



## Grupo de Estudo de Geração Hidráulica-GGH

### Modelagem de descargas parciais em cavidades no isolamento de barras de geradores usando a teoria de campo

REINALDO CORRÃ LEITE(1); FABIO MOURA SARMENTO(1);  
UFPA(1);

#### RESUMO

Este trabalho desenvolve um modelo para descargas parciais em cavidades comuns no isolamento de barras de geradores usando o modelo de descargas parciais (DP) baseado na teoria de campo proposto usando como método numérico o Método dos Elementos Finitos (MEF). A simulação é feita em dois momentos: primeiro modela-se a situação pré-descarga, onde ainda não existem as cargas espaciais que darão origem ao dipolo elétrico pela solução da equação de Laplace. Depois, resolve-se a equação de Poisson, que simula a situação de descarga com a presença da carga espacial gerada pela DP. O modelo desenvolvido poderá ser usado para estimar os efeitos das DP localizadas no sistema de isolamento de barras de geradores.

#### PALAVRAS-CHAVE

Descargas parciais, Elementos finitos, Teoria de Campo, Geradores, Métodos Numéricos.

#### 1.0 - INTRODUÇÃO

Descargas parciais (DP) são definidas como pequenas descargas que ocorrem no interior de cavidades existentes em sistemas de isolamento sólidos ou bolhas em sistemas de isolamento líquida de equipamentos elétricos do sistema de potência [2], [3], [4], [5]. Falhas em uma das etapas associadas ao processo de manufatura de sistemas de isolamento elétrica, como por exemplo, uma falha na manutenção do vácuo durante o processo de impregnação de sistemas de isolamento papel óleo, permite a formação de cavidades preenchidas com ar [6]. Estas cavidades quando submetidas a elevados valores de estresse elétrico que ultrapassem a rigidez dielétrica do ar, provocam as descargas parciais.

Estas descargas parciais produzem avalanches de elétrons e íons que se deslocam através da cavidade até se chocarem com as paredes da cavidade. Estes choques são impactos de alta energia que causam a deterioração do material e levam a falhas do equipamento que podem ser parciais ou totais. Portanto constata-se que a medição de descargas parciais é uma ação importante para a avaliação da vida útil do sistema de isolamento que, em última instância, determina a vida útil do equipamento [4], [5].

(\*) Rua Augusto Corrêa, n° 01 – sala 07 - Laboratório de Engenharia Elétrica, Anexo – CEP 66.075-110 Belém, PA – Brasil Tel: (+55 91) 99149-7791 – Email: rcleite@ufpa.br

Por outro lado, as empresas concessionárias de energia são cada vez mais levadas a buscar ações de planejamento que as mantenham competitivas no mercado. Desligamentos intempestivos causados por falhas em equipamentos causam transtornos tanto do ponto de vista econômico, pela aplicação de penalidades e perdas de receita como pelos danos à imagem da empresa por afetar a sociedade em geral no caso de grandes desligamentos. Dentre os ativos de uma empresa de geração e transmissão de energia, o gerador é sem sombra de dúvidas o mais importante, pois ele é responsável pela produção do produto comercializado pela empresa, a energia elétrica.

Como visto no parágrafo anterior, as falhas na isolamento elétrica são um grande problema para os equipamentos do sistema de elétrico de potência. A fim de preservar o funcionamento normal e reduzir a probabilidade de falhas e explosões, é imperativo prevenir e identificar essas falhas de antemão. Para máquinas rotativas, os problemas de isolamento mais comuns são desgaste da tinta condutiva, delaminação e quebra da isolamento principal, devido a perturbações mecânicas, efeitos térmicos e vibração excessiva [7]. Esses defeitos podem ser detectados por meio de sinais de descargas parciais (DP).

## 2.0 - Modelo de descargas parciais baseado na teoria de campo

O modelo baseado na teoria de campo foi desenvolvido por Pedersen que considerou em sua teoria que os transitórios que ocorrem durante a atividade de descargas parciais induzem uma carga  $Q_i$  nos eletrodos do objeto sob ensaio, sendo estas cargas induzidas produto da distribuição de cargas nas cavidades do dielétrico devido a descarga parcial [1]. Portanto, no modelo proposto, a carga induzida já não era produzida pela descarga de uma capacitância imaginária e sim pelo estabelecimento de um momento de dipolo na cavidade como consequência das descargas [8]. Portanto durante o tempo necessário para o estabelecimento do momento do dipolo leva-se em conta apenas os campos Poissonianos causados pelas cargas espaciais, uma vez que a tensão aplicada aos eletrodos de teste se mantém constante, pode-se desprezar os campos Laplacianos.

