

Análise de desempenho de para-raios de ZnO sob diversos cenários de poluição utilizando Método de Elementos Finitos

Mellina M. Lisboa*. João Henrique do R. Ribeiro*

Stephany Carla C. Costa*. William M. de Assis*.

Filipe Matheus do R. Menezes*. Antonio Roniel M. Sousa*. Marcus Vinicius A. Nunes*

**Laboratório de Alta e Extra-Alta Tensão, Universidade Federal do Pará, Belém, Brasil
(email: mellina.lisboa@itec.ufpa.br, joao.ribeiro@itec.ufpa.br, stephany.costa@itec.ufpa.br,
william.assis@itec.ufpa.br, filipe.menezes@itec.ufpa.br, roniel@ufpa.br, mvnan@ufpa.br)*

Abstract: Surge arresters are equipment of vital importance in the protection of electrical power systems, with the role of protecting transmission, distribution lines and electrical equipment in the face of atmospheric discharges, as well as maneuver surges in eventual maintenance, also reducing maintenance accidents. Thus, it is important to investigate the operating conditions of these equipment under different scenarios, whether under normal or polluted conditions. Therefore, a two-dimensional model of a 30 kV zinc oxide surge arrester was simulated, using the Finite Element Method, to obtain curves of the leakage current and the distributions of electric potential and electric field lines. The results show an increase in the quantities acquired as the level of pollution intensifies.

Resumo: Para-raios são equipamentos de vital importância em proteção de sistemas elétricos de potência, tendo como papel proteger linhas de transmissão, distribuição de energia e equipamentos elétricos diante de descargas atmosféricas, bem como surtos de manobra em eventuais manutenções, diminuindo também acidentes de manutenção. Desse modo, torna-se importante a investigação das condições de operação desses equipamentos sob diversos cenários, sejam em condições normais ou de poluição. Diante disso, um modelo bidimensional de um para-raios de Óxido de Zinco, de 30 kV, foi simulado, utilizando Método de Elementos Finitos, para obter curvas da corrente de fuga e as distribuições do potencial elétrico e a das linhas de campo elétrico. Os resultados mostram um aumento das grandezas adquiridas à medida que o nível de poluição se intensifica.

Keywords: Electric field; Leakage Current; Finite Element Method; Modeling; Surge Arrester; Electric Potential.

Palavras-chaves: Campo Elétrico; Corrente de Fuga; Método de Elementos Finitos; Modelagem; Para-raios; Potencial Elétrico.

1. INTRODUÇÃO

Para-raios são equipamentos de proteção que reduzem o nível de sobretensão, provenientes de descargas atmosféricas e/ou surtos de manobra, a valores compatíveis com a suportabilidade dos equipamentos instalados em sistemas de distribuição e transmissão de energia, agindo como medida de proteção dos mesmos (Araújo, 2013). Sem esses dispositivos, as sobretensões podem provocar a ruptura do dielétrico e, como resultado, a perda do patrimônio, danos pessoais e ao meio ambiente e às instalações (Castro, 2013).

O para-raios é responsável por proporcionar um caminho condutivo de baixa impedância de surto entre fase e terra. Em condições normais de operação, essa impedância é suficientemente elevada para atuar como um circuito aberto e, assim, permanecer até o para-raios ser atingido por uma sobretensão (Mardira et al., 1999).

Dada a importância deste equipamento de proteção nos sistemas elétricos de potência, torna-se necessária a

investigação a respeito do desempenho do mesmo afim de se prevenir possíveis falhas, as quais podem resultar e transtornos tanto para a indústria quanto para o estado (Alves, 2008). Essa investigação normalmente é realizada em campo, laboratório ou por meio de modelagem computacionais, utilizando métodos matemáticos, como, por exemplo, o Método de Elementos de Finitos (Latiff, 2016).

Diante disso, o presente trabalho apresenta uma metodologia de investigação de condições de operação do para-raios de ZnO mediante à quatro situações: limpo, sob poluição leve e alta e sob gotículas de água através de uma modelagem computacional, em 2D, realizada no software COMSOL Multiphysics®, utilizando Método de Elementos Finitos. O comportamento do para-raios será analisado por meio da quantificação da distribuição do potencial elétrico, do campo elétrico e da corrente de fuga.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Método de Elementos Finitos

O Método de Elementos Finitos (MEF) consiste em fazer uma análise matemática por meio da discretização de um meio contínuo em pequenos elementos, mantendo as mesmas propriedades do meio original (Sadiku, 2004). Esses elementos são descritos por equações diferenciais e resolvidos por modelos matemáticos, para que sejam obtidos os resultados desejados.

