ao caso com  $\varphi_h = 0^\circ$ , o que mostra novamente que o aumento de  $N_{DPs/ciclo}$  predominou sobre a redução de  $q_{ap/DP}$  em todos os casos analisados.

O mesmo raciocínio explanado acima pode ser aplicado para analisar os resultados obtidos para a quinta harmônica com diferentes  $\varphi_h$ . Todavia, percebe-se na Tabela 4.2 que apesar do  $N_{DPs/ciclo}$  ter aumentado para  $\varphi_h = 90^\circ$ ,  $\varphi_h = 180^\circ$  e  $\varphi_h = 270^\circ$ , em relação ao caso

puramente senoidal (Tabela 3.2), o mesmo se reduziu em comparação com o caso em que a quinta harmônica possuía  $\varphi_h = 0^\circ$ . Este mesmo comportamento também foi observado nos valores de  $q_{ap/ciclo}$ .

Quanto aos valores de  $q_{apm\acute{a}x}$ , nenhum efeito proporcional foi observado à medida que se alterou os valores de  $\varphi_h$  para ambas as componentes de 3ª e 5ª ordem, predominando-se novamente o caráter estocástico das DPs. Por fim,  $q_{apmin}$  se manteve inalterada mais uma vez em todas as seis simulações, conforme esperado.

Dessa forma, pode-se concluir que além da ordem harmônica e do nível de distorção  $DIT_h\%$ , o ângulo de fase da componente harmônica também causa impactos significativos nas características das DPs. Por exemplo, foi observado que uma mesma componente (a 3ª harmônica), com mesma amplitude ( $DIT_h\% = 20\%$ ), pode causar uma grande redução ou um grande aumento no número de DPs geradas apenas alterando o valor de  $\varphi_h$  de  $0^\circ$  para  $180^\circ$  ( $-35,45\%$  para  $\varphi_h = 0^\circ$  e  $+46,90\%$  para  $\varphi_h = 180^\circ$ ). Portanto, o ângulo de fase é um parâmetro importante que também deve ser levado em consideração durante o processamento e a análise dos parâmetros estatísticos e dos padrões PRPD obtidos experimentalmente para o correto monitoramento das DPs sobre condições não senoidais.

### 4.3 Distorções causadas por componentes harmônicas combinadas

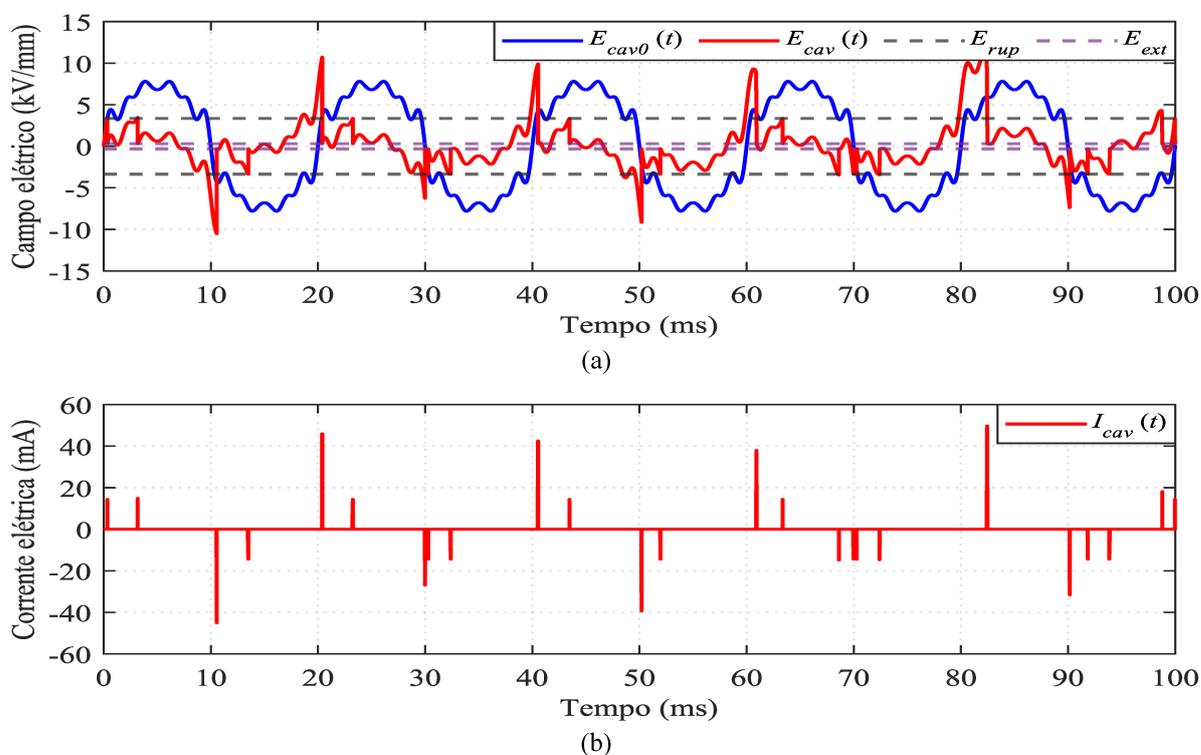
Os efeitos individuais das componentes harmônicas e de seus ângulos de fase já foram estudados nas seções anteriores. Nesta terceira etapa, o objetivo é analisar os efeitos da combinação de diferentes ordens harmônicas sobre as ocorrências das DPs. Para isso, foram propostos dois estudos de caso. No primeiro, considerou-se  $DIT_h\% = 10\%$  para as componentes harmônicas de 3ª, 7ª e 11ª ordem e  $DIT_h\% = 5\%$  para as componentes harmônicas de 5ª, 9ª e 13ª ordem. No segundo, implementou-se  $DIT_h\% = 5\%$  para as componentes harmônicas de 3ª, 7ª e 11ª ordem e  $DIT_h\% = 10\%$  para as componentes harmônicas de 5ª, 9ª e 13ª ordem. Ressalta-se que em ambos os casos o nível de distorção total ( $DTT\%$ ) foi mantido o mesmo, ou seja,  $DTT\% = 19,36\%$ .