A carga induzida pode ser expressa como a diferença entre a carga no eletrodo devida à atividade de descarga e a carga no mesmo eletrodo antes desta atividade [1]. Aplicando-se o princípio da superposição, pode-se determinar a carga induzida no eletrodo pela análise do vetor indução elétrica  $D$ . Sabe-se que a carga induzida depende somente da localização e da magnitude da carga espacial e é independente dos potenciais no eletrodo desde que o material seja isotrópico [1]. Assim sendo, uma carga espacial entre os eletrodos  $dQ$  induzirá cargas em todos os eletrodos localizados nas proximidades, portanto, pelo princípio da superposição a carga induzida no  $i$ -ésimo eletrodo  $dq_i$  será proporcional a  $dQ$ .

$$dq_i = -\lambda_i dQ \quad (1)$$

O parâmetro  $\lambda_i$  uma função escalar adimensional positiva que depende da localização de  $dQ$ . Logo a carga total induzida no  $i$ -ésimo eletrodo devida à uma distribuição de cargas espaciais será expressa pela Equação (2) [1].

$$q_i = - \iiint \lambda_i \rho d\Omega - \iint \lambda_i \sigma dS \quad (2)$$

Em (2)  $\rho$  é a densidade de carga volumétrica contida no elemento de volume  $d\Omega$  e  $\sigma$  é a densidade superficial de carga no elemento de área  $dS$  de uma interface entre dois dielétricos. No estudo de descargas parciais em cavidades ocluídas em dielétricos sólidos, as cargas espaciais localizam-se dentro das cavidades e nas paredes destas cavidades formando um momento de dipolo como ilustrado na Figura 1.

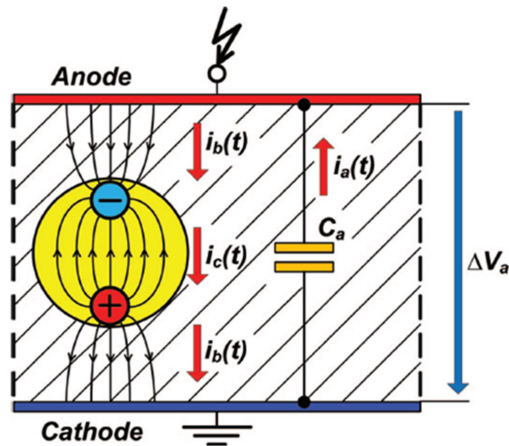


FIGURA 1 – Modelo do dipolo para descarga parcial em cavidades.  
Fonte:[8].

Pedersen mostra que a carga induzida nos terminais do objeto sob ensaio é medida pelos instrumentos de medição de descargas parciais e pode, portanto, ser usada para estimar a intensidade da descarga parcial.

### 3.0 - Resultados

Para solucionar o problema de quantificação das descargas parciais no sistema de isolamento de barras de geradores usou-se o Método dos Elementos para modelar os defeitos que produzem as descargas parciais. Foram modelados os dois tipos de defeitos mais comuns no isolamento da barra de geradores, a saber: defeito tipo cavidade e a delaminação [7]. O programa de simulação foi o COMSOL Multiphysics.

O defeito tipo cavidade foi simulado como sendo circular e inserido na isolamento sólida conforme mostrado na Figura 2.

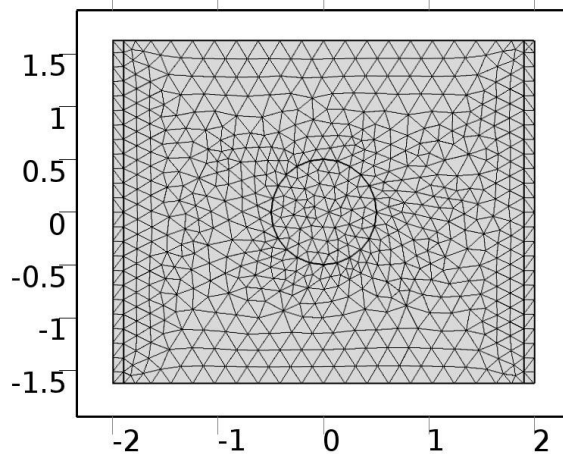


FIGURA 2 - Modelo de cavidade com a malha para simulação no MEF.

