

Simulação Computacional de Descargas Parciais Internas em Transformadores de Instrumentos por meio do Método dos Elementos Finitos

Juliano Silva Damiani
*Laboratório de Análise e Proteção de
Sistemas Elétricos (LAPES)*
Universidade Federal de Santa Maria
(UFSM)
Santa Maria, Brazil
julianodamiani02092000@gmail.com

Vinicius Signori Rahmeier
LAPES
UFSM
Santa Maria, Brazil
vinicius.rahmeier@acad.ufsm.br

Kaynan Maresch
LAPES
UFSM
Santa Maria, Brazil
kaynan_maresch@hotmail.com

Ghedy Cardoso Jr.
LAPES
UFSM
Santa Maria, Brazil
ghedy@ufsm.br

Aécio de Lima Oliveira
LAPES
UFSM
Santa Maria, Brazil
aecio.oliveira@ufsm.br

Luiz Fernando Freitas-Gutierrez
LAPES
UFSM
Santa Maria, Brazil
luiz.gutierrez@ufsm.br

Erick Finzi Martins
CPFL Transmissão
Porto Alegre, Brazil
erick.martins@cpfl.com.br

Herber Fontoura
CPFL Transmissão
Porto Alegre, Brazil
herber.fontoura@cpfl.com.br

Cristian Hans Correa
CPFL Transmissão
Porto Alegre, Brazil
cristian.correa@cpfl.com.br

Abstract—Este artigo apresenta uma análise de descargas parciais internas em transformadores de corrente e transformadores de potencial capacitivo, ambos de classe 525 kV. Utilizando o software ANSYS *Electronics* e o método dos elementos finitos, investiga-se a distribuição do potencial elétrico e do campo elétrico ao longo dos equipamentos. Os resultados obtidos revelam como essas distribuições impactam as atividades das descargas parciais, além de fornecerem informações cruciais para compreender a corrosão e o envelhecimento do material dielétrico dos transformadores. A visualização precisa dessas distribuições potencializa a compreensão dos mecanismos de degradação e os pontos críticos onde ocorrem as descargas parciais, permitindo uma avaliação mais precisa da vida útil e da confiabilidade dos transformadores.

Keywords—Descargas Parciais Internas, Transformador de Corrente, Transformador de Potencial, Método dos Elementos Finitos, ANSYS.

I. INTRODUÇÃO

Durante o processo de fabricação de equipamentos pequenas cavidades de ar ou vazios podem surgir no isolamento elétrico, levando a problemas graves a médio e longo prazos, como o colapso da estrutura dielétrica e ocorrências de Descargas Parciais (DPs).

Além disso, os incidentes de DPs também podem ser resultantes de danos ao equipamento durante o transporte e instalação, ou devido à deposição de poluição na superfície externa, à deterioração e ao envelhecimento do material isolante [1]. O surgimento de DPs internas, pode ocasionar defeitos incipientes com evolução gradual para falhas severas, acarretando interrupções no fornecimento de energia elétrica.

De acordo com o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) [2], foram registradas diversas explosões de Transformadores de Corrente (TCs) sem causa específica. Inclusive, o ONS montou uma equipe para estudos da vida útil de Transformadores de Instrumentos (TIs). Estes eventos de explosões de equipamentos recebem máxima atenção, pois causam indisponibilidade no fornecimento de energia elétrica, bem como perigo à integridade física dos funcionários que operam a subestação. Além disso, os TIs têm grande importância na proteção das subestações de energia elétrica, pois realizam a medição e enviam os dados de tensão e corrente para os relés de proteção, entregando confiabilidade ao sistema. O envelhecimento e a degradação do dielétrico nestes equipamentos pode ser consequência do surgimento de atividades de DPs [3].

Conforme o cenário exposto, o desenvolvimento de uma modelagem fidedigna de problemas que, rotineiramente ocorrem em dispositivos, possibilita um melhor entendimento do fenômeno, bem como favorecem a sua predição. Portanto, este trabalho tem a finalidade de realizar a modelagem de DPs internas em Transformadores de Corrente e Transformadores de Potencial (TP) por meio do uso das teorias de eletromagnetismo e do Método dos Elementos Finitos (MEF).