### 4.3.1 Efeitos sobre o comportamento dinâmico das descargas parciais

As evoluções temporais dos campos elétricos  $E_{cav0}(t)$  e  $E_{cav}(t)$ , e dos pulsos de corrente das DPs  $I_{cav}(t)$ , obtidos nas duas simulações, estão apresentados nas Figuras 4.26-4.27. Observa-se nestas figuras que apesar do nível de distorção total ter sido o mesmo nos dois casos, as formas de onda de  $E_{cav0}(t)$  foram modificadas de maneiras distintas.

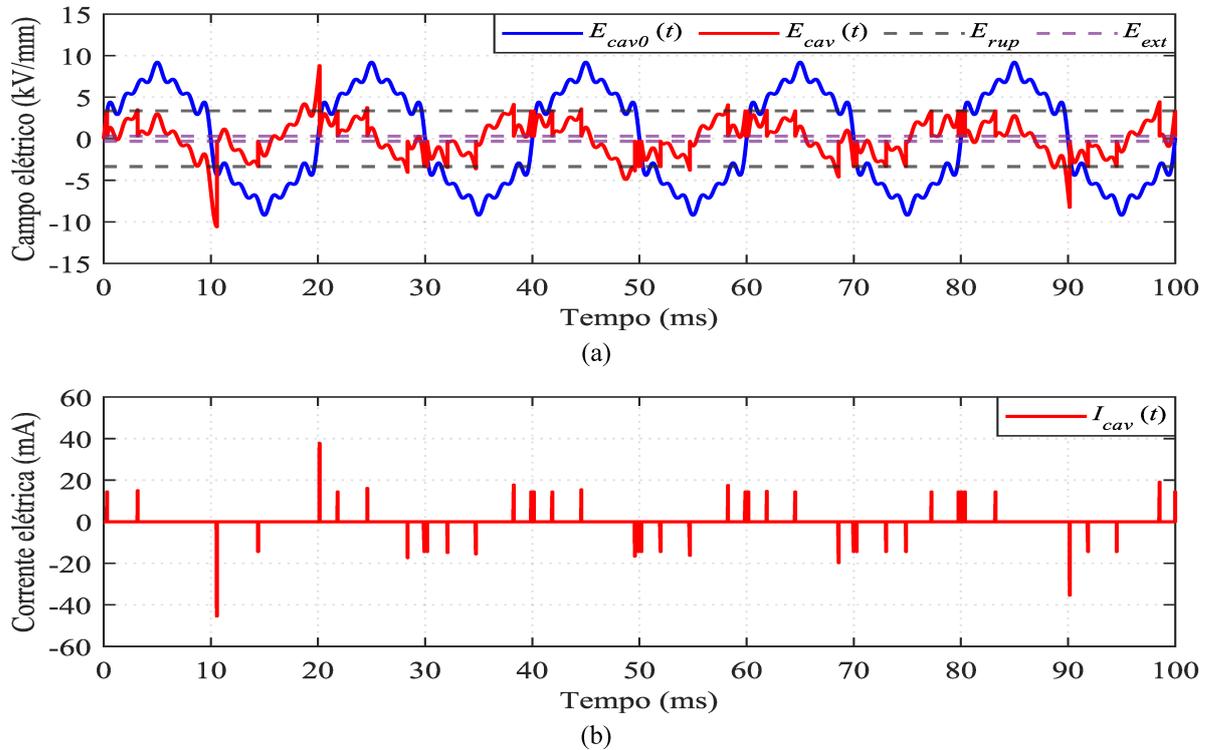
No primeiro caso, com a predominância das harmônicas de 3<sup>a</sup>, 7<sup>a</sup> e 11<sup>a</sup> ordem, o valor de pico foi reduzido em 2,43% em comparação com o pico da senoide. Já no segundo caso, o valor de pico foi aumentado em 15% devido à influência preponderante das harmônicas de 5<sup>a</sup>, 9<sup>a</sup> e 13<sup>a</sup> ordem. Além disso, também podem ser notadas diferenças nas quantidades e posições dos máximos e mínimos locais criados. Estes fatores fizeram com que as características de ocorrência das DPs fossem afetadas de formas distintas para os dois casos, conforme pode ser constatado nos gráficos exibidos. Percebe-se, por exemplo, a geração de um número muito maior de DPs na Figura 4.27(b) do que na Figura 4.26(b).

Figura 4.26 – Resultados obtidos com a aplicação da tensão distorcida pelas 3<sup>a</sup>, 7<sup>a</sup> e 11<sup>a</sup> harmônicas com  $DIT_h\% = 10\%$  e pelas 5<sup>a</sup>, 9<sup>a</sup> e 13<sup>a</sup> harmônicas com  $DIT_h\% = 5\%$ : (a) campos elétricos em função do tempo, (b) pulsos de corrente das DPs geradas na cavidade ao longo do tempo.



Fonte: elaboração própria.

Figura 4.27 – Resultados obtidos com a aplicação da tensão distorcida pelas 3ª, 7ª e 11ª harmônicas com  $DIT_h\% = 5\%$  e pelas 5ª, 9ª e 13ª harmônicas com  $DIT_h\% = 10\%$ : (a) campos elétricos em função do tempo, (b) pulsos de corrente das DPs geradas na cavidade ao longo do tempo.

