

# Quantificação de descargas parciais em geradores usando modelo matemático baseado na teoria de campo

Reinaldo Corrêa Leite <sup>[1]</sup>

[1] rcleite@ufpa.br. Universidade Federal do Pará / Instituto de Tecnologia / Faculdade de Engenharia Elétrica e Biomédica.

## RESUMO

Este trabalho desenvolve um modelo para quantificar o nível de descargas parciais (DP) em cavidades ocluídas em sistemas de isolamento de geradores. O modelo baseia-se na teoria de campo e usa o Método dos Elementos Finitos (MEF) para resolver as equações de campo. A simulação desenvolve-se em dois passos: no primeiro passo simula-se a situação anterior à descarga parcial, em que não existem cargas espaciais no interior da cavidade, pela resolução das equações de Laplace. Já o segundo passo simula a situação logo após a ocorrência da DP, resolvendo-se as equações de Poisson, simulando a existência das cargas espaciais criadas durante o tempo de descarga. As simulações indicam uma diferença de 2,14% entre os níveis de DP medido e calculado para uma delaminação na isolamento de uma barra estatórica. Com base nesse resultado, o modelo é capaz de estimar o nível de DP para defeitos localizados no sistema de isolamento de estatores de hidrogeradores.

**Palavras-chave:** Descargas parciais. Elementos finitos. Teoria de campo. Geradores. Métodos numéricos.

## ABSTRACT

*This work develops a model for partial discharge (PD) in voids occluded within hydro generator insulation systems based on the field theory using the finite element method (FEM) to solve the field equations. The simulation occurs in two steps: first, the pre-discharge situation, where the space charges are not present in the void by solving the Laplace equation. Then, as a second step, the Poisson equation is solved by simulating the existence of the space charges created by the PD during discharge time. The simulations show a 2.14% difference between the measured and calculated PD levels for a delamination defect. Based on these results, the model can estimate the effects of PD localized at the stator windings insulation system.*

**Keywords:** *Partial discharges. Finite element. Field theory. Generators. Numerical methods.*

## 1 Introdução

A medição de descargas parciais (DP) é reconhecidamente uma ferramenta de diagnóstico bem estabelecida para monitorar e identificar fontes de DP. Cavidades inseridas no sistema de isolamento de equipamentos de alta tensão podem levá-los a falhar. A falha originada por DP ocorre pela formação de protusões e árvores elétricas (*treeing*) que se propagam a partir das paredes da cavidade, dando origem a um rápido rompimento da rigidez dielétrica da isolamento (MONTANARI; SERI; DISSADO, 2019). Mas, embora diversas técnicas de medição e identificação de descargas parciais estejam bem desenvolvidas, a quantificação da atividade de DP ainda é um desafio, especialmente quando existe mais de uma fonte ativa desse fenômeno (LÉVESQUE *et al.*, 2017).

Modelar o processo de descarga pode trazer uma melhor compreensão do fenômeno. Os principais objetivos do modelamento das DP para o monitoramento da condição são: (i) aumentar o entendimento acerca do fenômeno de descargas parciais; (ii) identificar parâmetros críticos e mecanismos físicos que influenciam a ocorrência de descargas parciais; e, por fim, (iii) obter relações entre características dos defeitos, parâmetros de projeto de isolamento e condições de teste e as descargas parciais (ILLIAS; CHEN; LEWIN, 2017).

A preocupação com a modelagem de descargas parciais é bem antiga, remontando ao ano de 1932, quando Gemant e Philipoff desenvolveram um circuito capacitivo equivalente para investigar perdas em cabos isolados com papel impregnado de óleo originadas a partir de descargas em cavidades (LEMKE, 2012). O modelo consistia em um *gap* de descarga conectado em série com um capacitor e um resistor para proteção. Esse modelo foi modificado nos anos 1950 por Whitehead (1951), que substituiu o *gap* de descarga por um dispositivo controlado eletronicamente e por capacitâncias paralelas adicionais para simular a parte sã do dielétrico entre os eletrodos (KREUGER, 1989). Tais modificações permitiram estimar a transferência de carga em objetos reais. Esse modelo, que ficou conhecido como modelo clássico, era composto por uma capacitância  $C_a$  para representar o dielétrico sã entre os eletrodos do objeto sob teste, uma capacitância  $C_b$ , que representava a capacitância de dispersão da parte saudável entre os eletrodos, enquanto a cavidade era representada por uma capacitância  $C_c$ . Tal modelo também ficou conhecido

como modelo das três capacitâncias ou modelo abc (LEMKE, 2012).

O modelo clássico foi criticado por Pedersen, Crichton e McAllister (1991). Sua crítica foi a de que o modelo abc não poderia representar um problema de campo como as descargas parciais como um circuito de parâmetros concentrados. A cavidade não pode ser vista como um capacitor porque ela não é limitada por eletrodos metálicos capazes de produzir um campo eletrostático livre de cargas espaciais; além disso, as paredes da cavidade não são superfícies equipotenciais como os eletrodos metálicos e, como cargas espaciais estão presentes no fenômeno, o problema passa a ser descrito pelas equações de Poisson. Logo, os transitórios eletromagnéticos medidos nos ensaios de descargas parciais são causados pelo momento de um dipolo estabelecido na cavidade pelas descargas no gás (LEMKE, 2012). Outros modelos de análise de DP foram propostos, tais como o modelo de condutância (FORSSSEN; EDIN, 2008), o modelo de Niemeyer (NIEMEYER, 1995) e o modelo de Plasma (GIBALOV; PIETSCH, 2000). Esses modelos estão bem descritos nas referências indicadas e não serão discutidos neste artigo, por essa discussão estar fora do escopo deste trabalho.

Este artigo aborda o fenômeno das descargas parciais pela teoria de campo baseada no conceito de dipolo elétrico para calcular a carga produzida pela DP usando o teorema de Gauss e o Método dos Elementos Finitos (MEF). O problema é resolvido em dois passos: um antes e outro após a ocorrência da DP. O primeiro passo retrata a situação pré-descarga, na qual não existem cargas espaciais na cavidade, portanto considera-se o campo como sendo Laplaciano. O vetor densidade de campo elétrico é calculado e, por meio do teorema de Gauss, calcula-se a carga espacial na cavidade. A carga calculada no primeiro passo é a carga do dipolo formado dentro da cavidade pelas cargas que fluem a partir dos eletrodos e ficam aprisionadas nas paredes da cavidade. Essa carga é então usada para calcular o campo elétrico dentro da cavidade produzida pela DP e, novamente, usando o Teorema de Gauss, calcula-se a carga induzida nos eletrodos do objeto sob teste pelo evento de DP.

