

Simulação de um Sistema de Aterramento Submetido a Impulsos de Corrente Utilizando o COMSOL *Multiphysics*

M. F. B. R. Gonçalves^{1*}; E. G. da Costa¹; R. C. S. Freire¹; J. M. C. L. da Silva¹; F. J. L. Araújo¹; J. R. L. Filho²

¹Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica–PPgEE

¹Universidade Federal de Campina Grande – UFCG

²Eletrobras Distribuição Piauí - EDPI

Campina Grande, Brasil

*marconnifbrg@gmail.com

Resumo—Este trabalho tem como objetivo geral avaliar a simulação computacional de um sistema de aterramento quando submetido a um impulso de corrente elétrica utilizando o software COMSOL *Multiphysics*®. Para tanto, uma corrente impulsiva de 8/20 μ s é aplicada em um sistema de aterramento composto de uma haste envolvida verticalmente pelo solo e pelo ar. Dessa forma, os efeitos provocados pela passagem da corrente no sistema de aterramento foram determinados a partir do software, que utiliza o método dos elementos finitos para a solução do conjunto de equações que regem o sistema. Foram geradas imagens da variação da densidade de corrente, do potencial e do campo elétrico no sistema de aterramento, mostrando a ocorrência de cada fenômeno no domínio simulado. Os resultados mostram que os fenômenos observados em ambiente computacional se assemelham aos que acontecem na prática mostrando, dessa forma, a relevância da utilização de ferramentas computacionais para o estudo de sistemas de aterramento submetido a impulsos de corrente.

Palavras-chave—simulação computacional; sistemas de aterramento; impulso de corrente; método dos elementos finitos;

I. INTRODUÇÃO

As descargas atmosféricas são fenômenos da natureza que ocorrem de forma aleatória, não sendo possível precisar onde, como e com que intensidade irão ocorrer. No setor elétrico, a ocorrência das descargas pode gerar danos permanentes aos equipamentos do sistema e desligamentos das linhas de transmissão e distribuição, devido às sobretensões provocadas pelas descargas. Segundo [1], as falhas decorrentes de descargas atmosféricas são responsáveis por um terço das causas de interrupção no fornecimento de energia elétrica no mundo.

Assim, devido à incerteza sobre a incidência de surtos atmosféricos e seus efeitos no sistema elétrico, medidas

preventivas vêm sendo adotadas com o objetivo de evitar ou minimizar possíveis danos. Uma dessas medidas é o uso de sistemas de aterramento eficientes, capazes de fornecer um caminho de baixa impedância para a terra às correntes advindas da descarga, promovendo, assim, maior segurança às pessoas e instalações.

Portanto, um aterramento adequado é de fundamental importância para que o sistema elétrico seja minimamente afetado por descargas, garantindo, assim, a continuidade do serviço, o desempenho eficiente dos sistemas de proteção e mantendo os potenciais dentro de limites de segurança pré-estabelecidos. Para as subestações de energia e torres de linhas de transmissão, um dos objetivos principais dos sistemas de aterramento é fornecer caminhos para que um impulso de corrente, com elevado valor de pico, possa fluir com segurança para a terra evitando, assim, o aumento dos potenciais no solo superiores a limiares de segurança [2].

Entretanto, os efeitos provocados pela passagem de correntes impulsivas em malhas de aterramento não são completamente conhecidos. Dessa forma, estudos foram realizados com o intuito de avaliar o desempenho dos sistemas de aterramento submetidos a impulsos de corrente, dentre eles os desenvolvidos em [3-7].

Em [8] é apontado que a análise dos efeitos das descargas atmosféricas (quando atingem o solo) que não se constitui em tarefa técnica trivial, em decorrência da complexidade física dos fenômenos, da dispersão dos seus parâmetros e da dificuldade de avaliação dos seus efeitos. Por conta disso, muitos pesquisadores preferem trabalhar com simulações computacionais. Sendo assim, modelos que representem um sistema de aterramento quando submetido a impulsos de corrente são úteis para simular o comportamento dinâmico do

aterramento. Dentre outras aplicações, as simulações podem fornecer embasamento para o projeto e a construção de sistemas de aterramento mais confiáveis.

Diante de tal situação, neste trabalho é realizada simulação computacional de um sistema de aterramento submetido a impulsos de corrente utilizando o *software* COMSOL *Multiphysics*®, que se baseia no Método dos Elementos Finitos (MEF). O trabalho tem por objetivo mostrar os efeitos de um impulso de corrente no solo a partir de gráficos de potencial e campo elétrico.

II. MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

O método dos elementos finitos é uma técnica numérica para solução aproximada de um sistema de equações diferenciais parciais. Segundo [9], referenciado em [10], a aplicação do método que envolva problemas de solução complexa pode ser dividida em quatro etapas:

- Discretização do domínio estudado em um número finito de sub-regiões;
- Seleção das funções de interpolação;
- Formulação do sistema de equações;
- Resolução do sistema de equações obtido.

Os dois primeiros tópicos são os de maior interesse com relação ao trabalho desenvolvido.

A. Discretização do Domínio

A primeira etapa na aplicação deste método é representada pela obtenção de uma discretização do domínio através de uma malha de elementos geométricos. No caso de domínios bidimensionais, os elementos finitos da malha correspondem a forma triangulares ou quadrangulares, já para os domínios tridimensionais, eles correspondem a formas poliédricas como tetraedros, hexaedros ou prismas. Quanto maior for a quantidade de elementos que discretizam o domínio, maior é o seu grau de refinamento. Isso afeta diretamente na precisão dos resultados e no tempo de processamento [11].

B. Seleção das Funções de Interpolação

As funções de interpolação irão aproximar a função potencial elétrico no interior de cada elemento, dessa forma, será calculada a distribuição de campo elétrico, corrente e tensão no domínio discretizado.

A equação que descreve o potencial interpolado para qualquer ponto no interior do elemento, sendo n o número de nós de cada elemento, V_j o valor do potencial elétrico no nó j

do elemento e N_j a sua função de interpolação é dada pela Equação 1:

$$\tilde{V}(x, y, z) = \sum_{j=1}^n N_j(x, y, z) V_j \quad (1)$$

O COMSOL desenvolve a equação de conservação de corrente baseada na lei de Ohm usando o potencial elétrico como variável dependente.

III. SIMULAÇÃO DO SISTEMA DE ATERRAMENTO

O *software* COMSOL *Multiphysics*® foi utilizado como objetivo de simular o sistema de aterramento e avaliar o seu desempenho quando submetido a impulsos de corrente elétrica. O desenvolvimento do problema foi dividido em duas etapas:

- **Etapa 1:** Definição da geometria do sistema e dos materiais que o compõe;
- **Etapa 2:** Caracterização do impulso de corrente;
- **Etapa 3:** Discretização do domínio.

A. Etapa 1

O sistema simulado foi organizado a partir de três elementos básicos: cobre, solo e ar. Além disso, foi utilizado o recurso de simetria de revolução com o intuito de observar a resposta do modelo em três dimensões. O sistema desenvolvido encontra-se representado na Figura 1.

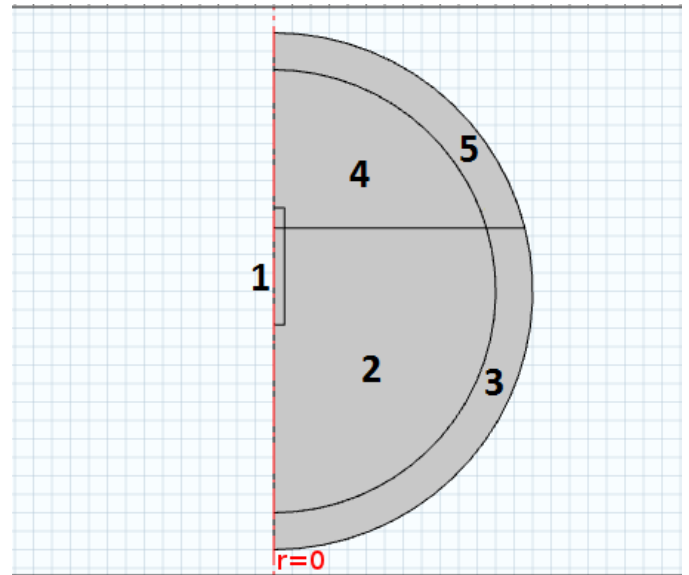


Fig. 1. Imagem do sistema de aterramento simulado.

Observando a Figura 1, o elemento indicado por 1 representa a haste de aterramento de cobre medindo 1,20 m de comprimento e 0,013 m de diâmetro (o elemento foi ampliado para melhor visualização). O elemento indicado por 2 e 3

representa um solo homogêneo com resistividade elétrica de 50 Ωm e permeabilidade relativa de 20. Já o elemento indicado por 4 e 5 representa o ar com resistividade elétrica infinita e permeabilidade relativa de 1.