O artigo está estruturado de forma a facilitar a compreensão do estudo. A Seção II discute os aspectos teóricos relacionados às DPs, enquanto a Seção III aborda sucintamente o MEF. Em seguida, a Seção IV detalha a metodologia empregada para realizar as simulações. A Seção V apresenta os resultados obtidos e, por fim, a Seção VI destaca as principais conclusões do estudo desenvolvido.

II. DESCARGAS PARCIAIS INTERNAS

Conforme define a norma IEC 60270 [4], as DPs são descargas elétricas que rompem, parcialmente, a isolamento entre condutores, podendo ou não acontecer de maneira adjacente a um dos elementos condutivos.

Dentre os estágios de ocorrência de uma DP é possível salientar alguns processos principais, desde a formação de avalanche de elétrons até a ocorrência do rompimento completo do dielétrico. A Fig. 1 exemplifica o processo de formação e agravamento da DP em dielétricos.

Note que no Estágio III existe a degradação e corrosão da isolamento e, posteriormente, a formação da arborescência elétrica, característica típica de um agravamento de uma DP sustentada [3]. Por fim, existe o rompimento completo em que a isolamento está comprometida e pode existir a ocorrência de sinistros e, por conseguinte, a avaria no equipamento.

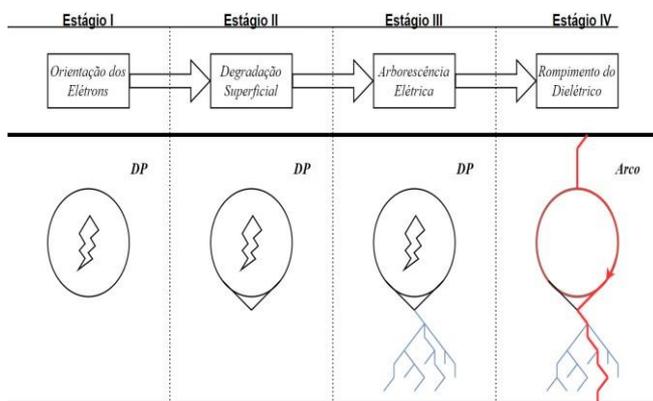


Fig. 1. Estágios de formação e desenvolvimento de uma descarga parcial.

Para se iniciar uma DP interna, o campo elétrico deve exceder um valor crítico e deve haver um valor inicial de elétrons livres para que ocasione a avalanche de elétrons [5]. Em consequência disso, pode existir uma descarga autossustentada. Os elétrons livres iniciais em uma cavidade com ocorrência de DPs são gerados a partir da emissão superficial das paredes da cavidade [6].

A análise das características das DPs fornece informações proeminentes a respeito da condição do isolamento. Entender a física e os conceitos que rodeiam o fenômeno da DP torna-se fundamental.

III. MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

Uma das possíveis abordagens para realizar análise do comportamento da DP interna é utilizar o MEF para representar o mundo físico.

Basicamente, o MEF é, em sua totalidade, um procedimento de subdivisões de um domínio geral, permitindo uma solução numérica através de equações diferenciais, dentro de uma condição de fronteira [7].

Em problemas de eletromagnetismo, este método divide o problema em diversas partes e aplicam-se equações diferenciais regidas pelas Equações de Maxwell. Desta forma, a resposta corresponde ao somatório das partes (sobreposição), conseguindo assim uma boa aproximação do comportamento real do problema [8].

A implementação 2D do cenário analisado, em relação ao 3D deve ser entendida. No mundo real, todas as estruturas são em 3D. Porém, o que ocorre é que 90% dos dispositivos elétricos apresentam uma distribuição de campos com tendência de simetria em apenas duas direções. Nestes casos, desenvolver o estudo apenas de uma seção do dispositivo já é o suficiente para fornecer com devida precisão todas as informações [9].

Outro ponto importante é quanto às condições de borda (fronteira). Sabendo que o MEF consiste de transformações dos sistemas de equações diferenciais, a obtenção da solução requer o estabelecimento das condições de contorno dos problemas.

A modelagem pelo MEF é especialmente importante, pois auxilia na avaliação do impacto do fenômeno de DPs quando variáveis como o raio do vazio, pressão e condutividade do ar variam, ou seja, quando existem multivariáveis a serem consideradas. Uma das grandes vantagens na modelagem por elementos finitos é a possibilidade de obter boa acurácia do modelo em relação ao cenário real, desde que as variáveis adequadas ao longo da simulação estejam condizentes com a realidade.