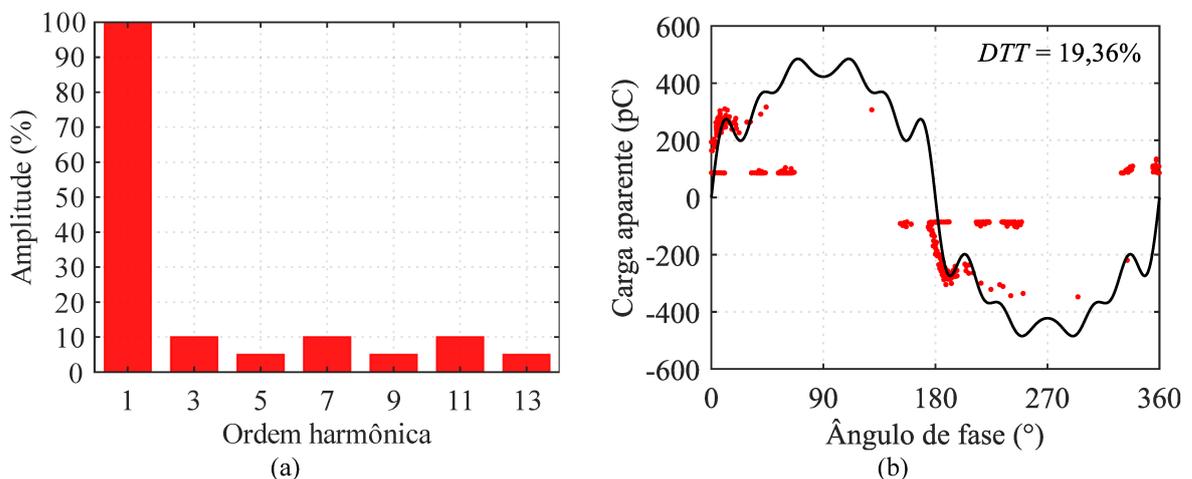


Fonte: elaboração própria.

### 4.3.2 Efeitos sobre os padrões PRPD

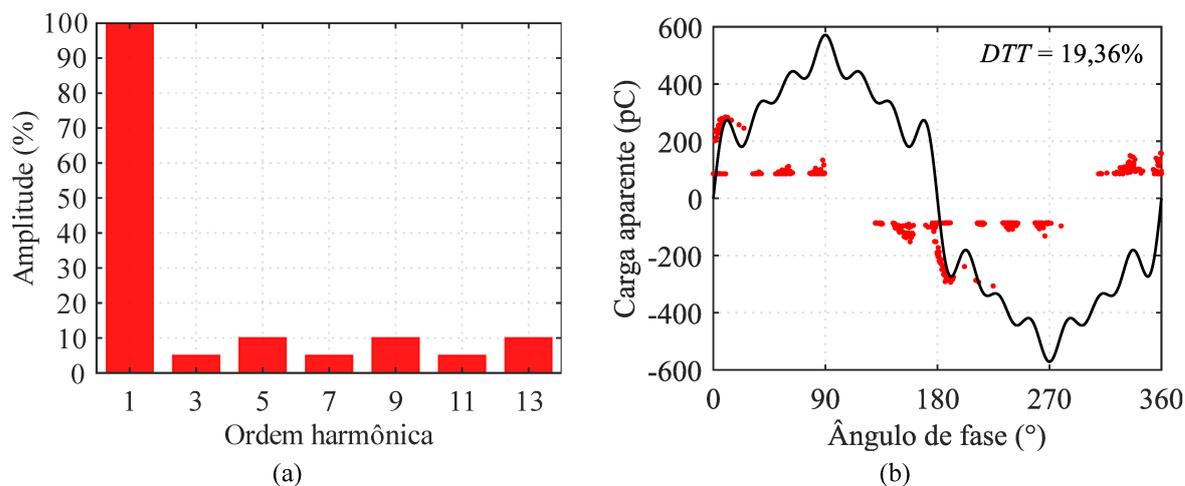
As alterações observadas na dinâmica de ocorrência das DPs também afetaram, conseqüentemente, as características dos padrões PRPD. Nas Figuras 4.28 e 4.29 são apresentados os espectros harmônicos das tensões aplicadas e os padrões PRPD levantados nas simulações para comparação entre os dois casos propostos.

Figura 4.28 – Primeiro caso: (a) espectro harmônico da tensão aplicada, (b) padrão PRPD obtido na simulação.



Fonte: elaboração própria.

Figura 4.29 – Segundo caso: (a) espectro harmônico da tensão aplicada, (b) padrão PRPD obtido na simulação.



Fonte: elaboração própria.

Analisando as Figuras 4.28(b) e 4.29(b), verifica-se que em ambos os casos os padrões PRPD obtidos foram completamente transformados quando contrapostos com o padrão PRPD de referência do caso sem distorção (Figura 3.13). A criação de zonas mortas nos padrões PRPD pode ser notada nos dois casos mostrados nas Figuras 4.28(b) e 4.29(b). Todavia, no segundo caso a quantidade de zonas mortas observadas foi superior, devido ao maior número de pontos de inflexão criados na forma de onda da tensão por tal composição harmônica. Este fato, aliado às grandes diferenças observadas nos números de DPs geradas, distinguem entre si os padrões PRPD analisados nos dois casos.

Dessa forma, pode-se concluir que os impactos causados pelas distorções harmônicas nos padrões PRPD são altamente dependentes das combinações das harmônicas individuais e de suas magnitudes, pois foi constatado que a aplicação de tensões distorcidas com um mesmo valor de  $DTT\%$  pode resultar em padrões PRPD diferentes.

### 4.3.3 Resultados gerais

Os valores obtidos nas duas simulações para os parâmetros gerais  $N_{DPs/ciclo}$ ,  $q_{ap/DP}$ ,  $q_{ap/ciclo}$ ,  $q_{apm\acute{a}x}$  e  $q_{apm\acute{i}n}$  estão expostos na Tabela 4.3.

Verifica-se na Tabela 4.3 que as composições harmônicas aplicadas nos dois casos causaram efeitos opostos em relação ao  $N_{DPs/ciclo}$ . No primeiro caso, observa-se uma diminuição de -19,50% em relação ao valor de referência obtido sem distorção, enquanto que no segundo caso constata-se um aumento expressivo de 23,84%. O  $N_{DPs/ciclo}$  foi reduzido no primeiro caso devido ao efeito combinado das harmônicas que resultou em um menor valor de pico para

$E_{cav0}(t)$ , uma vez que as magnitudes das harmônicas de 3<sup>a</sup>, 7<sup>a</sup> e 11<sup>a</sup> ordem foram predominantes. Já no segundo caso, o  $N_{DPs/ciclo}$  aumentou por causa do impacto das harmônicas de 5<sup>a</sup>, 9<sup>a</sup> e 13<sup>a</sup> ordem na elevação do valor de pico de  $E_{cav0}(t)$ .

Tabela 4.3 – Comparação entre os resultados gerais obtidos nas duas últimas simulações.