Essa abordagem permite quantificar o nível de DP em função do tipo e do tamanho do defeito. Outro ganho é a possibilidade de quantificar o campo elétrico na superfície do defeito e usar esse resultado para determinar o estresse elétrico por modelos de envelhecimento como os propostos em Montanari,

Seri e Dissado (2019). A vantagem principal dessa abordagem é sua simplicidade, que faz com que a implementação do modelo consuma menos memória de computador durante a simulação, bem como a possibilidade de simular defeitos difíceis de se criar em laboratório, tais como a delaminação.

Este artigo está estruturado da seguinte forma: na seção 2, faz-se uma descrição do processo de modelamento das DP usando a teoria de campo. A seção 3 trata da descrição do modelo de defeito usado para simular o fenômeno das descargas no sistema de isolamento dos enrolamentos do estator de hidrogeradores. Na seção 4, discutem-se os resultados obtidos na simulação com relação ao tamanho da cavidade e ao nível de descarga parcial. Por fim, na seção 5 são apresentadas as conclusões deste trabalho.

## 2 Referencial teórico

No modelo baseado na teoria de campo, Pedersen, Crichton e McAllister (1991) consideraram que os transitórios que ocorrem durante a atividade de DP induzem uma carga nos eletrodos do Objeto sob Ensaio (OSE), sendo essa carga induzida nos eletrodos do OSE, um produto da distribuição de cargas em cavidades dentro do dielétrico devido às DP. Consequentemente, no modelo proposto, a carga induzida não é produzida pela descarga de uma capacitância aparente, como sugerido pelo modelo das três capacitâncias, mas pelo estabelecimento de um momento de dipolo elétrico na cavidade por causa da descarga. Portanto, durante o tempo necessário para o estabelecimento do dipolo elétrico, apenas campos Poissonianos formados pelas cargas espaciais são considerados. Como a tensão aplicada aos eletrodos do objeto é constante durante o estabelecimento do dipolo, pode-se então desprezar o efeito do campo Laplaciano (PEDERSEN; CRICHTON; MCALLISTER, 1991).

As cargas induzidas podem ser consideradas como sendo a diferença entre a carga no eletrodo devida à atividade de DP e a carga no mesmo eletrodo antes da descarga. Aplicando o princípio da superposição, é possível calcular a carga induzida por meio da análise do vetor indução do campo elétrico. Sabe-se que, desde que o material seja isotrópico, a carga induzida dependerá apenas da localização e da magnitude da carga espacial e será também independente da tensão

aplicada aos eletrodos. Portanto, a carga espacial entre os eletrodos  $dQ$  induzirá uma carga em cada eletrodo do sistema e, desse modo, no  $i$ -ésimo eletrodo da carga induzida,  $dq_i$  será proporcional à  $dQ$ , conforme indicado na Equação (1).

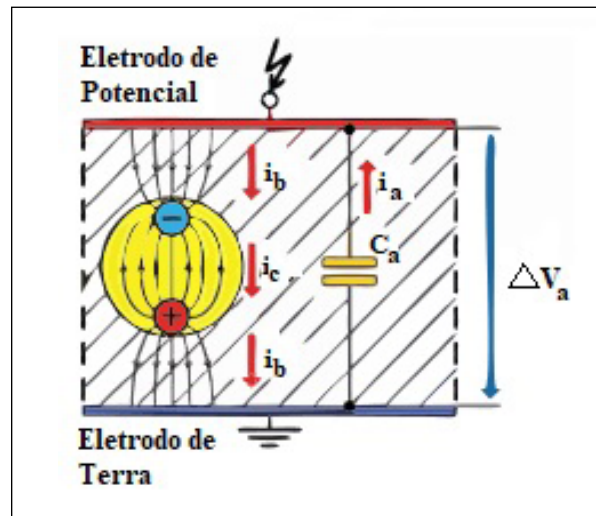
$$dq_i = -\lambda_i dQ \tag{1}$$

O parâmetro  $\lambda_i$  é uma função escalar positiva adimensional que depende da localização de  $dQ$ . Então, a carga total induzida no  $i$ -ésimo eletrodo pode ser expressa pela Equação (2) (PEDERSEN; CRICHTON; MCALLISTER, 1991).

$$q_i = \iiint \lambda_i \rho d\Omega - \iint \lambda_i \sigma dS \tag{2}$$

Na Equação (2),  $\rho$  é a densidade volumétrica de carga distribuída no elemento diferencial de volume  $d\Omega$  e  $\sigma$  é a densidade superficial de carga distribuída no elemento diferencial de área  $dS$  na interface entre os dois dielétricos. Nos estudos de descargas parciais em cavidades ocluídas em dielétricos sólidos, a carga espacial está localizada no interior dessas cavidades e nas suas paredes, formando um dipolo elétrico, como ilustrado na Figura 1.

Figura 1 – Modelo de descarga parcial baseado no dipolo elétrico



Fonte: Lemke (2012)

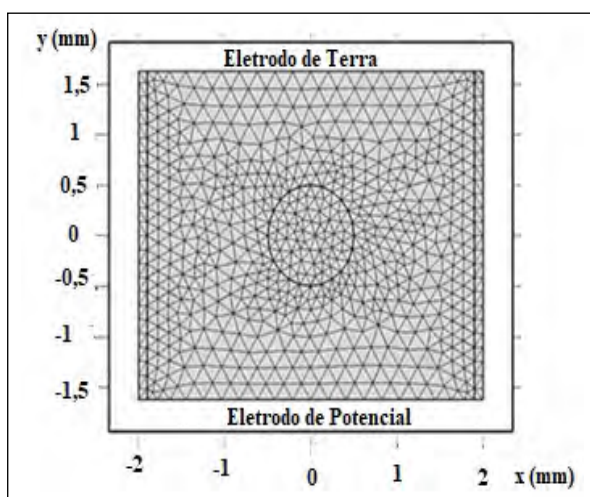
### 3 Método da pesquisa

Normalmente, a maioria das falhas que ocorrem em um gerador são de natureza elétrica, mesmo que sua causa raiz seja de outra natureza. Qualquer causa raiz, seja de origem mecânica ou térmica, irá desenvolver-se até originar uma falha elétrica. Um exemplo seria uma cunha frouxa que leva à erosão do revestimento semicondutivo, que, por sua vez, pode causar o surgimento de descargas parciais na superfície da barra (HUDON; BELEC, 2005).