Já o defeito tipo delaminação foi simulado como sendo uma elipse com eixo maior perpendicular à direção do campo elétrico, ver Figura 3.

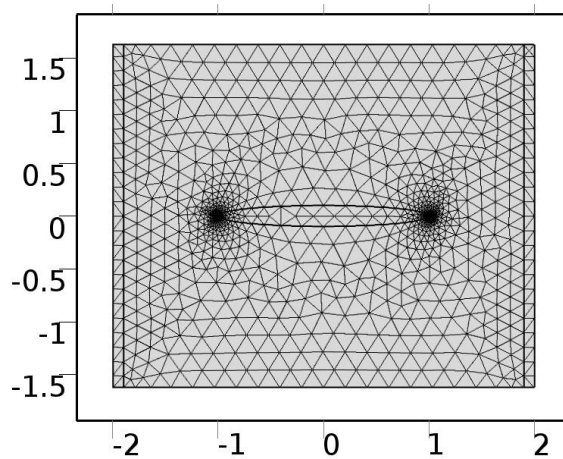


FIGURA 3- Modelo de delaminação com malha para simulação no MEF.

Os domínios de simulação, parte retangular exibida nas Figuras 2 e 3, mostram um trecho de barra de gerador com espessura de 3,25 mm na qual inseriu-se um defeito tipo cavidade circular (Figura 2) de diâmetro 1 mm e um defeito tipo delaminação de forma elipsoidal com eixo maior de 1 mm e eixo menor de 0,5 mm (Figura 3).

A simulação foi realizada em duas etapas: na primeira, calculou-se o campo elétrico antes da ocorrência da descarga parcial usando a equação de Laplace, Equação (3), para obter-se a distribuição de potencial e a partir desta, calculou-se o campo elétrico pela Equação (4).

$$\nabla^2 V = 0 \quad (3)$$

$$E = -\nabla V \quad (4)$$

De posse da distribuição de campo elétrico, determina-se o vetor densidade de fluxo elétrico  $D$  pela relação constitutiva  $D = \epsilon E$ . As distribuições de carga espacial e superficial no volume e paredes da cavidade foram calculadas a partir da Lei de Gauss, Equação (5).

$$Q = \oint D \cdot dS \quad (5)$$

Na segunda etapa da simulação, usaram-se os valores das cargas espaciais obtidos na primeira fase para calcular o campo a distribuição de campo elétrico na cavidade. Neste caso calcula-se primeiro a distribuição de potencial a partir da equação de Poisson, Equação (6).

$$\nabla^2 V = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (6)$$

Na Equação (6)  $\rho$  é a soma das distribuições de carga espacial volumétrica e superficial presentes na cavidade após a descarga parcial como descrito em [1]. Entretanto a Lei de Gauss estabelece que o fluxo elétrico total que emana de uma superfície fechada qualquer é igual à soma algébrica das cargas dentro destas superfícies [10]. Portanto, considerando a cavidade como uma superfície gaussiana, pode-se igualar as Equações (2) e (5) e considerar que a carga induzida proposta por Pedersen pode ser calculada a partir da Lei de Gauss, ou seja.

$$q = \oint D \cdot dS \quad (7)$$

Para validar o modelo, simulou-se o problema proposto em [9] uma cavidade em um cabo de 20 kV com isolamento de polietileno (XLPE) cujos parâmetros geométricos são mostrados na Figura 4, onde  $r_i = 8,5$  mm,  $r_a = 14$  mm e  $r_c = 10$  mm e são respectivamente: o raio interno do condutor, o raio externo do condutor e a distância do centro da cavidade ao centro do condutor. Comparou-se o resultado da simulação com o resultado obtido pelo autor que usou a Equação (7).