Casos simulados	Número médio de DPs por ciclo	Carga aparente média por DP	Carga aparente total por ciclo	Carga aparente máxima	Carga aparente mínima
-	$N_{DPs/ciclo}$	$q_{ap/DP}$	$q_{ap/ciclo}$	$q_{apmáx}$	$q_{apmín}$
1	5,20	125,16 pC	650,83 pC	347,72 pC	83,46 pC
2	8,00	98,17 pC	785,36 pC	306,53 pC	83,46 pC

Fonte: elaboração própria.

Na Figura 4.26(b) apresentada anteriormente, foi notado um maior número de pulsos de corrente com magnitudes elevadas do que na Figura 4.27(b). Assim, ao final das simulações, obteve-se um valor de  $q_{ap/DP}$  mais alto no primeiro caso do que no segundo, conforme mostrado na Tabela 4.3. Apesar disso, o valor de  $q_{ap/ciclo}$  foi reduzido no primeiro caso e aumentado no segundo, pois os valores de  $N_{DPs/ciclo}$  foram novamente predominantes sobre os valores de  $q_{ap/DP}$  para o cálculo de  $q_{ap/ciclo}$ . Por fim, nota-se na Tabela 4.3 que, para os dois casos, os valores de  $q_{apmáx}$  foram mais uma vez alterados de forma aleatória, enquanto que  $q_{apmín}$  se manteve constante conforme previsto.

Em síntese, foi verificado que duas tensões distorcidas com um mesmo  $DTT\%$  podem influenciar a ocorrência de DPs de maneiras muito diferentes, dependendo do conteúdo harmônico individual. Os padrões PRPD obtidos nas duas simulações foram substancialmente distintos, enquanto que nos resultados gerais apresentados foram verificadas tendências contrárias para os dois casos. Isso mostra que o indicador  $DTT\%$  sozinho não reflete os possíveis impactos de uma distorção harmônica nas características das DPs. Desse modo, a realização de uma análise espectral do sinal da tensão pode ser essencial nos casos em que o mesmo é monitorado em conjunto com os sinais das DPs.

#### 4.4 Considerações finais

Este capítulo exibiu e analisou os resultados obtidos em diversas simulações computacionais realizadas com a aplicação de tensões distorcidas. Em um primeiro momento,

foram avaliados os impactos individuais de cada componente harmônica, com diferentes magnitudes, sobre a ocorrência das DPs. Neste caso, foi visto que a maioria das harmônicas causaram aumento do número médio de DPs geradas e da carga aparente total à medida que suas magnitudes foram elevadas, com exceção da terceira harmônica. Isso ocorreu principalmente devido às alterações nos valores de pico da tensão. Posteriormente, foi visto que o ângulo de fase de uma componente harmônica também é capaz de afetar as características das DPs, sendo, portanto, um parâmetro relevante a ser considerado durante o monitoramento de DPs. Por último, investigou-se dois casos em que foi mantido o mesmo nível de distorção total, porém cada um com uma composição harmônica distinta. Os resultados obtidos nesses dois casos foram muito diferentes, revelando a importância de se analisar todo o espectro harmônico da tensão. Em todos os casos apresentados no capítulo, observou-se deformações nos padrões PRPD devido às distorções harmônicas. Zonas mortas foram criadas em muitos padrões PRPD por causa da interrupção da ocorrência de DPs em algumas faixas da forma de onda da tensão, onde pontos de inflexão foram criados. Na prática, muitos dos efeitos observados neste capítulo podem prejudicar ainda mais o desempenho da isolamento e atrapalhar a análise dos dados das DPs, dificultando o diagnóstico de defeitos.

## CAPÍTULO 5

---

---

### CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

#### 5.1 Conclusões da pesquisa

Este trabalho analisou a influência das distorções harmônicas de tensão sobre a ocorrência de descargas parciais. Para tanto, foi implementado um modelo de simulação computacional baseado na aplicação do método dos elementos finitos. Com isso, os eventos das DPs foram modelados de maneira dinâmica, considerando diversos fatores dependentes do tempo, como as taxas de emissão de elétrons, a recombinação das cargas de superfície, as probabilidades de ocorrência das DPs, as condutividades da cavidade e de sua superfície, entre outros. Assim, o fenômeno da DP foi representado de um modo mais realístico, considerando sua natureza estocástica. Com o modelo desenvolvido foi possível obter tanto a evolução temporal do campo elétrico na cavidade, quanto os padrões PRPD formados pela acumulação das cargas aparentes de todas as DPs geradas. Vale ressaltar que o modelo ainda foi aprimorado pelo autor, tornando as simulações mais rápidas através da utilização de uma interface de eventos no *software* de elementos finitos.

A princípio, aplicou-se apenas uma tensão senoidal na geometria, com o objetivo de ilustrar a aplicação do modelo implementado para o leitor e, além disso, verificar a confiabilidade do mesmo comparando os resultados simulados com alguns dados de medições previamente divulgados na literatura. Ao analisar o padrão PRPD obtido na simulação, percebeu-se características similares às do padrão PRPD concebido experimentalmente. Dessa forma, foi possível validar o modelo, a fim de utilizá-lo para outras simulações.

Posteriormente, no Capítulo 4, dezenas de simulações foram executadas aplicando-se tensões distorcidas por componentes harmônicas com diferentes atributos, a fim de comparar os dados obtidos com os do caso sem distorção. Para isso, as simulações foram divididas em três etapas. Na primeira etapa, foram avaliados os efeitos individuais das componentes harmônicas de 3<sup>a</sup>, 5<sup>a</sup>, 7<sup>a</sup>, 9<sup>a</sup>, 11<sup>a</sup> e 13<sup>a</sup> ordem, variando-se também suas magnitudes de modo que  $DIT_h\% = 1\%, 3\%, 5\%, 10\%, 15\% \text{ e } 20\%$ . De forma geral, à medida que  $DIT_h\%$  foi incrementado, os resultados das simulações revelaram aumento do número de DPs geradas por ciclo, redução da carga aparente média por DP e aumento da carga aparente total por ciclo para quase todas as componentes harmônicas analisadas, com exceção da 3<sup>a</sup> harmônica, a qual provocou efeitos opostos. Estes resultados foram explicados analisando as características das

formas de onda da tensão e do campo elétrico. Alguns fatores, como o valor de pico e a variação da inclinação local, influenciaram de forma significativa a dinâmica de ocorrência das DPs. Por exemplo, percebeu-se que as componentes de 5ª, 9ª e 13ª ordem, por causarem os maiores aumentos nos valores de pico, também foram as que mais elevaram o número de DPs geradas por ciclo. Em relação aos padrões PRPD, observou-se deformações na presença de todas as componentes harmônicas analisadas, principalmente nos casos em que o nível de distorção foi elevado. Verificou-se também nos padrões PRPD que o número de zonas mortas formadas foi maior para ordens harmônicas superiores, devido ao aumento na quantidade de pontos de inflexão criados.