As DP detectadas na isolação de geradores podem ser classificadas em quatro grupos: descargas internas, descargas de ranhura, descargas externas ao núcleo de ferro e descargas originadas em delaminações (HUDON; BELEC, 2005). Neste artigo escolheram-se os defeitos dos tipos descarga interna e descarga em delaminação. As descargas internas ocorrem no interior de cavidades presentes na isolação tanto de barras Roebel como de bobinas. Já as delaminações foram escolhidas por causa da dificuldade de se criar esse tipo de defeito em laboratório (HUDON; BELEC, 2005).

A cavidade esférica foi escolhida para modelar a fonte do defeito tipo descarga interna por causa da simplicidade de implementação e da existência de um tratamento analítico, encontrado em Pedersen, Crichton e McAllister (1991) e em Lemke (2013). Esse tipo de defeito foi simulado em 2D como um círculo inserido no meio de uma isolação sólida, conforme ilustrado na Figura 2. O Método dos Elementos Finitos (MEF) foi usado para resolver as equações de campo para a quantificação da DP devida à cavidade esférica.

**Figura 2** – Modelo de cavidade esférica com a malha para simulação usando o MEF



Fonte: elaborada pelo autor

O segundo tipo de fonte de descarga parcial utilizado foi a delaminação. Dois tipos de delaminação são encontrados: um ocorre na fita de isolação para o *groundwall*, e o outro se relaciona à delaminação da isolação próxima aos condutores que formam a barra ou a bobina. Esses defeitos são difíceis de reproduzir em laboratório e são mais encontrados na isolação de bobinas múltiplas que nas barras Roebel (HUDON; BELEC, 2005). A Figura 3 ilustra a delaminação na isolação de uma espira de uma bobina próxima aos condutores.

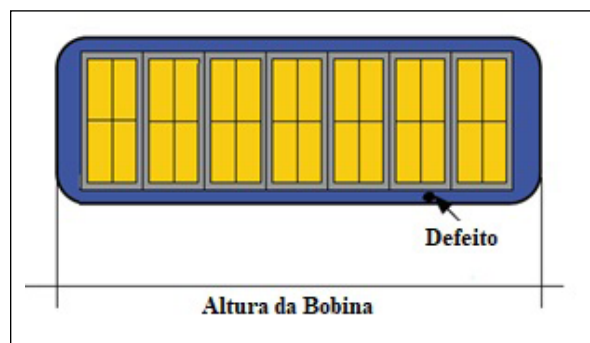
**Figura 3** – Delaminação próxima aos condutores em uma bobina de múltiplas espiras



Fonte: Hudon e Belec (2005)

Como pode ser visto na Figura 3, a forma geométrica da delaminação aproxima-se de uma elipse. Logo, escolheu-se a elipse para representar esse defeito em 2D no software COMSOL Multiphysics, que resolve as equações de campo pelo MEF. A delaminação é representada como sendo uma cavidade elipsoidal localizada no meio do sistema de isolação, conforme ilustrado na Figura 4.

**Figura 4** – Comparação da dimensão da bobina com a do defeito



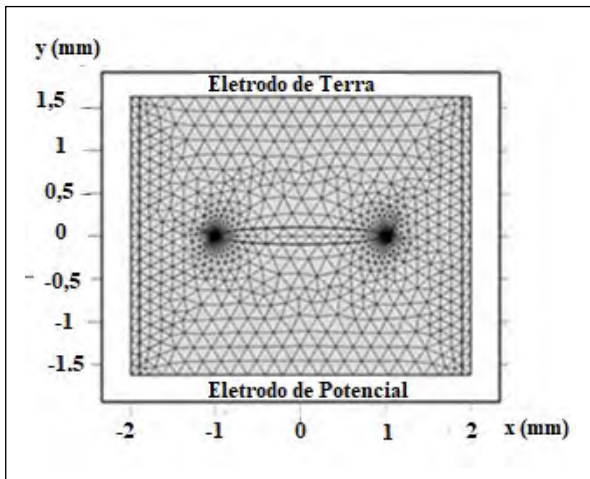
Fonte: elaborada pelo autor

O domínio de simulação retangular mostrado nas Figuras 2 e 5 indica uma região de uma bobina do enrolamento de estator de um hidrogerador Westinghouse de potência nominal 65.000 kVA,

pertencente a uma empresa canadense de geração, transmissão e distribuição de energia. A parte inferior do retângulo representa uma espira condutora da bobina, e a parte superior do retângulo representa a parede da ranhura.

Escolheu-se o valor de 3,35 mm para espessura (dimensão y) do enrolamento por ser esse o valor encontrado em Hudon *et al.* (2010). A largura do domínio de simulação (dimensão x) representa a altura da bobina, que, conforme informado em Hudon *et al.* (2010), tem valor igual a 72,58 mm. Essa dimensão é muito maior que a do defeito, que é de 1 mm para a cavidade circular e de 1 mm e 0,5 mm para os eixos maior e menor da elipse.

**Figura 5** – Modelo de delaminação com a malha para simulação usando o MEF



Fonte: elaborada pelo autor

Em função do exposto acima, decidiu-se por truncar o domínio de simulação. Esse truncamento foi realizado usando-se a condição de fronteira *Infinite Element Domain* do COMSOL, que permite o truncamento de um domínio que se estende para o infinito. Essa condição de fronteira está aplicada às extremidades direita e esquerda do domínio de simulação. No centro do domínio tem-se uma cavidade circular com 1 mm de diâmetro. Para a delaminação, as dimensões da elipse são 1,0 mm para o eixo maior e 0,5 mm para o eixo menor.