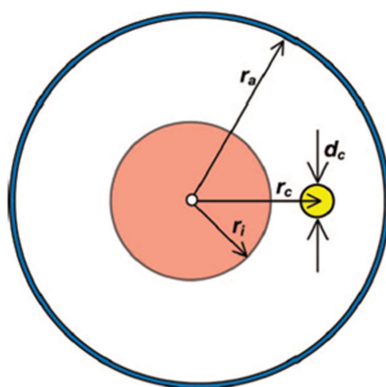


FIGURA 4 - Parâmetros Geométricos para modelo de cabo isolado com XLPE.

Fonte [9].

(7)

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

O resultado da comparação é mostrado na Figura 5. A partir do gráfico exibido na Figura 5, observa-se que a maior diferença se dá para valores menores de cavidade, para diâmetro de cavidade de 0,1 mm, há um erro de 4,2% entre o modelo e o calculado em [8], entretanto o erro médio é inferior a 2% e pode-se ver pelo gráfico que os valores de carga aparente do modelo e calculados por Lemke em [8] são praticamente os mesmos. Tais resultados levam a considerar o modelo proposto neste trabalho como validado.

O passo seguinte foi simular os defeitos tipo cavidade e delaminação para estimar o nível de DP para estes quando presentes em no sistema de isolamento de uma barra de gerador. Como citado anteriormente optpu-se por simular um trecho de barra de gerador, que no modelo é representado pelo domínio de simulação. Considerou-se o material do sistema de isolamento como sendo um compósito de resina de epoxy e papel de mica, cuja constante dielétrica é da ordem de 3,7.

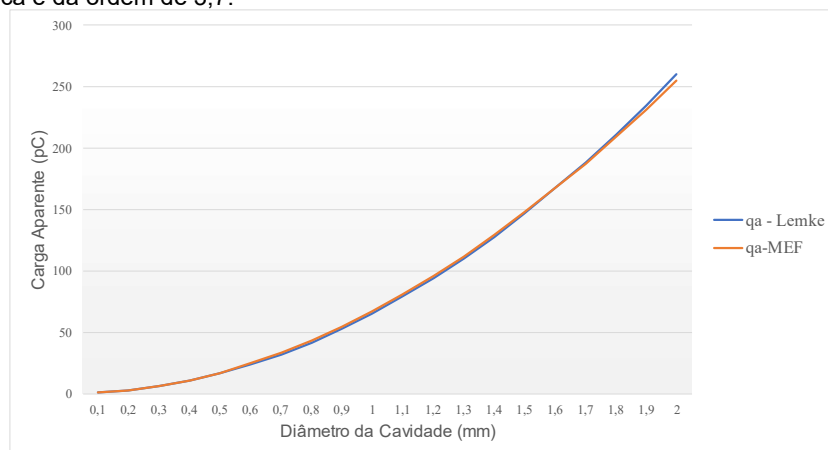


FIGURA 5- Comparação nível DP entre modelo e Equação (7).

As condições de fronteira aplicadas ao domínio de simulação foram as de Dirichlet (potencial imposto), uma que simulava o eletrodo vivo (barra do gerador) com um potencial de 8 kV aplicado e outra simulava o eletrodo de terra (ground wall). Os sinais de descargas parciais, após a ocorrência da descarga, viajam pela barra até sua extremidade, como descrito em [9], para simular esta situação, uma vez que o domínio de simulação é limitado, usou-se a condição de fronteira infinite element domain, disponível no COMSOL. Esta condição permite que domínios de simulação limitados sejam tratados como infinitos, maiores detalhes em [11]. Os defeitos simulados são mostrados nas Figuras 2 e 3.

A Figura 6 mostra a distribuição de campo antes e depois da ocorrência da DP. A Figura 6a mostra a situação

antes da DP, nela nota-se que o campo elétrico no interior da cavidade é superior ao externo, como era de se esperar em função da diferença de permissividades entre o material isolante e o ar. Já a Figura 6b mostra a distribuição de campo após a descarga. Nela observa-se uma elevação do campo tanto dentro como fora da cavidade causado pela migração de cargas para os eletrodos do sistema [1],[6].