Para a aplicação do MEF, o modelo a ser simulado deve estar bem caracterizado de acordo com as condições particulares de cada material preservando suas características geométricas e físicas, além das condições de fronteira ou, em alguns casos limite, devem ser bem estabelecidas. A partir disto, o método decompõe a estrutura ou domínio em um número finito de elementos (Florentino, 2015). A união completa de todos os elementos discretizados é conhecida como malha, onde cada elemento desta malha assume as características físicas do domínio contínuo.

Atualmente, algoritmos sofisticados adaptam automaticamente o número, tipo, tamanho e disposição dos elementos para melhor solução. Um exemplo de aplicação seria a utilização do *Software COMSOL Multiphysics®*, que por sua vez, permite a utilização do MEF necessário para a modelagem apresentada neste trabalho.

O MEF tem sido amplamente empregado e apresenta resultados de fácil visualização e interpretação, independentemente da complexidade do problema analisado. Devido às suas características de flexibilidade e de estabilidade numérica, pode ser implementado na forma de um sistema computacional de forma consistente e sistemática.

Além de permitir a análise de problemas práticos, o MEF diminui os custos de projeto, pois permite a simulação computacional de vários fenômenos físicos e seus efeitos antes da construção de um protótipo do equipamento, proporcionando, assim, a viabilidade e durabilidade desses equipamentos, o que acentua a confiabilidade desses produtos.

3. METODOLOGIA

Esta seção descreve em detalhes a modelagem do para-raios de ZnO, de 30 kV, sob diferentes condições de operação: limpo; poluição leve e média; e com gotas de água, com uma tensão de 24,4 kV, a 60 Hz, aplicada em seu terminal. Serão realizadas análises do potencial e campo elétrico, e corrente de fuga total utilizando Método de Elementos Finitos. As dimensões e parâmetros do para-raios utilizados neste trabalho são mostrados na Tabela 1.

Tabela 1. Dimensões e parâmetros do para-raios.

Característica	Dado
Tensão Nominal	30,0 kV
Tensão de Operação Contínua	24,4 kV
Corrente nominal de descarga, I_n 8/20 us	10 kA
Distância de escoamento	660 mm
Altura	300 mm
Número de saias	8
Material do Invólucro	Silicone

3.1 Modelagem do para-raios

O para-raios de 30 kV é, inicialmente, modelado em 2D no *software* AutoCAD® e exportado para *software* COMSOL Multiphysics® utilizando o módulo Electric Current, como é mostrado na Fig.1. O para-raios é composto por cinco blocos de ZnO, uma camada de vidro entre o invólucro de silicone e as pastilhas de ZnO e uma capsula de alumínio em cada extremidade. Toda a geometria do equipamento foi simulada sob uma camada de ar. As medidas de cada parte citada são explicitadas pela Tabela 2.

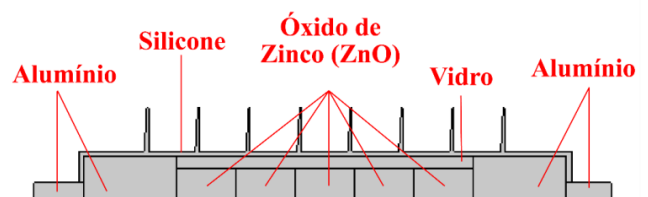


Fig. 1 Modelo de para-raios axissimétrico 2D no software Comsol

A permissividade relativa e a condutividade elétrica dos materiais escolhidos para compor a geometria do para-raios e das poluições aplicadas são mostrados na Tabela 2. Dado que o disco de ZnO possuem características não-lineares, a condutividade deste foi escolhida de acordo com a sua curva característica V-I, mostrada na Fig. 2, de modo que a condutividade está diretamente relacionada à tensão.

Tabela 2. Permissividade relativa e condutividade elétrica dos materiais.