Na segunda etapa, buscou-se avaliar os efeitos dos ângulos de fase das componentes harmônicas sobre as DPs, sendo aplicadas tensões com componentes harmônicas de 3ª e 5ª ordem, ambas com ângulos de fase  $\varphi_h = 90^\circ, 180^\circ$  e  $270^\circ$ . Os resultados das simulações revelaram que, para uma mesma componente harmônica, dependendo do valor de  $\varphi_h$ , a forma de onda da tensão pode ser deformada de modos completamente distintos e, conseqüentemente, a influência sobre o desenvolvimento das DPs também deve ser diferente. Por exemplo, para a 3ª harmônica, com  $\varphi_h = 180^\circ$ , houve um grande aumento no número de DPs geradas devido ao incremento do valor de pico, enquanto que para  $\varphi_h = 0^\circ$  já foi observada uma redução. Além disso, também foram constatadas alterações nos padrões PRPD obtidos, uma vez que ao variar  $\varphi_h$ , as posições dos pontos de inflexão foram deslocadas. Portanto, o ângulo de fase também mostrou ser um parâmetro relevante a ser considerado durante a análise de sinais de DPs, nos casos em que forem notadas distorções harmônicas de tensão.

Na terceira e última etapa, foram propostos mais dois estudos de caso, nos quais o modelo foi simulado com tensões distorcidas com conteúdos harmônicos distintos, porém mantendo o mesmo valor de  $DTT\%$ . Os resultados obtidos em ambos os casos foram muito diferentes. No primeiro caso, quando as componentes de 3ª, 7ª e 11ª ordem tiveram magnitudes predominantes sobre as demais, o valor de pico da tensão foi reduzido, causando uma redução no número de DPs geradas por ciclo e na carga aparente total por ciclo. Já no segundo caso, com a elevação das magnitudes das componentes de 5ª, 9ª e 13ª ordem, houve grandes aumentos destes mesmos parâmetros citados. Os padrões PRPD levantados nos dois casos também foram deformados de maneiras distintas. Estes resultados indicam que as características das DPs são sensíveis ao tipo de combinação das harmônicas individuais. Dessa forma, analisar dados de DPs considerando apenas o indicador  $DTT\%$  pode não ser suficiente, sendo importante avaliar também todo o espectro harmônico da tensão.

Em suma, as distorções harmônicas causaram diferentes efeitos sobre os dados das DPs obtidos nas simulações. Na prática, é possível que alguns destes efeitos ajudem a intensificar ainda mais a deterioração de um material dielétrico na presença de defeitos. O reconhecimento e a interpretação de padrões PRPD também podem ser prejudicados, uma vez que as componentes harmônicas são capazes de deformá-los. Se isso acontecer, é provável que o monitoramento e a avaliação da condição da isolação sejam comprometidos.

## 5.2 Sugestões para trabalhos futuros

Tendo em vista os resultados obtidos nesta dissertação, algumas propostas de trabalhos futuros são listadas abaixo com o intuito de dar continuidade à pesquisa:

- construir uma estrutura laboratorial para realizar testes de descargas parciais em média e alta tensão e, a partir disso, aplicar tensões distorcidas a fim de verificar se os dados obtidos nas simulações são reproduzidos experimentalmente;
- realizar estudos sobre a atividade de descargas parciais em uma cavidade na qual o campo elétrico não seja uniforme;
- simular a ocorrência simultânea de descargas parciais em múltiplas cavidades;
- estudar a possibilidade de se expandir o modelo implementado para simular descargas parciais em diferentes fases do envelhecimento do material dielétrico;
- desenvolver modelos para simulação de outros tipos de descargas parciais;
- avaliar os efeitos das distorções harmônicas de tensão sobre a ocorrência de descargas parciais em objetos de teste mais complexos, como bobinas pré-formadas e barras Roebel utilizadas nos estatores de máquinas elétricas de grande porte;
- analisar os impactos da aplicação de tensões com outras formas de onda, como aquelas de rápida repetição oriundas de conversores PWM, considerando também níveis de tensões menores, típicos de motores industriais (6,6 kV, 4,16 kV, etc.);
- estudar os efeitos das componentes harmônicas presentes nos sistemas de transmissão HVDC em relação à atividade de descargas parciais e a degradação dos dielétricos que fazem parte destes sistemas.

## REFERÊNCIAS

---

ANDERS, G. J.; VACCARO, A. **Innovations in power systems reliability**. 1. ed. Estados Unidos da América: Springer, 2011.

ANEEL. **Procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional (PRODIST): Módulo 8 - Qualidade do fornecimento de energia elétrica**. Brasília. 2021. Disponível em: [https://www2.aneel.gov.br/cedoc/aren2021956\\_2\\_7.pdf](https://www2.aneel.gov.br/cedoc/aren2021956_2_7.pdf). Acesso em: 31 de maio de 2022.

ARAÚJO, R. C. F.; DE OLIVEIRA, R. M. S.; BARROS, F. J. B. Automatic PRPD Image Recognition of Multiple Simultaneous Partial Discharge Sources in On-Line Hydro-Generator Stator Bars. **Energies**, v. 15, n. 1, p. 326, 2022. <https://doi.org/10.3390/en15010326>

ARORA, R.; MOSCH, W. **High voltage and electrical insulation engineering**. 1. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2011.