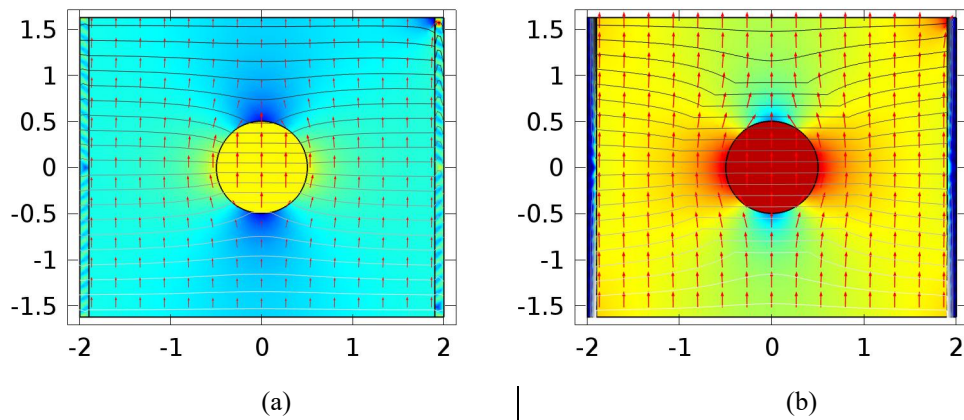


FIGURA 6- Distribuição de campo elétrico (a) antes da DP e (b) após a DP.

A Figura 7 mostra a evolução do nível de descarga parcial com o aumento da cavidade. Que como era de se esperar, aumenta com o aumento do diâmetro, pois quanto maior a cavidade, mantido o campo elétrico de grande intensidade, maior o espaço disponível para que os elétrons que formarão a avalanche terão para percorrer, ganhar velocidade, colidir com átomos neutros e produzir mais elétrons livres que alimentarão a avalanche e a manterão, possibilitando a ocorrência de descargas. 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 [12].

A Figura 8 mostra a distribuição de campo antes e depois da ocorrência da DP. A Figura 8a mostra a situação antes da DP, nela nota-se que o campo elétrico no interior da cavidade é superior ao externo, como no caso anterior, porém, quando se comparam as distribuições de campo elétrico antes e depois da ocorrência da descarga, nota-se que o campo interno à delaminação é superior ao da cavidade circular, assim como o campo externo ao defeito tem intensidade superior no caso da delaminação quando comparado à cavidade circular. Nota-se que após a descarga o surge um campo de intensidade bastante elevada, da ordem de 20 kV/mm, na extremidade da delaminação, ver Figura 9.

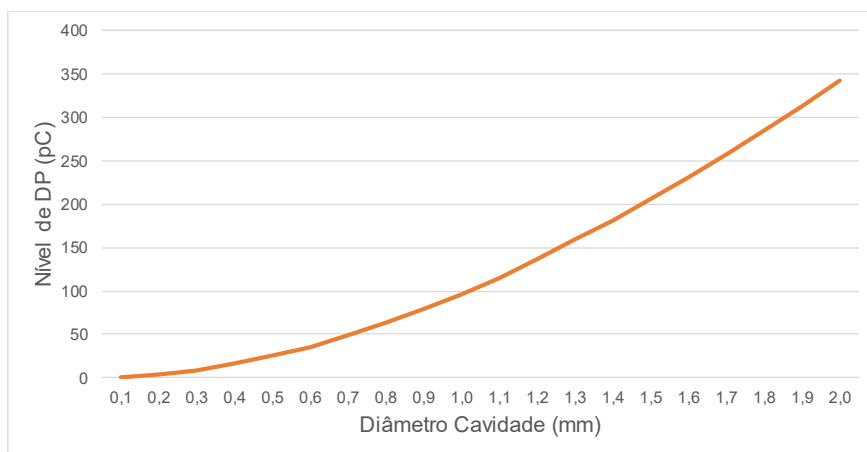


FIGURA 7- Evolução nível de DP com aumento do diâmetro da cavidade.