O próximo passo neste trabalho é simular e validar o modelo. A simulação desenvolve-se em dois passos: no primeiro passo, a Equação de Laplace, ilustrada na Equação (3), é resolvida para obter-se a distribuição de tensão. A partir da distribuição de tensão, obtém-se a distribuição de campo elétrico antes da ocorrência da descarga parcial resolvendo-se a Equação (4).

$$\nabla^2 V = 0 \tag{3}$$

$$\mathbf{E} = -\nabla V \tag{4}$$

Uma vez obtida a distribuição do campo elétrico, determina-se o vetor Densidade de Fluxo Elétrico (**D**) por meio da relação constitutiva  $\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E}$ . A carga espacial que forma o dipolo elétrico e que dá origem à DP na cavidade é calculada por meio do teorema de Gauss, ilustrado na Equação (5), que estabelece que o fluxo elétrico total que emana de uma superfície é igual à soma algébrica de todas as cargas no interior da superfície.

$$Q = \oint \mathbf{D} \cdot d\mathbf{S} \tag{5}$$

Na segunda parte da simulação, a carga espacial calculada pela Equação (5) é usada para determinar a distribuição do campo elétrico após a ocorrência da DP pela solução da Equação (6). Nessa Equação,  $\rho$  é a soma das cargas superficiais e volumétricas na parede e no interior da cavidade, após a ocorrência da DP (PEDERSEN; CRICHTON; MCALLISTER, 1991).

$$\nabla^2 V = \frac{\rho}{\epsilon_0} \tag{6}$$

Novamente, a partir da distribuição de potencial obtida pela Equação (6), calcula-se a distribuição de campo elétrico e obtém-se o vetor densidade de fluxo elétrico **D**, considerando a cavidade como uma superfície gaussiana, pode-se igualar as Equações (2) e (5). Deve-se, ainda, considerar que a carga induzida proposta por Pedersen, Crichton e McAllister (1991) é dada pela Equação (7).

$$q_{in} = \oint \mathbf{D} \cdot d\mathbf{S} \tag{7}$$

Decidiu-se simular apenas uma pequena porção do sistema de isolamento, podendo esse domínio de simulação representar tanto uma barra Roebel como uma bobina de múltiplas espiras. O material do sistema de isolamento foi considerado como um compósito de resina epóxi e papel de mica, para o qual a constante dielétrica (permissividade) é 3,7.

Duas condições de fronteira do tipo Dirichlet (potencial imposto) são aplicadas ao domínio de simulação: o eletrodo vivo (ver Figuras 2 e 5), que simula os condutores da barra Roebel ou da bobina, e o condutor terra, representando o *groundwall* (ver Figuras 2 e 5). Os sinais de DP, após a descarga, viajam através do condutor até suas extremidades, como descrito por Lemke (2013). Para simular essa condição em domínio de simulação limitado, optou-se por usar a condição de fronteira de elemento infinito disponível no software de simulação. Tal condição permite que domínios limitados sejam tratados como infinitos. Mais detalhes sobre o assunto podem ser encontrados no manual do software COMSOL Multiphysics (COMSOL, 2018).

#### 4 Resultados da pesquisa

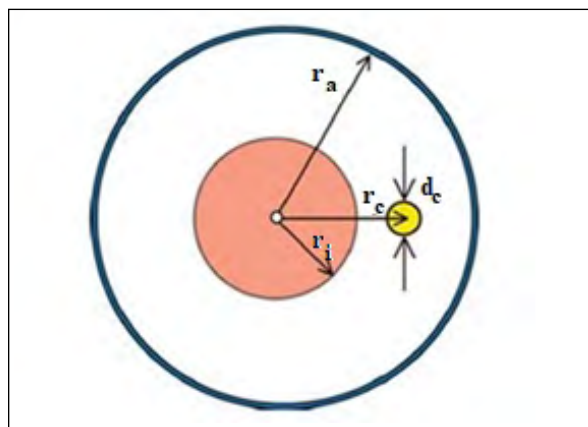
Nesta seção procura-se, primeiramente, validar o modelo, comparando os resultados obtidos por Lemke (2013) para um defeito na isolação de um cabo de energia com o modelo proposto. Validado o modelo, apresentam-se, na subseção 4.2, os resultados das simulações usando o MEF para quantificar o nível de DP nos modelos de defeito dos tipos cavidade esférica e delaminação.

##### 4.1 Validação do modelo de DP baseado na teoria de campo

A validação do modelo é realizada simulando-se o problema proposto em Lemke (2013) e mostrado na Figura 5. A cavidade está na isolação de um cabo de energia de tensão nominal 20 kV cujo material é polietileno (XLPE). Os parâmetros geométricos são mostrados na Figura 6, onde  $r_i = 8,5$  mm,  $r_a = 14$  mm e  $r_c = 10$  mm são, respectivamente, o raio interno do condutor, o raio externo do condutor e a distância entre o centro do cabo e o centro da cavidade. Os resultados da simulação foram comparados com os resultados obtidos pelo uso da Equação (8), na qual  $q_a$  é a carga aparente ou induzida e  $d_c$  é o diâmetro da cavidade.

$$q_a = (65 \text{ pC}) \frac{d_c^2}{1 \text{ mm}^2} \quad (8)$$

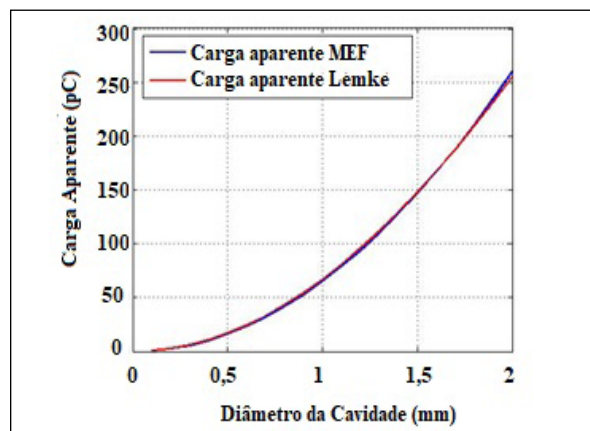
Figura 6 – Parâmetros geométricos para o cabo de energia com isolação de XLPE



Fonte: Lemke (2013)

No gráfico da Figura 7, a linha vermelha corresponde aos valores calculados pela Equação (8), proposta em Lemke (2013), e a linha azul corresponde aos valores calculados pelo modelo proposto neste trabalho. Observa-se ainda, que a maior diferença ocorre em relação a pequenos valores do diâmetro da cavidade. Por exemplo, para uma cavidade cujo diâmetro é de 0,1 mm, existe um erro de 4,2% entre a carga calculada pelo modelo baseado na teoria de campo resolvido pelo MEF e aquela calculada pela equação proposta em Lemke (2013). De forma geral, o erro médio entre os valores de carga calculados pelos dois métodos é de 2,2%, podendo-se considerar esse erro desprezível. Com base nesse resultado, considera-se o modelo como válido.