AYDOGAN, A. *et al.* Using the method of harmonic distortion analysis in partial discharge assessment in mineral oil in a non-uniform electric field. **Energies**, v. 13, n. 18, p. 4830, 2020. <https://doi.org/10.3390/en13184830>

BOGGS, S. A. Partial discharge. III. Cavity-induced PD in solid dielectrics. **IEEE Electrical Insulation Magazine**, v. 6, n. 6, p. 11-16, 1990. <https://doi.org/10.1109/57.63094>

BORGHEI, S. M. R. **The Modeling of Partial Discharge under Fast, Repetitive Voltage Pulses Using Finite-Element Analysis**. 2020. 88 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, 2020.

BORGHEI, S. M. R. **Partial Discharges: Experimental Investigation, Model Development, and Data Analytics**. 2022. 136 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica), Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, 2022.

BRASIL, F. S. **Desenvolvimento de sensores eletromagnéticos para medição de descargas parciais nos enrolamentos estáticos de hidrogeradores**. 2016. 122 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal do Pará, Belém, 2016.

CALLENDER, G. **Modelling partial discharge in gaseous voids**. 2018. 175 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica), University of Southampton, Southampton, 2018.

CARDOSO, J. R. **Electromagnetics through the finite element method: A simplified approach using Maxwell's equations**. 1. ed. Boca Raton: CRC Press, 2016. <https://doi.org/10.1201/9781315366777>

CAVALLINI, A.; FABIANI, D.; MONTANARI, G. C. Power electronics and electrical insulation systems - Part 1: Phenomenology overview. **IEEE Electrical Insulation Magazine**, v. 26, n. 3, p. 7-15, 2010. <https://doi.org/10.1109/MEI.2010.5482783>

CHUDNOVSKY, B. H. **Electrical power transmission and distribution: aging and life extension techniques**. 1. ed. Boca Raton: CRC Press, 2012.

CRICHTON, G. C.; KARLSSON, P. W.; PEDERSEN, A. Partial discharges in ellipsoidal and spheroidal voids. **IEEE Transactions on Electrical Insulation**, v. 24, n. 2, p. 335-342, 1989. <https://doi.org/10.1109/14.90292>

CUENCA, W. M. H. **Caracterização dos Sinais de Descargas Parciais em Equipamentos de Alta Tensão a Partir de Modelos Experimentais**. 2005. 154 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

CUNHA, C. F. F. C. *et al.* A new wavelet selection method for partial discharge denoising. **Electric Power Systems Research**, v. 125, p. 184-195, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2015.04.005>

DA SILVA, R. F. **Trilhamento elétrico sobre materiais poliméricos pela análise da energia absorvida devido as descargas elétricas superficiais**. 2014. 126 f. Tese (Doutorado em Engenharia e Ciência dos Materiais), Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014.

DE LA ROSA, F. **Harmonics and power systems**. 1. ed. Boca Raton: CRC Press, 2006.

FERREIRA, R. S. **Estudo de descargas parciais em isolamento de máquinas elétricas usando o método dos elementos finitos**. 2017. 123 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.

FLORKOWSKA, B.; FLORKOWSKI, M.; ZYDRÓN, P. The role of harmonic components on partial discharge mechanism and degradation processes in epoxy resin insulation. In: **2007 IEEE International Conference on Solid Dielectrics**. IEEE, 2007. p. 560-563. <https://doi.org/10.1109/ICSD.2007.4290875>

FLORKOWSKI, M. Influence of high voltage harmonics on partial discharge patterns. In: **Proceedings of 5th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials**. IEEE, 1997. p. 303-306. <https://doi.org/10.1109/ICPADM.1997.617588>

FLORKOWSKI, M. *et al.* Impact of high voltage harmonics on interpretation of partial discharge patterns. **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**, v. 20, n. 6, p. 2009-2016, 2013. <https://doi.org/10.1109/TDEI.2013.6678848>

FLORKOWSKI, M.; FLORKOWSKA, B.; ZYDRÓN, P. High voltage harmonics induced modifications of PD phase-resolved patterns. **Archives of Electrical Engineering**, v. 67, n. 2, p. 231-246, 2018. <https://doi.org/10.24425/119637>

FLORKOWSKI, M. Classification of partial discharge images using deep convolutional neural networks. **Energies**, v. 13, n. 20, p. 5496, 2020. <https://doi.org/10.3390/en13205496>

FLORKOWSKI, M. Anomaly Detection, Trend Evolution, and Feature Extraction in Partial Discharge Patterns. **Energies**, v. 14, n. 13, p. 3886, 2021. <https://doi.org/10.3390/en14133886>

FORSSÉN, C. **Modelling of cavity partial discharges at variable applied frequency**. 2008. 84 f. Tese (Doutorado em Sistemas Elétricos), KTH Royal Institute of Technology, Estocolmo, 2008.

FRUTH, B.; FUHR, J. Partial discharge pattern recognition – a tool for diagnosis and monitoring of aging. In: **Proceedings of the CIGRE**. 1990.

FUHR, J.; ASCHWANDEN, T. Identification and localization of PD-sources in power-transformers and power-generators. **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**, v. 24, n. 1, p. 17-30, 2017. <https://doi.org/10.1109/TDEI.2016.005951>

GEMANT, A.; PHILIPPOFF, W. Spark gap with pre-capacitor. **Z. Tech. Phys**, v. 13, p. 425-430, 1932.

GIANOGLIO, C. *et al.* Online Predictive Maintenance Monitoring Adopting Convolutional Neural Networks. **Energies**, v. 14, n. 15, p. 4711, 2021. <https://doi.org/10.3390/en14154711>

GILL, P. **Electrical power equipment maintenance and testing**. 2. ed. Boca Raton: CRC Press, 2008. <https://doi.org/10.1201/9781420017557>

GUTFLEISCH, F.; NIEMEYER, L. Measurement and simulation of PD in epoxy voids. **IEEE transactions on Dielectrics and Electrical insulation**, v. 2, n. 5, p. 729-743, 1995. <https://doi.org/10.1109/94.469970>

HANG, T. **Investigation of partial discharge characteristics in piezoelectric ceramics**. 2015. 101 f. Tese (Doutorado em Ciência dos Materiais e Engenharia), University of New South Wales, Sydney, 2015. <https://doi.org/10.26190/unsworks/18282>

HARMSSEN, D. A. **Design of a partial discharge test platform: partial discharge artificial defects, characterization, clustering, analysis and pattern recognition**. 2016. 230 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Delft University of Technology, Delft, 2016.