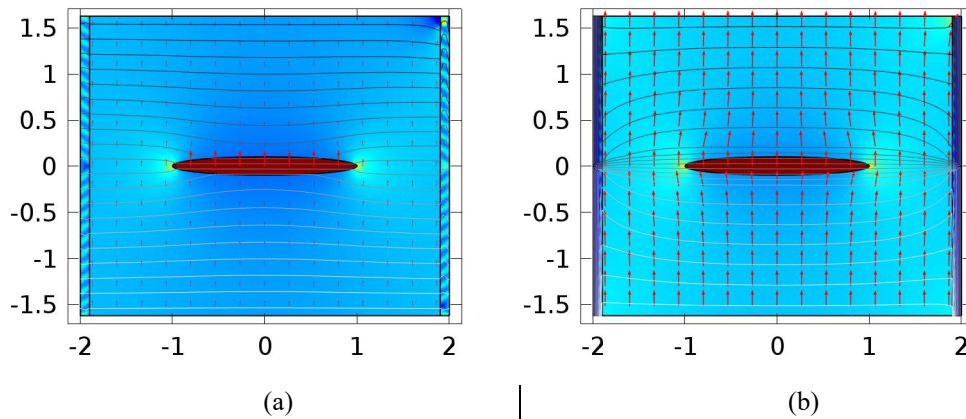


FIGURA 8- Distribuição de campo elétrico (a) antes da DP e (b) após a DP.

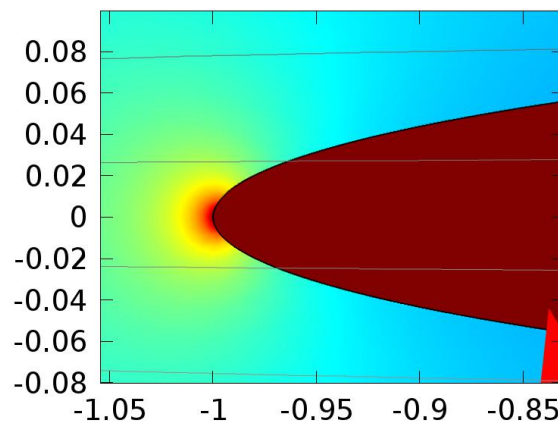


FIGURA 9- Distribuição de campo elétrico extremidade da delaminação após DP.

Na Figura 10 comparam-se os níveis de descarga parciais para os dois tipos de defeito, delaminação (curva vermelha) e cavidade (curva azul). Nota-se que para a maior parte dos valores de dimensão, o nível de DP para o defeito tipo cavidade é superior ao encontrado para a delaminação, sendo esta diferença, na média, de 23 pC. Tal diferença de valores pode ser atribuída, no caso do modelo à diferença de área dos dois defeitos. Como a carga envolvida pela superfície gaussiana é diretamente proporcional à área na Lei de Gauss, Equação (7), a tendência é de que a carga calculada para a cavidade seja maior que para a delaminação, que possui área menor. Tal situação também é corroborada pela física de descargas, uma vez que o caminho médio a ser percorrido pelo elétron a fim de produzir a avalanche e a área menor aumenta a densidade de portadores de cargas o que também dificulta a formação da avalanche de elétrons. Como a dimensão da delaminação é inferior à da cavidade na direção do campo, os elétrons que viajam na delaminação formarão menos elétrons livres que aqueles presentes na cavidade circular. Entretanto tal observação precisa ser comprovada em ensaio elétrico com alta tensão em modelos reais.