Uma das limitações deste tipo de modelagem é seu alto processamento de dados para uma malha de elementos finitos (malha “*mesh*”) muito complexa e discretizada. Dependendo da complexidade do problema, a malha de elementos finitos torna-se onerosa do ponto de vista computacional.

IV. METODOLOGIA

Este artigo aborda dois diferentes equipamentos de subestações de alta tensão de energia elétrica. As informações básicas dos equipamentos podem ser consultadas na Tabela I.

TABELA I. INFORMAÇÕES BÁSICAS DOS EQUIPAMENTOS ANALISADOS

Equipamento	V _{MÁX} (kV)	Temp. (°C)	Massa (kg)	Freq. (Hz)
TC	550	20 - 40	2150	60
TPC	550	20 - 45	830	60

Para a modelagem e desenho dos equipamentos, alguns elementos internos foram simplificados devido ao fato de apresentarem baixo impacto no campo elétrico efetivo no dispositivo. Estas simplificações visam otimizar a malha de elementos finitos, focando no ponto ao qual será inserido o vazio no dielétrico do equipamento.

Todas as simulações deste trabalho foram conduzidas e realizadas em duas unidades de processamento distintas, a saber:

- CPU#1: Processador AMD Ryzen 5 2600 Six-Core, 16 GB RAM;
- CPU#2: Processador AMD Ryzen 7 5700G, 32GBRAM.

Optou-se pelo uso do *software* de simulação ANSYS devido a sua gama de aplicações e soluções, sendo um *software* comercialmente aceito e conhecido. Além disso, foi escolhido abordar soluções tridimensionais dos equipamentos para obter uma vasta análise do comportamento do campo elétrico distribuído ao longo das estruturas analisadas. O fluxograma da Fig. 2, exemplifica o processo realizado para a simulação no *software* ANSYS.

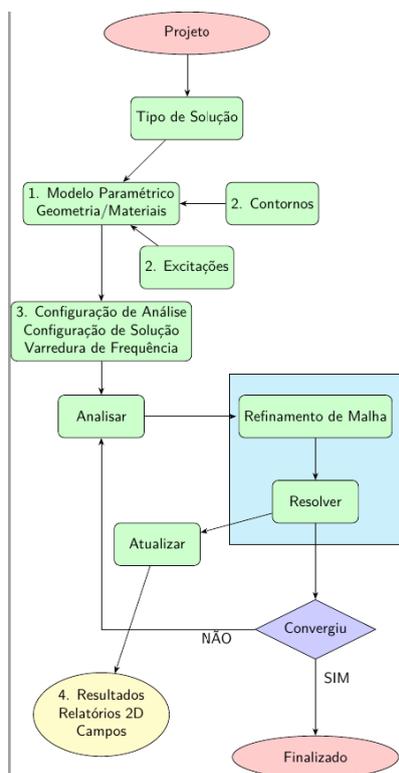


Fig. 2. Fluxograma básico de modelagem no ANSYS.

O fluxo começa com a fase de *design*, na qual são definidas as características iniciais do problema. Define-se o tipo de solução como sendo a eletrostática. Após, as condições de contorno são definidas. Esta variável está intrinsecamente ligada a discretização do domínio da simulação, definindo ao software qual a plenitude dos cálculos a serem realizados.

A condição de borda escolhida foi do tipo *Neumann*, em que o campo elétrico é tangente na borda. Basicamente, o fluxo não pode cruzar no limite de uma condição de *Neumann* [10]. Ademais, o tipo de borda *Natural* foi atribuída para as superfícies entre os dielétricos.

Para a definição e desenvolvimento da geometria foi realizada a construção do modelo geométrico no *software* SolidWorks e, posteriormente, importado para o ANSYS como um arquivo “.*dxf*”.

Para a escolha dos materiais do modelo, as permissividades relativas foram identificadas em catálogos de fornecedores de TIs, bem como na literatura técnica. A Tabela II apresenta os valores utilizados para a simulação [11].