Figura 7 – Comparação entre a carga induzida calculada pelo modelo baseado na teoria de campo e a calculada pela Equação (8), de acordo com a variação do diâmetro da cavidade



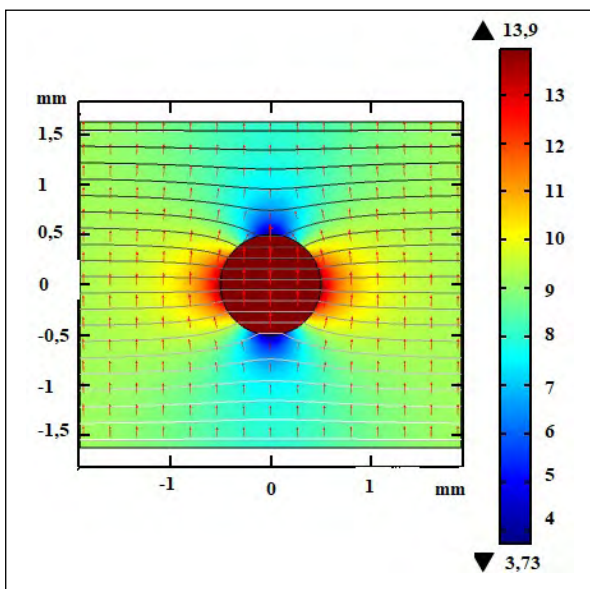
Fonte: elaborada pelo do autor

#### 4.2 Quantificação da carga induzida por DP devidas a defeitos encontrados em sistemas de isolamento do estator

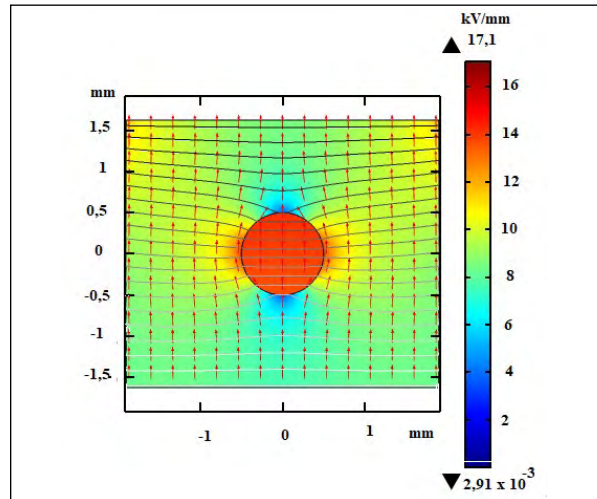
Após validar o método, passou-se a simular os defeitos normalmente encontrados nos sistemas de isolamento dos estatores de hidrogeradores, propostos na seção 3. Os defeitos são: i) uma cavidade esférica, representando defeitos internos preexistentes na isolamento, ou seja, oriundos do processo de fabricação, retratados como um círculo; e ii) as delaminações, que são um tipo de defeito que ocorre no sistema de isolamento que pode ser preexistente ou ser formado durante a operação do hidrogerador por estresse térmico, o qual leva as resinas orgânicas a perderem sua resistência, causando um deslocamento das camadas isolantes (BRASIL; VILHENA; DMITRIEV, 2018). Neste trabalho, as delaminações são representadas por elipses.

A Figura 8 ilustra a distribuição de campo antes da ocorrência da DP; nela se observa o campo elétrico no interior da cavidade sendo superior ao campo externo à cavidade, como era de se esperar em função da diferença de permissividades entre o material isolante e o ar. Na Figura 9 é ilustrada a distribuição de campo após a descarga. Nessa figura, observa-se uma elevação do campo, tanto dentro como fora da cavidade, causada pela migração de cargas para os eletrodos do sistema (PEDERSEN; CRICHTON; MCALLISTER, 1991).

**Figura 8** – Distribuição de campo elétrico antes da DP



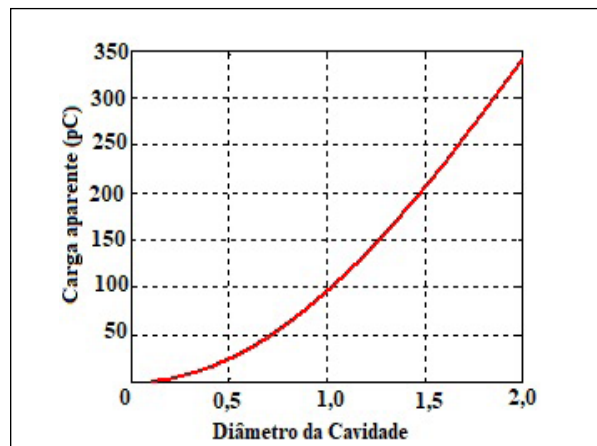
**Figura 9** – Distribuição de campo elétrico após a DP



Fonte: elaborada pelo autor

Na Figura 10 é indicada a evolução do nível de descarga parcial (carga aparente) com o aumento da cavidade. Como era de se esperar, o nível de DP aumenta com o aumento do diâmetro, pois quanto maior a cavidade, mantido o campo elétrico de grande intensidade, maior o espaço disponível para os elétrons que formarão a avalanche percorrerem, ganharem velocidade, colidirem com átomos neutros e produzirem mais elétrons livres, que alimentarão a avalanche e a manterão, possibilitando a ocorrência de descargas. Segundo Kuffel, Zaengl e Kuffel (2000), diâmetros menores reduzem o caminho crítico do elétron, pois eles podem ser absorvidos pelo catodo (parede da cavidade próxima ao potencial), evitando a formação da avalanche.