Material	Permissividade Relativa, ϵ_r	Condutividade Elétrica, σ (S/m)
Ar ^(A)	1	0
Silicone ^(A)	11.7	1×10^{-12}
Alumínio ^(A)	1	3.77×10^7
Vidro ^(A)	4.2	1×10^{-14}
ZnO	300	Curva V-I
Gotas de Água ^(B)	81	180×10^{-6}
Poluição Leve ^(C)	15	1×10^{-6}
Poluição Alta ^(C)	15	1×10^{-5}

Fonte: (A) Latiff et al (2018), (B) Aoubed (2018) e (C) Dias (2019)

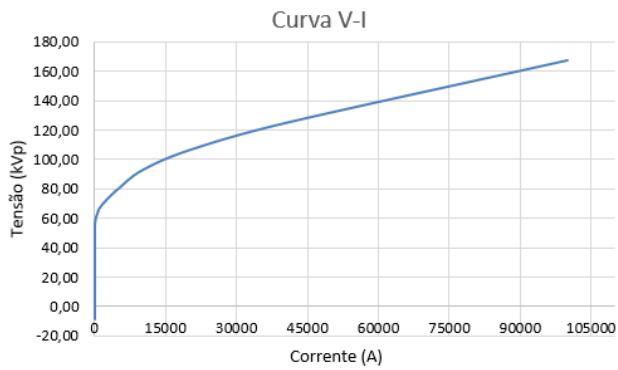


Fig. 2. Curva característica V-I do ZnO

No módulo de corrente elétrica do Comsol, obtém-se a distribuição do campo elétrico e a densidade de corrente no para-raios; assim, a corrente de fuga é dada pela integração desta última. As equações utilizadas pelo software de método de MEF são definidas por (1), (2) e (3),

$$\nabla \cdot J = Q_f \quad (1)$$

$$J = (\sigma + \epsilon_0 \epsilon_r \cdot \partial / \partial t) E \quad (2)$$

$$E = -\nabla V \quad (3)$$

de modo que o J é a densidade de corrente, Q_f é a fonte de corrente, ϵ_r e σ são, respectivamente, a permissividade relativa e a condutividade elétrica do material, ϵ_0 é a permissividade do vácuo, E é o campo elétrico, J_e é a densidade de corrente gerada externamente e V , o potencial elétrico.

A Fig. 3 e Fig. 4 mostram, respectivamente, a discretização e os limites de contorno da geométrica. Enquanto a Tabela 3 apresenta as condições de contorno.

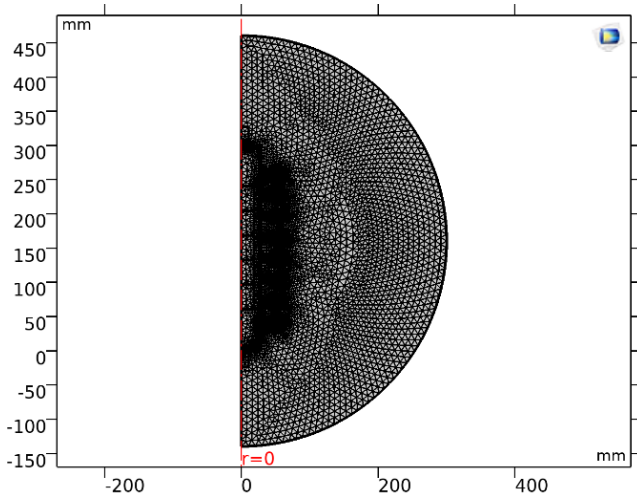


Fig. 3 Malha de discretização da geometria

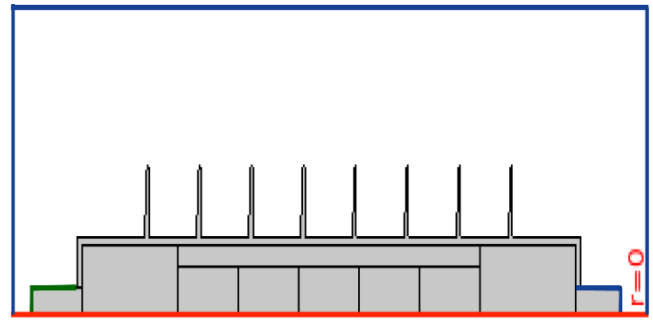


Fig. 4 Limites de contorno da geometria

Tabela 3. Condições de contorno.