TABELA II. VALORES UTILIZADOS NA SIMULAÇÃO

Material	Permissividade Relativa (ϵ_r)
Ar	1
Poliétileno Reticulado (XLPE)	2,3
Isolação de Óleo-Papel	3,7
Teflon	2,1
Borracha	3
Porcelana	5,2
Resina Epóxi	3,6

Com a formalização do modelo, configuram-se os parâmetros de simulação e análise (excitações, resultados, operações de malhas). Vale salientar que o *software* ANSYS realiza um processo de refinamento da malha para obter uma convergência da solução e, também, uma precisão dos resultados finais.

A implementação de cavidades na simulação em questão do fenômeno físico é causada pela formação de bolhas em virtude da evolução de gases, decorrente de descargas e evaporação de gotículas de água no interior do óleo.

Para estudar o fenômeno das DPs internas foram inseridas bolhas de ar ao longo da estrutura dielétrica do equipamento, focando nos pontos de maior impacto para a estrutura, onde a tensão é mais alta e, por conseguinte, são locais mais propensos a ocorrência de DPs.

Foram extraídas curvas referentes à distribuição do campo elétrico ao longo da estrutura analisada. Para isso, traçou-se uma linha de análise do campo no centro do equipamento que percorre todo o TI. Além disso, também foi verificada a distribuição da tensão ao longo do equipamento.

V. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na Fig. 3, observa-se a distribuição de tensão ao longo de um TC de 525 kV. A escala de cores indica a magnitude da tensão, variando do azul (tensões mais baixas) ao vermelho (tensões mais altas).

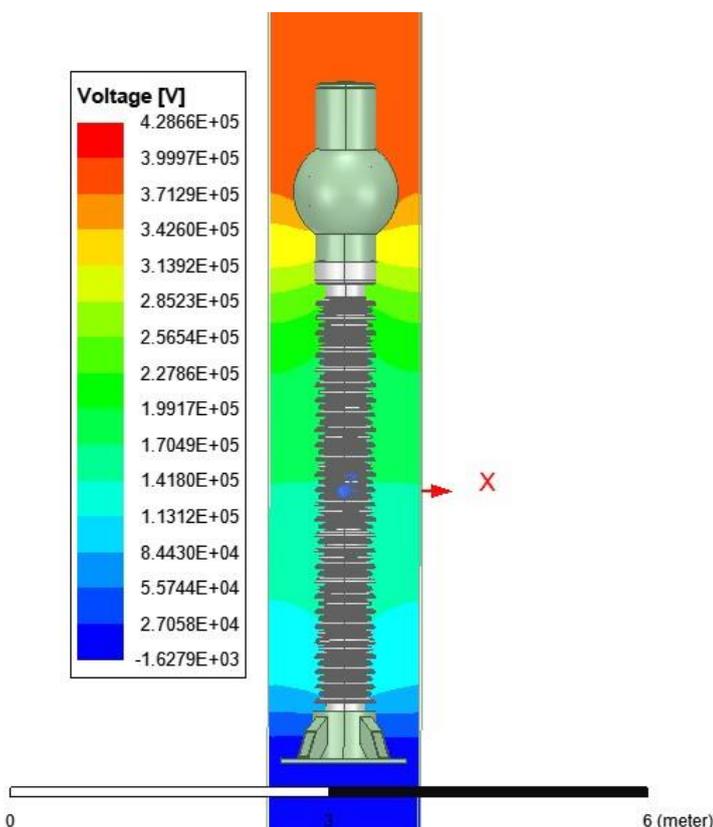


Fig. 3. Distribuição do potencial elétrico do TC.

O perfil de tensão é caracterizado por uma região inferior, próxima à base do TC, de baixa intensidade de tensão. Já a partir da região localizada na metade de sua altura, a tensão aumenta gradualmente. A região superior do equipamento atinge os valores máximos de tensão, por conseguinte, há uma maior área de estresse elétrico. Assim, realizar estudos de DP neste entorno torna-se foco crítico deste trabalho.

A Fig. 4, ilustra a distribuição da tensão no TPC classe 525 kV. Estes estudos permitem a identificação de potenciais pontos de falha e o *design* de isolamentos adequados para evitar falhas nos equipamentos.