**Figura 10** – Elevação do nível de DP com o aumento do diâmetro da cavidade

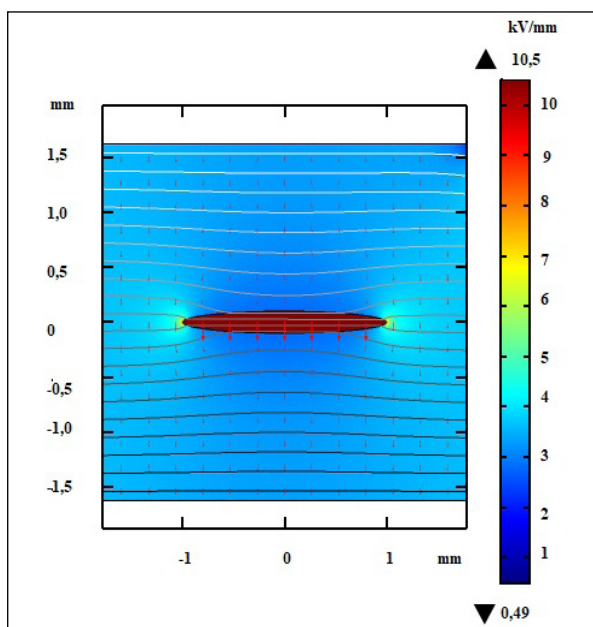


Fonte: elaborada pelo autor

As Figuras 11 e 12 mostram a distribuição do campo elétrico antes e depois da ocorrência da DP no interior de uma delaminação. A Figura 10 ilustra a situação antes da descarga, observando-se novamente que o campo elétrico no interior da cavidade é maior que no dielétrico que a circunda. Mas, ao se comparar os campos antes e depois da descarga nos dois tipos de defeito, observa-se que o campo no interior da delaminação é maior que o campo no interior da cavidade circular. Outra diferença entre os campos produzidos pelos dois tipos de defeito é que a intensidade do campo elétrico nas proximidades da delaminação é bem superior à intensidade do campo elétrico próximo à cavidade esférica, como pode ser visto nas Figuras 10 e 11.

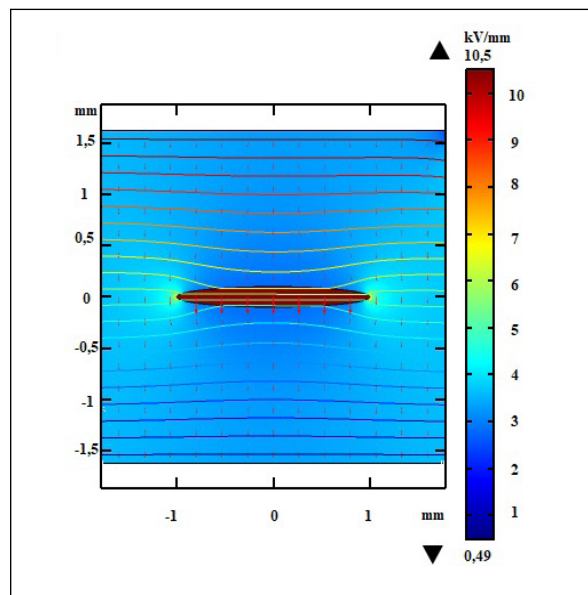
A Figura 13 representa amostras do perfil do campo elétrico no dielétrico até uma distância de 1,5 mm da parede da cavidade. A linha azul tracejada representa o campo elétrico produzido pela delaminação, e a linha cheia vermelha, o campo formado pela cavidade esférica. Nota-se que, na parede da cavidade, há uma diferença de mais de 10 kV/mm entre os valores das intensidades produzidas pelos dois defeitos, que se deve ao fato de a geometria da delaminação ser mais propícia à distorção do campo elétrico.

**Figura 11** – Distribuição de campo elétrico antes da DP



Fonte: elaborada pelo autor

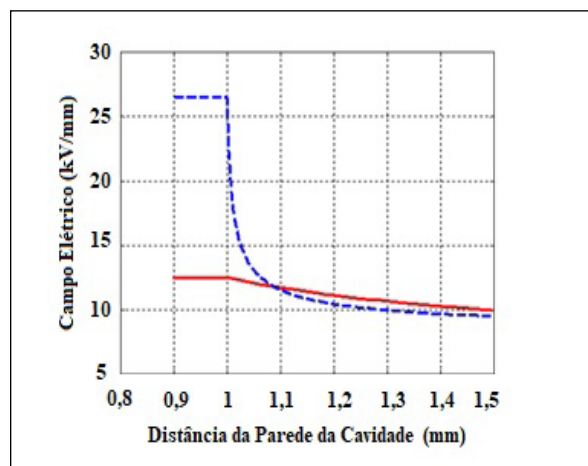
**Figura 12** – Distribuição de campo elétrico após a DP



Fonte: elaborada pelo autor

Essa situação favorece o crescimento do defeito a partir da parede da cavidade, porque esse campo intenso pode ser capaz de fornecer energia suficiente para as avalanches que atingem uma determinada área do dielétrico. Se essa área for fraca do ponto de vista da energia de ligação das moléculas que formam a estrutura cristalina do material dielétrico, haverá a quebra dessas ligações, provocando o crescimento do defeito como árvores elétricas (MONTANARI, 2018).

**Figura 13** – Perfil do campo elétrico nas proximidades dos defeitos delaminação (linha tracejada) e cavidade esférica (linha cheia)