Linha de Contorno	Condição de Contorno	Descrição
Azul	Azul	Terminal aterrado e contorno do ar
Verde	Verde	Contorno de tensão aplicada
Preto	Preto	Contorno internos e externo
Vermelho	Vermelho	Contorno ao longo do eixo r=0

3.2 Poluição e gotas de água

Para simular os cenários de poluições, foi aplicada uma camada uniforme sobre a superfície do para-raios, de 2 mm de espessura. E para a condição de gotas de água, foram distribuídas tanto no corpo quanto nas saias do equipamento uma camada de gotículas de 3mm de diâmetro, a uma distância de 2mm entre cada gota. Ambas as geometrias podem ser vistas nas Fig. 5 e 6, respectivamente.

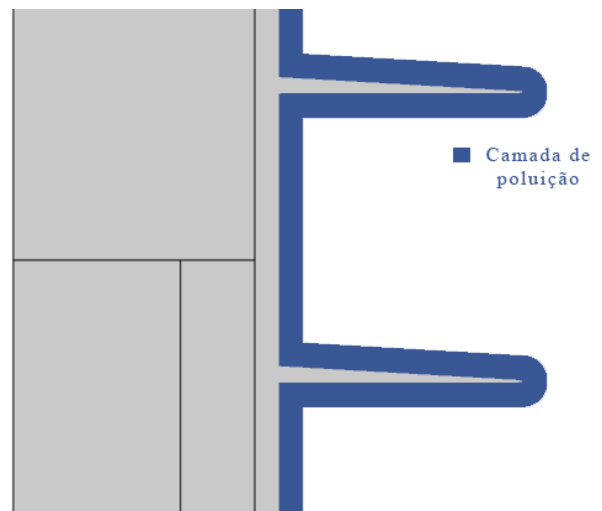


Fig. 5 Camada de poluição sobre a superfície do para-raios

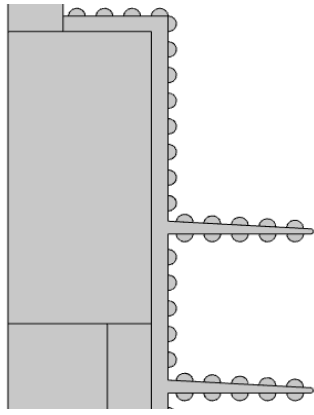


Fig. 6 Camada de gotículas de água sobre a superfície do para-raios

4. RESULTADOS

Nesta seção são apresentados os resultados das simulações e da modelagem do para-raios mediante às três condições de operação modeladas (limpo, poluído e sob gotículas de água): a corrente de fuga, distribuição do potencial elétrico e das linhas de campo elétrico quando sujeito à aplicação da tensão igual a 24,4 kV em frequência industrial.

4.1 Distribuição do Potencial Elétrico

Na Fig. 7, é apresentada distribuição do Potencial Elétrico em toda a geometria do para-raios na condição limpa, no instante de tempo igual a 105 ms. Nota-se que no terminal superior, onde a tensão é aplicada, há uma alta concentração de potencial elétrico. Mas, ao longo do para-raios, em direção ao terminal inferior aterrado, a concentração reduz.

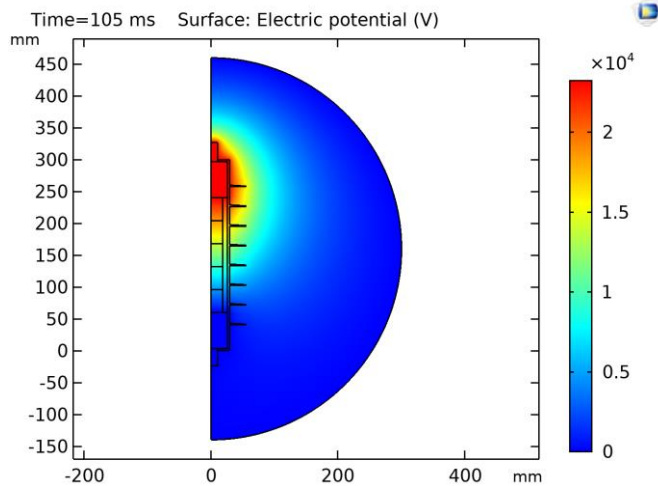


Fig. 7 Distribuição do potencial elétrico ao longo do para-raios limpo.