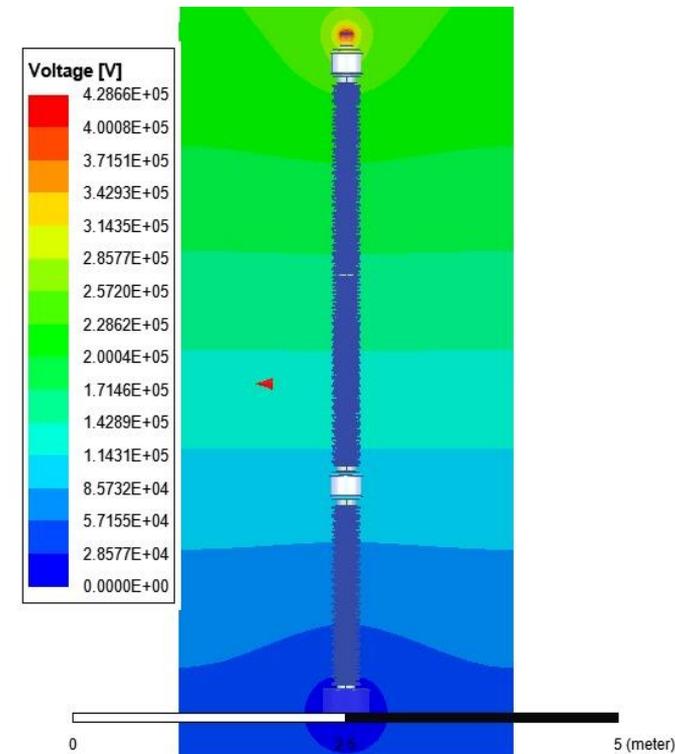


Fig. 4. Distribuição do potencial elétrico do TPC.

A Fig. 5 ilustra as curvas extraídas referentes à distribuição do campo elétrico ao longo das simulações com a aplicação de vazios/cavidades (“voids”) de ar no óleo do cabeçote do TC.

O gráfico demonstra que a magnitude das DP está diretamente relacionada ao tamanho das cavidades presentes no isolamento do cabo. Observa-se um aumento significativo no nível de DP na medida que o diâmetro do vazio é elevado.

Esse comportamento é coerente com os modelos teóricos de desenvolvimento de descargas, pois cavidades maiores proporcionam um espaço físico mais extenso para a aceleração e colisão de elétrons, intensificando o processo de ionização e, conseqüentemente, a magnitude da descarga[12].

É importante ressaltar que, em cavidades menores, a probabilidade dos elétrons serem absorvidos pela parede da cavidade (cátodo) antes de atingir energia suficiente para ionizar outros átomos é maior. Esse mecanismo limita o desenvolvimento da avalanche e, conseqüentemente, atenua a intensidade das DP [13].

Por fim, a Fig. 6 ilustra a distribuição do campo elétrico ao longo do TPC. Observa-se a presença de vários picos ao longo do gráfico, atribuídos às mudanças de material devido às associações de capacitores modelados no TPC. Esses picos refletem as variações no campo elétrico resultantes das interfaces entre diferentes materiais, logo, diferentes permissividades.

No cenário específico analisado, a DP interna foi introduzida imediatamente abaixo da primeira coluna de capacitores do TPC no primeiro caso. Já no caso referente à segunda curva foi imposta uma dupla cavidade, mantendo a primeira e inserindo outra imediatamente abaixo da segunda coluna de capacitores. A análise revela que, apesar da presença de múltiplos picos de campo elétrico, não houve mudanças significativas no estresse elétrico. Isso indica que o campo elétrico no vazio modelado não apresentou grandes atividades de DP, sugerindo uma menor propensão a falhas por DP neste ponto específico do TPC.