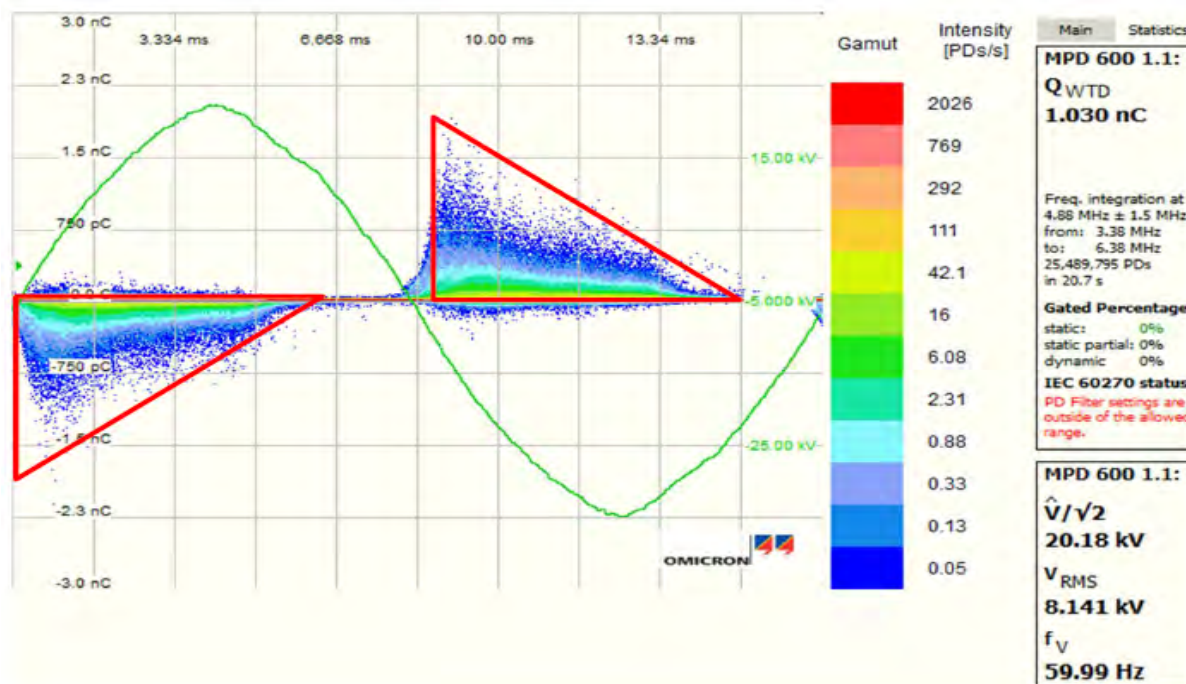
Fonte: elaborada pelo autor



A Figura 14 indica o padrão de descargas parciais no formato de *Phase Resolved Partial Discharge* (PRPD), obtido nas medições descritas em Brasil, Vilhena e Dmitriev (2018) para uma atividade de DP

devida à delaminação na isolação de uma bobina de estator, cujas dimensões eram 3,98 mm de largura e 0,4 mm de comprimento.

Figura 14 – Padrão PRPD medido para um defeito tipo delaminação

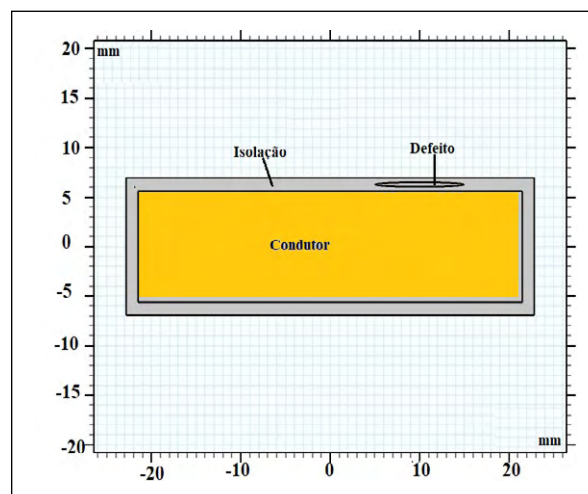


Fonte: Brasil, Vilhena e Dmitriev (2018)

Para efeito de comparação, decidiu-se simular o defeito descrito em Brasil, Vilhena e Dmitriev (2018) criando-se um novo domínio de simulação no COMSOL. O novo domínio de simulação foi formado pela bobina com o sistema de isolação em que está inserida a delaminação. A Figura 15 indica a seção transversal de uma bobina de estator; na figura, a periferia do retângulo interno representa os condutores, enquanto a periferia do retângulo mais externo representa o *groundwall*.

O sistema de isolação consiste em um compósito de resina epóxi e papel de mica que fica entre os condutores e o *groundwall*. Como condição de fronteira, aplicaram-se potenciais impostos, um nos condutores ( $V_{app} = 20 \text{ kV}$ ), simulando a mesma tensão aplicada ao objeto sob ensaio descrito em Brasil, Vilhena e Dmitriev (2018), e uma condição de fronteira do tipo *ground* (COMSOL, 2018) para o *groundwall*.

Figura 15 – Domínio de simulação para um defeito tipo delaminação no sistema de isolação de uma bobina



Fonte: elaborada pelo autor

O Quadro 1 compara o nível de DP medido em Brasil, Vilhena e Dmitriev (2018) com o nível de DP calculado pelo modelo aqui proposto. O resultado obtido pelo modelo revela uma boa concordância com os dados medidos pelos autores mencionados, com um erro de 2,14%.

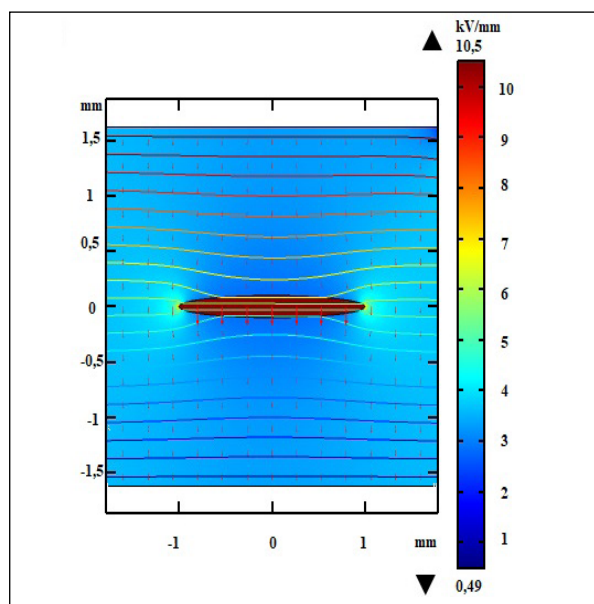
**Quadro 1** – Comparação entre o nível de DP medido em Brasil, Vilhena e Dmitriev (2018) e o nível de DP calculado pelo modelo proposto

Nível de DP medido (nC)	Nível de DP calculado (nC)	Erro (%)
1,030	1,052	2,14

Fonte: dados da pesquisa

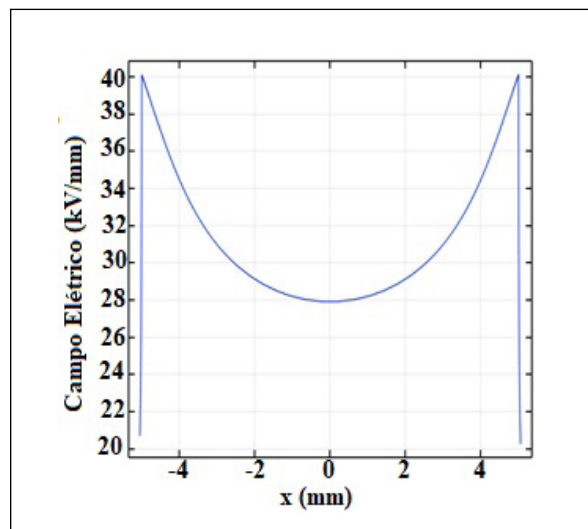
As Figuras 16 e 17 ilustram a distribuição do campo elétrico dentro da cavidade após a ocorrência da DP e indicam que a intensidade do campo elétrico é maior nas pontas do defeito que em seu centro. Tal situação é propensa a causar o crescimento do defeito a partir das paredes da cavidade, pois o campo elétrico intenso facilita a formação de avalanches de elétrons. Esses, ao atingirem uma área fraca do ponto de vista da energia de ligação das moléculas do material, provocam rachaduras que tenderão a crescer na direção perpendicular ao campo aplicado devido ao estresse mecânico provocado pelo tensor de Maxwell (LEWIS *et al.*, 1996).