HASSAN, W. *et al.* Influence of Voltage Harmonics on Partial Discharge Diagnostics in Electric Motors Fed by Variable Frequency Drives. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 69, n. 10, p. 10605-10614, 2021. <https://doi.org/10.1109/TIE.2021.3134085>

HAUSCHILD, W.; LEMKE, E. **High-voltage test and measuring techniques**. 2. ed. Suíça: Springer, 2019.

HUDON, C.; BELEC, M. Partial discharge signal interpretation for generator diagnostics. **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**, v. 12, n. 2, p. 297-319, 2005. <https://doi.org/10.1109/TDEI.2005.1430399>

IEC. **Standard 60034-27-2**: Rotating Electrical Machines-Part 27-2: On-Line Partial Discharge Measurements on the Stator Winding Insulation of Rotating Electrical Machines. Genebra. Suíça. 2012.

IEC. **Standard 60270-2015**: High-voltage test techniques - Partial discharge measurements. Genebra. Suíça. 2015.

IEEE. **Standard 1434-2014: IEEE Guide for the Measurement of Partial Discharges in AC Electric Machinery**. Nova Iorque. Estados Unidos da América. 2014.

ILLIAS, H. A. **Measurement and Simulation of Partial Discharges within a Spherical Cavity in a Solid Dielectric Material**. 2011. 236 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica), University of Southampton, Southampton, 2011.

ILLIAS, H. A.; CHEN, G.; LEWIN, P. L. Modeling of partial discharge activity in spherical cavities within a dielectric material. **IEEE Electrical Insulation Magazine**, v. 27, n. 1, p. 38-45, 2011a. <https://doi.org/10.1109/MEI.2011.5699446>

ILLIAS, H. A.; CHEN, G.; LEWIN, P. L. Partial discharge behavior within a spherical cavity in a solid dielectric material as a function of frequency and amplitude of the applied voltage. **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**, v. 18, n. 2, p. 432-443, 2011b. <https://doi.org/10.1109/TDEI.2011.5739447>

ILLIAS, H. A.; CHEN, G.; LEWIN, P. L. Partial discharge within a spherical cavity in a dielectric material as a function of cavity size and material temperature. **IET Science, Measurement & Technology**, v. 6, n. 2, p. 52-62, 2012. <https://doi.org/10.1049/iet-smt.2011.0091>

ILLIAS, H. A. *et al.* Partial discharge simulation under various applied voltage waveforms. In: **2012 IEEE International Conference on Power and Energy (PECon)**. IEEE, 2012. p. 967-972. <https://doi.org/10.1109/PECon.2012.6450358>

ILLIAS, H. A. *et al.* Partial discharges within two spherical voids in an epoxy resin. **Journal of Physics D: Applied Physics**, v. 46, n. 33, p. 335301, 2013. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/46/33/335301>

ILLIAS, H. A. *et al.* Partial discharge behaviours within a void-dielectric system under square waveform applied voltage stress. **IET Science, Measurement & Technology**, v. 8, n. 2, p. 81-88, 2014. <https://doi.org/10.1049/iet-smt.2013.0018>

JAMES, R. E.; SU, Q. **Condition assessment of high voltage insulation in power system equipment**. 1. ed. Londres: IET, 2008. <https://doi.org/10.1049/PBPO053E>

JARAMILLO, R. Surface discharge data obtained on solid insulation at high voltage stress. **ResearchGate**. 2013. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/281629662\\_Partial\\_Discharge\\_kind\\_Surface\\_Partial\\_Discharge](https://www.researchgate.net/publication/281629662_Partial_Discharge_kind_Surface_Partial_Discharge). Acesso em: 17 de maio de 2022.

JIA, Y.; HE, P.; HUO, L. Wireless sensor network monitoring algorithm for partial discharge in smart grid. **Electric Power Systems Research**, v. 189, p. 106592, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2020.106592>

JIANG, J. *et al.* Optical sensing of partial discharge in more electric aircraft. **IEEE Sensors Journal**, v. 20, n. 21, p. 12723-12731, 2020. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2020.3002881>

KESSLER, O. The importance of partial discharge testing: PD testing has proven to be a very reliable method for detecting defects in the insulation system of electrical equipment and for

assessing the risk of failure. **IEEE Power and Energy Magazine**, v. 18, n. 2, p. 62-65, 2020. <https://doi.org/10.1109/MPE.2020.2974599>

KREUGER, F. H. **Partial discharge detection in high-voltage equipment**. 1. ed. Reino Unido: Butterworth-Heinemann, 1989.

KUFFEL, J.; ZAENGL, W. S.; KUFFEL, P. **High voltage engineering fundamentals**. 2. ed. Reino Unido: Butterworth-Heinemann, 2000. <https://doi.org/10.1016/B978-0-7506-3634-6.X5000-X>

LI, S.; LI, J. Condition monitoring and diagnosis of power equipment: review and prospective. **High Voltage**, v. 2, n. 2, p. 82-91, 2017. <https://doi.org/10.1049/hve.2017.0026>

LU, S. *et al.* Condition monitoring based on partial discharge diagnostics using machine learning methods: A comprehensive state-of-the-art review. **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**, v. 27, n. 6, p. 1861-1888, 2020. <https://doi.org/10.1109/TDEI.2020.009070>

MASON, J. H. Enhancing the significance of PD measurements. **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**, v. 2, n. 5, p. 876-888, 1995. <https://doi.org/10.1109/94.469982>

MATSUMURA, S.; CHEN, S. Effect of plasma resistance on electron temperature measurement by means of an electrostatic probe. **Journal of Applied Physics**, v. 43, n. 8, p. 3357-3361, 1972. <https://doi.org/10.1063/1.1661719>

MCALLISTER, I. W. Partial discharges in spheroidal voids. Void orientation. **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**, v. 4, n. 4, p. 456-461, 1997. <https://doi.org/10.1109/94.625363>

MOLINIÉ, P. Measuring and modeling transient insulator response to charging: the contribution of surface potential studies. **IEEE transactions on dielectrics and electrical insulation**, v. 12, n. 5, p. 939-950, 2005. <https://doi.org/10.1109/TDEI.2005.1522188>

MONTANARI, G. C. On line partial discharge diagnosis of power cables. In: 2009 **IEEE Electrical Insulation Conference**. IEEE, 2009. p. 210-215. <https://doi.org/10.1109/EIC.2009.5166347>

MORSALIN, S. **Diagnostic Measurement and Modelling of Electrical Insulation Based on Very Low Frequency High Voltage Excitation**. 2020. 236 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica), University of New South Wales, Sydney, 2020. <https://doi.org/10.26190/unsworks/3945>

MORSHUIS, P. H. F. Degradation of solid dielectrics due to internal partial discharge: some thoughts on progress made and where to go now. **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**, v. 12, n. 5, p. 905-913, 2005. <https://doi.org/10.1109/TDEI.2005.1522185>

MOTA, H. O. **Processamento de sinais de descargas parciais em tempo real com base em wavelets e seleção de coeficientes adaptativa espacialmente**. 2011. 133 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.