As Fig. 8, 9 e 10 mostram a distribuição do potencial elétrico no para-raios sob as condições de gotas de água e de poluição leve e alta, respectivamente. A partir das três condições, observa-se o aumento da concentração do potencial nas saias do equipamento quando comparadas ao para-raios limpo; tal cenário ocorre devido às camadas de poluições que detém uma condutividade elétrica maior que o invólucro do mesmo.

Uma vez que há a modificação da rigidez dielétrica do meio, obtém-se uma distribuição desigual do potencial elétrico. Além disso, quanto maiores são os níveis de poluição no supressor de surto, maior será a distribuição irregular do potencial elétrico gerada, produzindo campos elétricos elevados e, por consequência, descargas parciais (LIRA, 2012).

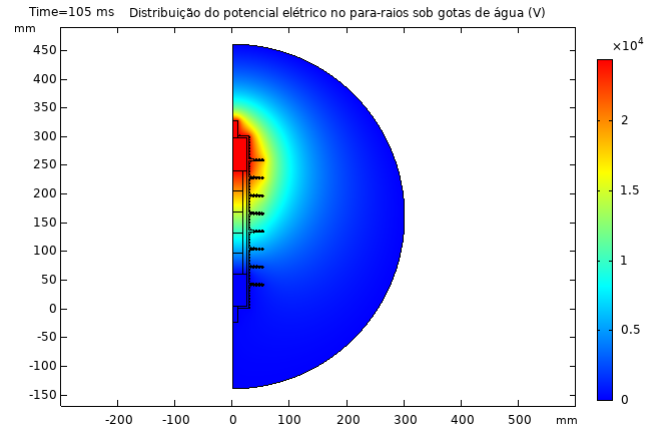


Fig. 8 Distribuição do potencial elétrico ao longo do para-raios sob gotas de água.

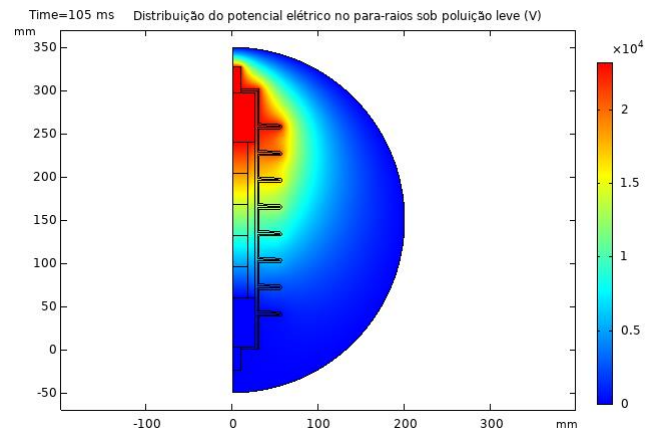


Fig. 9 Distribuição do potencial elétrico ao longo do para-raios sob poluição leve.

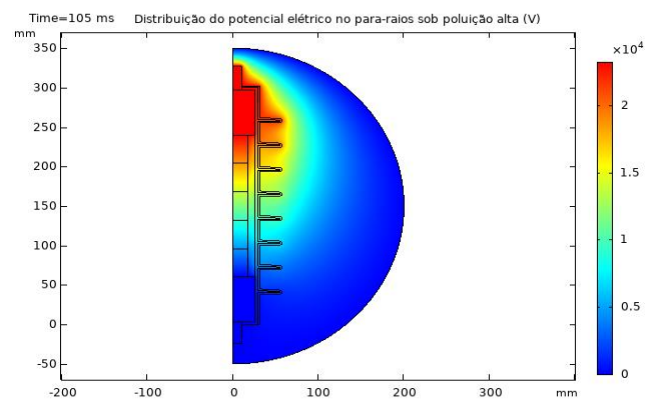


Fig. 10 Distribuição do potencial elétrico ao longo do para-raios sob poluição alta.

4.2 Linhas de Campo Elétrico

A variação da distribuição de campo elétrico no para-raios limpo, sob gotas de água e poluições leve e alta, pode ser visualizada, conforme apresentado na Fig. 11, 12, 13 e 14. Com o aumento no nível de poluição, o campo elétrico se torna mais intenso ao longo do para-raios devido ao aumento de condutividade na superfície do equipamento.