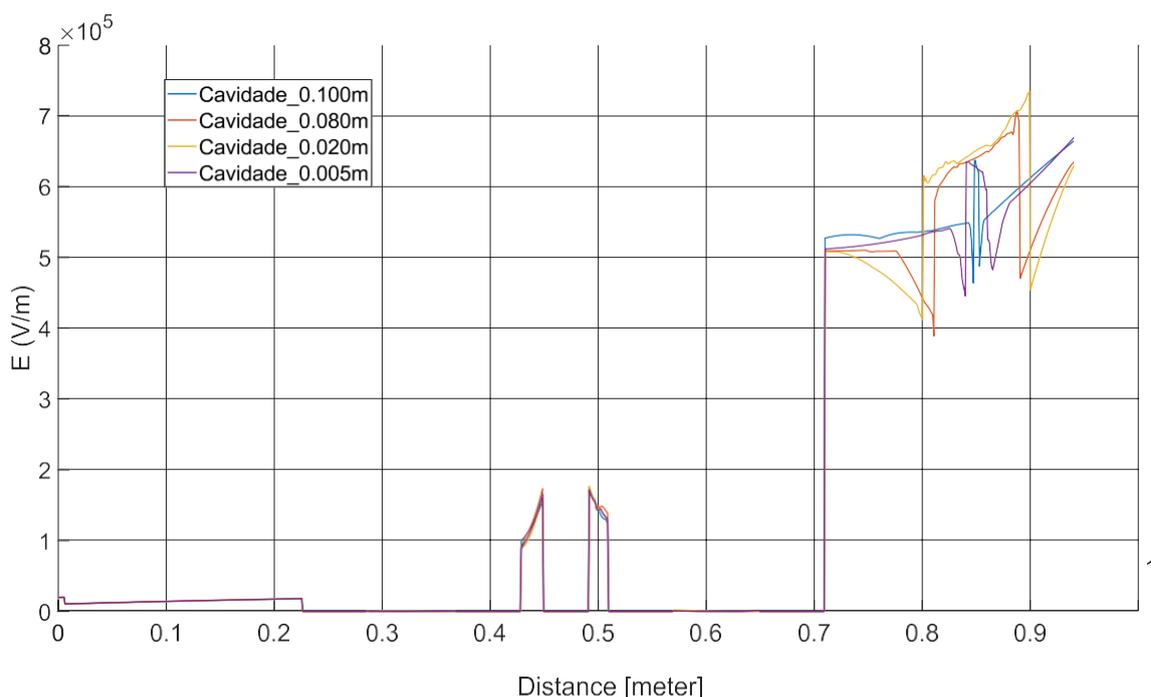


Fig. 5. Distribuição do campo elétrico para diferentes DP's internas.

Este comportamento reforça a confiabilidade do TPC em aplicações de alta tensão, em que a distribuição do campo elétrico e a mitigação de DPs são cruciais para a segurança. Além disso, os vazios podem demonstrar avanços e aumento no seu tamanho com o desenvolver das DPs, isso não foi levado em conta nas simulações.

VI. CONCLUSÃO

As implicações práticas desta observação ressaltam a importância de identificar e caracterizar cavidades em sistemas de alta tensão para prevenir falhas prematuras, permitindo a adoção de medidas preventivas e garantindo a confiabilidade do sistema elétrico. A análise detalhada desses dados contribui significativamente para o avanço do conhecimento na área e pode auxiliar no desenvolvimento de novas técnicas de diagnóstico e manutenção de sistemas elétricos de potência. Além disso, a análise comparativa com outros tipos de transformadores proporciona uma visão abrangente sobre o desempenho dos diferentes dispositivos sob condições operacionais variadas, destacando os pontos críticos e as áreas de melhoria para cada tipo de equipamento. A principal contribuição é fornecer um estudo e uma análise prévia da susceptibilidade de atividades de DPs em pontos específicos de TIs.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico do Setor Elétrico, regulamentado pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), por promover e viabilizar o projeto PD-05785-2107/2021 – DE2107: Desenvolvimento de Metodologia para Avaliação da Degradação da Isolação de Transformadores de Instrumentos e Para-Raios Energizados por meio da Medição Ultrassônica de Descargas Parciais, executado pelo Laboratório de Análise e Proteção de Sistemas Elétricos (LAPES) da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) em parceria com a CPFL Transmissão. Este estudo foi financiado, parcialmente, pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES/PROEX) – Código de Financiamento 001.

REFERENCES

[1] V. B. Rathod, G. B. Kumbhar, and B. R. Bhalja, “Partial Discharge Detection and Localization in Power Transformers based on Acoustic Emission: Theory, Methods, and Recent Trends,” 2022, *Taylor and Francis Ltd.* doi: 10.1080/02564602.2021.1871672.