**Figura 16** – Distribuição do campo elétrico dentro da delaminação e no dielétrico do sistema de isolamento



Fonte: elaborada pelo autor

**Figura 17** – Intensidade do campo elétrico dentro da delaminação



Fonte: elaborada pelo autor

## 5 Considerações finais

A quantificação das descargas parciais usando o conceito de dipolo elétrico, a teoria de campo e o Método dos Elementos Finitos para resolver as equações de campo mostrou-se viável, prática e com uma elevada taxa de acerto. A diferença de apenas 2,14% entre os resultados obtidos pelo modelo e os obtidos com a equação proposta por Lemke (2013) torna o processo completamente preciso e confiável.

Com os resultados indicados, sugere-se que o modelo desenvolvido pode ser utilizado em outras situações práticas, como: estimar o estado do sistema de isolamento de enrolamentos do estator de hidrogeradores; estimar o nível de DP do sistema de isolamento de outros equipamentos de alta tensão; avaliar o crescimento de defeitos a partir das paredes de cavidades existentes na isolamento de equipamentos de alta tensão, como árvores elétricas, trilhamentos, rachaduras, entre outros.

Baseado nos resultados obtidos, o autor acredita que o modelo proposto pode ser usado como ferramenta de análise por engenheiros de manutenção nas concessionárias de energia elétrica e na indústria em geral, para simular defeitos e comparar com dados reais, de forma a verificar se o tamanho do defeito é danoso à isolamento ou se este pode crescer para uma falha catastrófica.

## AGRADECIMENTOS

R. C. Leite agradece à Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação (PROPESP) da Universidade Federal do Pará pela concessão de bolsa de iniciação científica para aluno e de estímulo a recém-contratados e a novos doutores pelo programa PRODOUTOR, que fez esta pesquisa possível.

## REFERÊNCIAS

- BRASIL, F. S.; VILHENA, P. R. M.; DMITRIEV, V. Dielectric evaluation of stator bars in laboratory. *In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SISTEMAS ELÉTRICOS (SBSE)*, 7., 2018, Niterói (Brazil). **Proceedings of VII Brazilian Electrical System Symposium**. Niterói: IEEE, 2018. p. 1-6. DOI: 10.1109/SBSE.2018.8395928.
- COMSOL. **COMSOL multiphysics**: reference manual, version 5.3. Burlington, MA: COMSOL, 2018.
- FORSSEN, C.; EDIN, H. Partial discharges in a cavity at variable applied frequency part 2: measurements and modeling. **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**, v. 15, n. 6, p. 1610-1616, 2008. DOI: 10.1109/TDEI.2008.4712664.
- GIBALOV, V. I.; PIETSCH, G. J. The development of dielectric barrier discharges in gas gaps and on surfaces. **Journal of Physics D: Applied Physics**, v. 33, n. 20, p. 2618-2636, 2000.
- 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. DOI : 10.1109/TDEI.2005.1430399.
- HUDON, C. *et al.* **Définition d'un approche commune de simulation numérique alternateur multi-disciplines**. Verennes: IREQ, 2010. 82 p.
- ILLIAS, H. A.; CHEN, G.; LEWIN, P. L. Comparison between three-capacitance, analytical-based and finite element analysis partial discharge models in condition monitoring. **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**, v. 24, n. 1, p. 99-109, 2017. DOI: 10.1109/TDEI.2016.005971.
- KREUGER, F. H. **Partial discharge detection in high-voltage equipment**. Berlin: Butterworth-Heinemann, 1989.
- KUFFEL, E.; ZAENGL, W. S.; KUFFEL, J. **High voltage engineering fundamentals**. 2. ed. Oxford: Elsevier, 2000.
- LEMKE, E. A critical review of partial-discharge models. **IEEE Electrical Insulation Magazine**, v. 28, n. 6, p. 11-16, 2012. DOI: 10.1109/MEI.2012.6340519.
- LEMKE, E. Analysis of the partial discharge charge transfer in extruded power cables. **IEEE Electrical Insulation Magazine**, v. 29, n. 1, p. 24-28, 2013. DOI: 10.1109/MEI.2013.6410536.
- LÉVESQUE, M. *et al.* The need for PD quantification based on the type of discharge sources. *In: IEEE ELECTRICAL INSULATION CONFERENCE (EIC)*, 2017, Baltimore (United States). **Proceedings of 2017 IEEE Electrical Insulation Conference**. Baltimore: IEEE, 2017. p. 380-383. DOI: 10.1109/EIC.2017.8004694.
- LEWIS, T. J. *et al.* A new model for electrical ageing and breakdown in dielectrics. *In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON DIELECTRIC MATERIALS, MEASUREMENTS AND APPLICATIONS*, 7., 1996, Bath (United Kingdom). **Proceedings (...)**. Bath: IEEE, 1996. p. 220-224. DOI: 10.1049/cp:19961026.
- MONTANARI, G. C. A contribution to unravel the mysteries of electrical aging under DC electrical stress: where we are and where we would need to go. *In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON DIELECTRICS (ICD)*, 2., 2018, Budapest (Hungary). **Proceedings (...)**. Budapest: IEEE, 2018. p. 1-15.
- MONTANARI, G. C.; SERI, P.; DISSADO, L. A. Aging mechanisms of polymeric materials under DC electrical stress: a new approach and similarities to mechanical aging. **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**, v. 26, n. 2, p. 634-641, 2019. DOI: 10.1109/ICD.2018.8514744.
- NIEMEYER, L. A generalized approach to partial discharge modeling. **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical insulation**, v. 2, n. 4, p. 510-528, 1995. DOI: 10.1109/94.407017.
- 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. DOI: 10.1109/14.85121.
- WHITEHEAD, S. **Dielectric breakdown of solids**. Oxford: Clarendon Press, 1951.