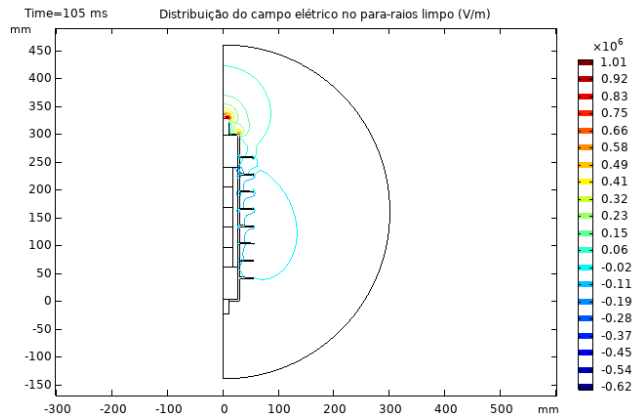


Fig. 11 Distribuição do campo elétrico no para-raios limpo.

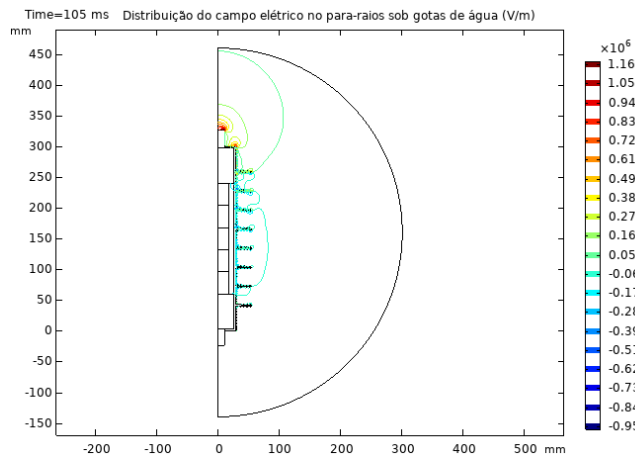


Fig. 12 Distribuição do campo elétrico no para-raios sob gotas de água

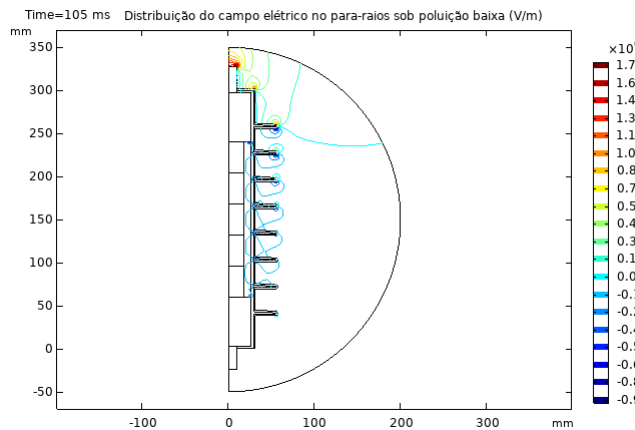


Fig. 13 Distribuição do campo elétrico no para-raios sob poluição leve

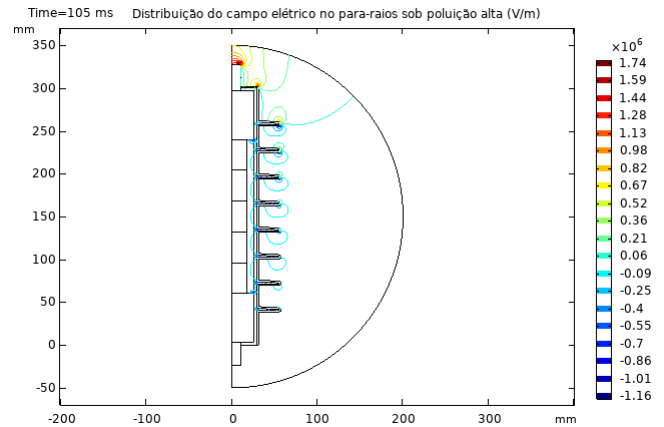


Fig. 14 Distribuição do campo elétrico no para-raios sob poluição alta

Percebe-se que a magnitude do campo elétrico é mais intensa no terminal superior do para-raios devido ao alto nível de tensão aplicada.

Há também uma grande concentração de linhas campo elétrico nas extremidades das saias poliméricas. Essas ocorrências são provenientes das características elétricas dos materiais utilizados, da geometria do para-raios e aumento do nível de condutividade na superfície deste.

Essa intensa concentração de linhas de campos elétrico, à medida que a condutividade de cada cenário de poluição é acentuada, pode acarretar no desgaste da isolamento do equipamento e, por consequência, comprometer o seu desempenho.