- [2] ONS. ABRATE, “Requerimento administrativo - Explosões de TC,” Superintendência de Regulação dos Serviços de Transmissão – SRT. Accessed: Jul. 21, 2024. [Online]. Available: https://www2.aneel.gov.br/cedoc/adsp20192297_1.pdf
- [3] T. Tanaka, “INTERNAL PARTIAL DISCHARGE AND MATERIAL DEGRADATION,” 1986.
- [4] IEC 60270, “High-voltage test techniques - Partial discharge measurements,” International Electrotechnical Commission, pp. 1–226, 2015.
- [5] C. Pan, G. Chen, J. Tang, and K. Wu, “Numerical modeling of partial discharges in a solid dielectric-bounded cavity: A review,” *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 26, no. 3, pp. 981–1000, Jun. 2019, doi: 10.1109/tdei.2019.007945.
- [6] C. Forssen and H. Edin, “Partial discharges in a cavity at variable applied frequency part 1: measurements,” *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 15, no. 6, pp. 1601–1609, Dec. 2008, doi: 10.1109/TDEI.2008.4712663.
- [7] M. R. Ghasemzadeh, F. Faghihi, and S. B. Mozafari, “FEM analysis of elliptical void in insulator of GIS compartment based on electric field distribution,” *Electric Power Systems Research*, vol. 220, Jul. 2023, doi: 10.1016/j.epr.2023.109261.
- [8] J. A. Pedro Bastos and N. Sadowski, *Magnetic Materials and 3D Finite Element Modeling*, 1st ed. Boca Raton, FL: CRC Press, 2014.
- [9] J. R. Cardoso, *Electromagnetics through the finite element method A Simplified Approach Using Maxwell’s Equations*. CRC Press, 2017.
- [10] ANSYS, *Maxwell Help*, vol. 1. Ansys Electromagnetics Suite 2022 R1, 2022. [Online]. Available: <https://www.ansys.com>
- [11] M. A. Sahnoune, B. Zegnini, and T. Seghier, “Modeling Effects of Partial Discharge Void Geometry on Various Dielectrics,” in *2022 19th IEEE International Multi-Conference on Systems, Signals and Devices, SSD 2022*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2022, pp. 1836–1841. doi: 10.1109/SSD54932.2022.9955884.
- [12] R. C. Leite and F. M. Sarmento, “Modelagem de descargas parciais em cavidades no isolamento de barras de geradores usando a teoria de campo,” *Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica*, vol. 1, no. 1, pp. 1–9, 2019.
- [13] E. Kuffel, W. S. Zaengl, and J. Kuffel, *High voltage engineering: fundamentals*, vol. 1. Butterworth-Heinemann/Newnes, 2000.

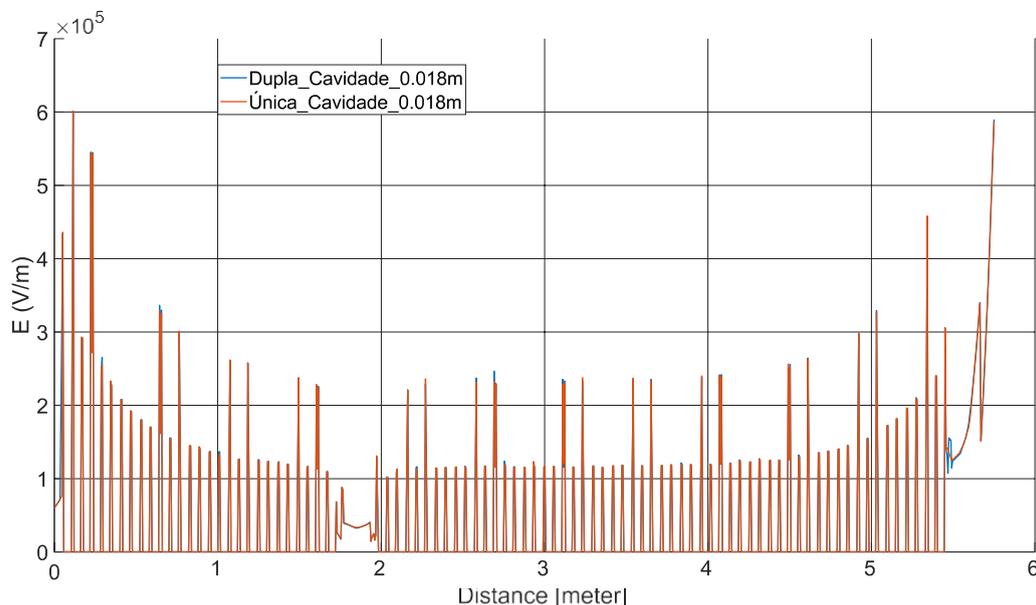


Fig. 6. Distribuição do campo elétrico ao longo do TPC.