NGUYEN, H. V. P. **Partial Discharge Diagnostic Testing of Electrical Insulation Based on Very Low Frequency High Voltage Excitation**. 2018. 177 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica), University of New South Wales, Sydney, 2018.  
<https://doi.org/10.26190/unsworks/3417>

NIEMEYER, L. A generalized approach to partial discharge modeling. **IEEE transactions on Dielectrics and Electrical insulation**, v. 2, n. 4, p. 510-528, 1995.  
<https://doi.org/10.1109/94.407017>

NOBREGA, L. A. M. M. *et al.* Design and development of a bio-inspired UHF sensor for partial discharge detection in power transformers. **Sensors**, v. 19, n. 3, p. 653, 2019.  
<https://doi.org/10.3390/s19030653>

OLIVEIRA, V. S. **Aplicação do método dos elementos finitos 3D na caracterização eletromagnética estática de motores de relutância variável com validação experimental**. 2013. 126 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2013.

ONS. **Procedimentos de rede**: Submódulo 2.9 - Requisitos mínimos de qualidade de energia elétrica para acesso ou integração à rede básica. Rio de Janeiro. 2021. Disponível em:  
[https://apps08.ons.org.br/ONS.Sintegre.Proxy/ecmprsite/ecmfragmentsdocuments/Subm%C3%B3dulo%202.9-RQ\\_2020.12.pdf](https://apps08.ons.org.br/ONS.Sintegre.Proxy/ecmprsite/ecmfragmentsdocuments/Subm%C3%B3dulo%202.9-RQ_2020.12.pdf). Acesso em: 31 de maio de 2022.

PALITÓ, T. T. C. **Detecção acústica de descargas parciais com transdutor piezoelétrico**. 2015. 117 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015.

PEDERSEN, A.; CRICHTON, G. C.; MCALLISTER, I. W. The theory and measurement of partial discharge transients. **IEEE Transactions on Electrical Insulation**, v. 26, n. 3, p. 487-497, 1991. <https://doi.org/10.1109/14.85121>

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, 1995. <https://doi.org/10.1109/94.407019>

RODRÍGUEZ-SERNA, J. M. *et al.* Computer simulation of partial discharges in voids inside epoxy resins using three-capacitance and analytical models. **Polymers**, v. 12, n. 1, p. 77, 2020. <https://doi.org/10.3390/polym12010077>

SIKORSKI, W. Development of acoustic emission sensor optimized for partial discharge monitoring in power transformers. **Sensors**, v. 19, n. 8, p. 1865, 2019.  
<https://doi.org/10.3390/s19081865>

STONE, G. C. Partial discharge diagnostics and electrical equipment insulation condition assessment. **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**, v. 12, n. 5, p. 891-904, 2005. <https://doi.org/10.1109/TDEI.2005.1522184>

TANAKA, T. Internal partial discharge and material degradation. **IEEE Transactions on Electrical Insulation**, n. 6, p. 899-905, 1986. <https://doi.org/10.1109/TEI.1986.348999>

VAN BRUNT, R. J. Stochastic properties of partial-discharge phenomena. **IEEE Transactions on Electrical Insulation**, v. 26, n. 5, p. 902-948, 1991. <https://doi.org/10.1109/14.99099>

VELOSO, G. F. C. **Identificação de padrões de contaminação em óleo de transformador através da monitoração acústica das descargas parciais**. 2011. 103 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2011.

WAKILEH, G. J. **Power systems harmonics: fundamentals, analysis and filter design**. 1. ed. Berlim: Springer Press, 2001. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-662-04343-1>

WU, M. *et al.* An overview of state-of-the-art partial discharge analysis techniques for condition monitoring. **IEEE Electrical Insulation Magazine**, v. 31, n. 6, p. 22-35, 2015. <https://doi.org/10.1109/MEI.2015.7303259>

WHITEHEAD, S. **Dielectric breakdown of solids**. 1. ed. Oxford: Clarendon Press, 1951.

ZHONG, J. *et al.* Partial discharge signal denoising based on singular value decomposition and empirical wavelet transform. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, v. 69, n. 11, p. 8866-8873, 2020. <https://doi.org/10.1109/TIM.2020.2996717>

## APÊNDICE

---

---

### TRABALHOS PUBLICADOS AO LONGO DO MESTRADO

- **Trabalho diretamente relacionado ao tema da dissertação**

MACHADO, G. O. *et al.* Impacts of Harmonic Voltage Distortions on the Dynamic Behavior and the PRPD Patterns of Partial Discharges in an Air Cavity Inside a Solid Dielectric Material. **Energies**, v. 15, n. 7, p. 2650, 2022. (*Qualis* CAPES A1)  
<https://doi.org/10.3390/en15072650>

- **Trabalhos indiretamente relacionados ao tema da dissertação**

MACHADO, G. O.; FARIA, V. H. C.; GOMES, L. C. Modelo de elementos finitos para simulação de descargas parciais em delaminações internas. Em: **Anais do 15º Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo**. SBMAG, Florianópolis (SC) Online, 2022.  
<https://doi.org/10.29327/163459.15-3>

MACHADO, G. O. *et al.* Projeto otimizado e análise por elementos finitos de um motor a relutância variável 8/6 tetrafásico. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 2, p. e23411225681, 2022. (*Qualis* CAPES A3)  
<http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v11i2.25681>