4.3 Corrente de Fuga

A forma de onda da corrente de fuga do para-raios limpo, adquirida por meio da simulação, pode ser vista na Fig. 15, de modo que o valor máximo identificado foi igual a 0.682 mA.

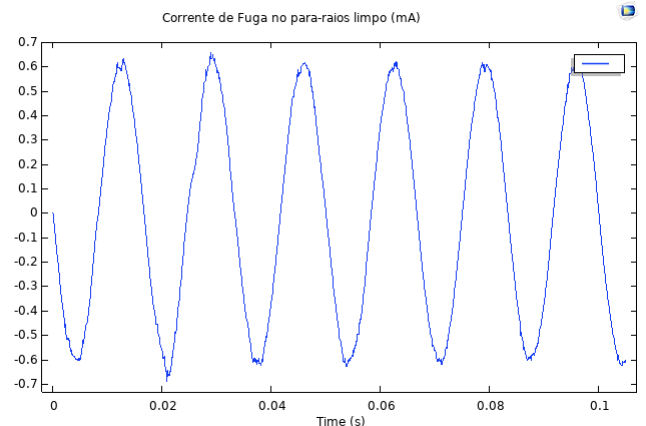


Fig. 15 Forma de onda da corrente de fuga no para-raios limpo.

As Fig. 16, 17 e 18 mostram as formas de onda das correntes de fuga no para-raios sob as condições de gotas de água e de poluição leve e alta, respectivamente; os valores medidos

para tais casos são, nessa ordem: 0.902 mA, 0.848 mA e 0.905 mA

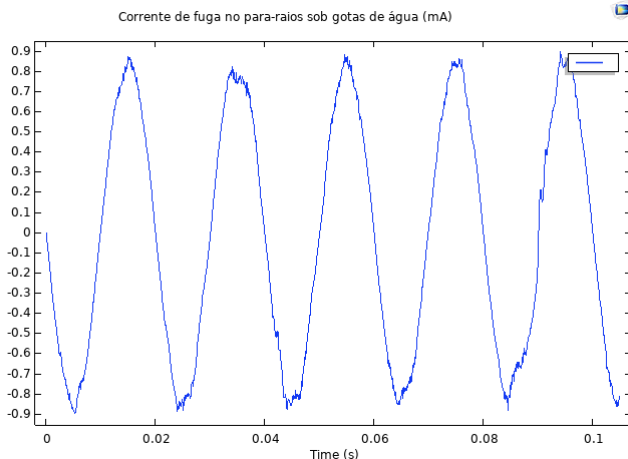


Fig. 16 Forma de onda da corrente de fuga no para-raios sob gotas de água.