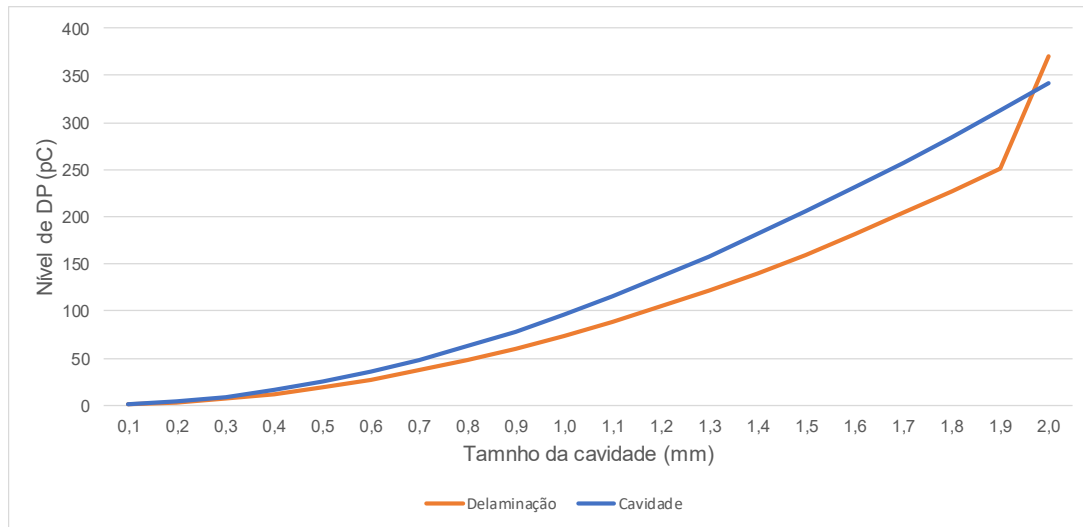


FIGURA 10- Comparação do nível de DP entre os defeitos tipo cavidade e delaminação.

#### 4.0 - CONCLUSÃO

Um modelo para simular defeitos geradores de descargas parciais no sistema de isolamento de hidrogeradores foi desenvolvido, baseado nisto, algumas conclusões podem ser tiradas. (i) O modelo para descargas parciais baseado na Teoria de Campo proposta por Pedersen foi capaz de estimar com boa precisão o nível de DP dos dois tipos de defeito e pode ser usado para estimar o estado da isolação de barras de geradores e outros equipamentos de alta tensão. (ii) O defeito tipo cavidade possui um nível de DP 23 pC maior, na média, que o defeito tipo delaminação. (iii) A diferença entre os níveis dos dois defeitos estudados se deve no caso do método à diferença entre as áreas dos defeitos, uma vez que pelo Teorema de Gauss, a carga envolvida pela superfície gaussiana é proporcional à área. Tal análise coaduna-se com o comportamento físico, pois o menor comprimento da delaminação e conseqüentemente a menor área, aumenta a densidade dos portadores de carga e reduz o caminho médio do elétron, situação esta que dificulta a formação da avalanche que dará origem à descarga. (iv) ensaios com modelos reais e alta tensão são necessários.

#### 5.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) PEDERSEN, Aage; CRICHTON, George C.; MCALLISTER, Iain Wilson. The theory and measurement of partial discharge transients. IEEE Transactions on Electrical Insulation, v. 26, n. 3, p. 487-497, 1991.
- (2) GULSKI, E. Knowledge Rules for Partial Discharge Diagnosis in Service. CIGRE, 2003.
- (3) High Voltage Test Techniques – Partial Discharge Measurements, IEC Standard 60270, 3rd ed.,2000.
- (4) NAIDU, Motukuru S. High voltage engineering. Tata McGraw-Hill Education, 2013.
- (5) PEDERSEN, Aage; CRICHTON, George C.; MCALLISTER, Iain Wilson. The theory and measurement of partial discharge transients. IEEE Transactions on Electrical Insulation, v. 26, n. 3, p. 487-497, 1991.
- (6) BARTNIKAS, R.; MCMAHON, Eugene Joseph (Ed.). Engineering dielectrics. ASTM International, 1987.
- (7) HUDON, Claude; BELEC, Mario. Partial discharge signal interpretation for generator diagnostics. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, v. 12, n. 2, p. 297-319, 2005.
- (8) LEMKE, E. A critical review of partial-discharge models. IEEE Electrical Insulation Magazine, v. 28, n. 6, 2012.
- (9) 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.
- (10) OATLEY, John; OATLEY, Charles William. Electric and magnetic fields. CUP Archive, 1976.
- (11) COMSOL, COMSOL Multiphysics reference manual, 2014.



(12) KUFFEL, John; KUFFEL, Peter. High voltage engineering fundamentals. Elsevier, 2000.

## 6.0 - AGRADECIMENTOS

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

## 7.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Reinaldo Corrêa Leite

Possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Pará (1990), mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Pará (2007) e doutorado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Pará (2017). Tem experiência na área de Engenharia Elétrica em empresas tais como ALBRAS, ALUMAR, ALUNORTE e Eletronorte, atualmente é professor adjunto da Faculdade de Engenharia Elétrica e Biomédica do Instituto de Tecnologia da Universidade Federal do Pará. com ênfase em ENSAIOS ELÉTRICOS COM ALTA TENSÃO, atuando principalmente nos seguintes temas: descargas parciais, métodos numéricos, sistemas de potência, compatibilidade eletromagnética e geradores.