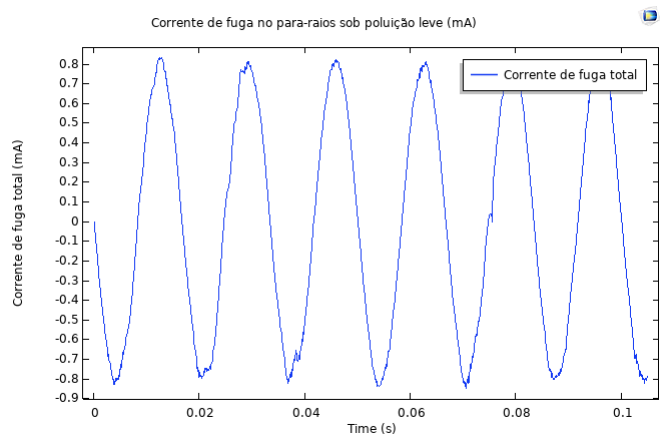


Fig. 17 Forma de onda da corrente de fuga no para-raios sob poluição leve

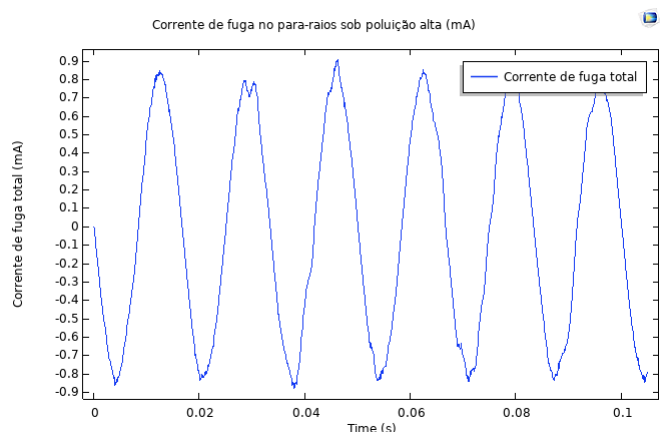


Fig. 18 Forma de onda da corrente de fuga no para-raios sob poluição alta

A elevação dos valores de corrente de fuga ocorre em função da condutividade da superfície poluída. Essa camada condutiva promove um caminho de fácil fluidez da corrente no corpo do para-raios. Dessa forma, o alto nível dessa

grandeza física é um dos fatores que fornece um diagnóstico apropriado do estado operativo do varistor.

6. CONCLUSÕES

Neste artigo, a corrente de fuga total, o potencial elétrico e o campo elétrico foram avaliados e, conseqüentemente, a eficiência do para-raios sob diferentes níveis de poluição e gotas de água. As simulações foram realizadas em uma geometria em 2D do dispositivo no COMSOL Multiphysics, o qual utiliza o Método dos Elementos Finitos. A incidência da poluição e das gotas de água foi modelada por meio da inserção de uma camada condutiva sobre a superfície dos para-raios, variando parâmetros de condutividade e permissividade.

A partir dos resultados adquiridos, observou-se que as gotículas de água e os níveis de poluição alteram o comportamento elétrico do para-raios, o que é refletido no aumento da concentração do potencial elétrico e do campo elétrico, principalmente, nas saias do para-raios. No que se refere à corrente de fuga, notou-se também uma elevação nos níveis desta, o que pode implicar em perdas consideráveis no desempenho do dispositivo.

Pode-se afirmar que, mesmo aplicando diversos níveis de poluição inseridas sobre o invólucro do para-raios, não foram identificados danos às partilhas de ZnO. Dessa forma, pretende-se verificar, nos próximos trabalhos, as poluições geradas dentro do invólucro e analisar o desempenho do para-raios em relação sua corrente de referência.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, PPGEE, e à Capes, Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, por proporcionar fomentos para a realização dessa pesquisa.

REFERÊNCIAS

- Alves, R. C. Diagnósticos de Falhas em Para-raios utilizando Termografia. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.
- Aoubed, F., Bayadi, A., Rahmani, A. E. e Boudissa, R. Finite element modelling of electric field and voltage distribution on a silicone insulating surface covered with water droplets, in IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 25, no. 2, pp. 413-420, April 2018.
- Araújo, M. A. Estudo de metodologia para modelagem e simulação de tensões induzidas de origem atmosférica em linhas de distribuição protegidas por para-raios de ZnO. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013.
- CASTRO, W. S. Posicionamento Ótimo de Para-raios em Linhas de Transmissão. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013.
- Dias, B., Costa, E., Diniz, L., Leite Neto, A., Rocha, J., & Moreno, V. (2019). Análise comparativa do desempenho elétrico de isoladores tipo pino sob diferentes condições de poluição. Revista Principia - Divulgação Científica e Tecnológica do IFPB, 1(47), 160-171.

- Florentino, M. T. B. Análise de sensibilidade do Método dos vetores de energia dos centroides das Sub-bandas espectrais aplicado ao monitoramento de Isoladores poliméricos. 2015. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2015.
- Latiff, N.A.A.; Illias, H.A.; Bakar, A.H.A.; Dabbak, S.Z.A. Measurement and Modelling of Leakage Current Behaviour in ZnO Surge Arresters under Various Applied Voltage Amplitudes and Pollution Conditions. *Energies* 2018, 11, 875.
- Latiff, N. A. A., Illias, H. A., & Bakar, A. H. A. (2016). Condition monitoring of discharged ZnO surge arrester on temperature distribution under various design conditions. 2016 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (CMD).
- Lira, G. R. S. Monitoramento de para-raios de óxido de zinco com base na medição da corrente de fuga total. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2012
- Mardira, K., Darveniza, M., And Saha, K. (1999). A new monitoring system for metal oxide surge arrester. Eleventh International Symposium on High Voltage Engineering, UK.
- Sadiku, M. N. O. Elementos de eletromagnetismo, 3. ed. Porto Alegre: Bookman, 2004.