Para que o modelo representasse o sistema de aterramento em sua totalidade, foi utilizado um recurso que considera o solo e o ar como regiões infinitas, indicados por 3 e 5, respectivamente. O recurso denominado *Infinite Element Domain* se caracteriza por tornar infinito os elementos em estudo sem que haja necessidade de estender o elemento no *software*. Isto reduz o custo computacional envolvido na resolução de equações, já que o número de nós é reduzido, além de simplificar o armazenamento de dados.

B. Etapa 2

A caracterização do impulso de corrente se deu a partir da definição dos parâmetros de uma onda dupla senoidal, gerando a forma de onda de um impulso representativo de descargas atmosféricas, ou seja, com tempo de frente de 8 μs e tempo de meia cauda de 20 μs . Os parâmetros de uma onda dupla senoidal foram definidos a partir da Equação 2.

$$I(t) = I_0(e^{-t/\tau_1} - e^{-t/\tau_2}) \quad (2)$$

em que:

- $I(t)$ é o impulso de corrente no tempo;
- I_0 é o pico da corrente;
- τ_1 é a constante que determina o tempo de meia cauda do sinal;
- τ_2 é a constante que determina o tempo de frente do sinal.

Na tabela 1 são apresentados os valores das constantes utilizadas. E na Figura 2 é mostrada a forma de onda gerada.

TABELA I. VALORES DAS CONSTANTES DA DUPLA EXPONENCIAL

I_0 (A)	τ_1	τ_2
1000	$7,7 \times 10^{-6}$	$7,5 \times 10^{-6}$

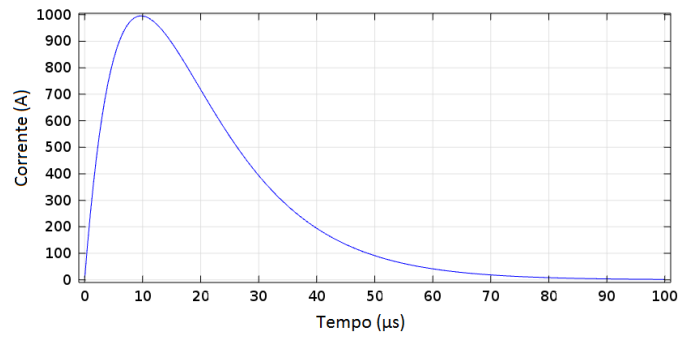


Fig. 2. Sinal do impulso de corrente gerado.

C. Etapa 3

A discretização do domínio através de uma malha de elementos finitos é mostrada na Figura 3. Nota-se que a região da haste de aterramento e adjacências possui uma malha mais refinada, já que esta é a região de interesse, dessa forma os resultados serão mais precisos devido a maior quantidade de nós e elementos.

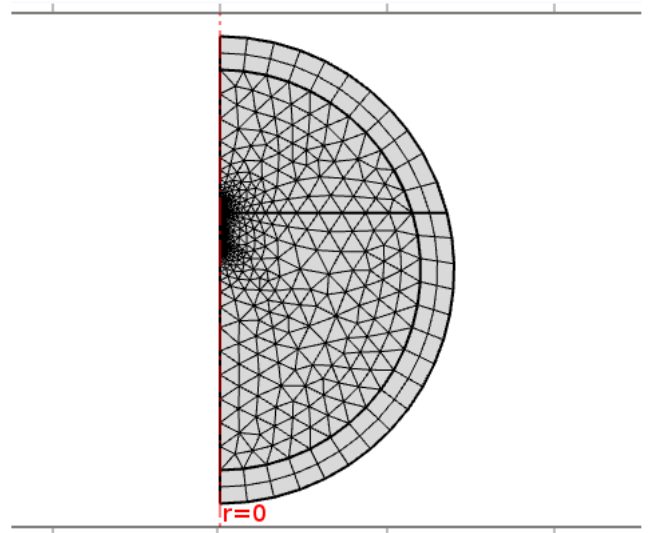


Fig. 3. Discretização das regiões em elementos finitos.

IV. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com o intuito de avaliar os efeitos provocados pela passagem de impulso de corrente em um sistema de aterramento, foi utilizado um *software* que se baseia no método dos elementos finitos e nas equações de Maxwell. As variáveis analisadas são o potencial elétrico, a densidade de corrente e o campo elétrico.

Para tanto, foi aplicado virtualmente o impulso de corrente na superfície superior da haste de aterramento (em contato com o ar). Na Figura 4 pode ser observada a forma de onda do potencial elétrico desenvolvido em função do tempo.

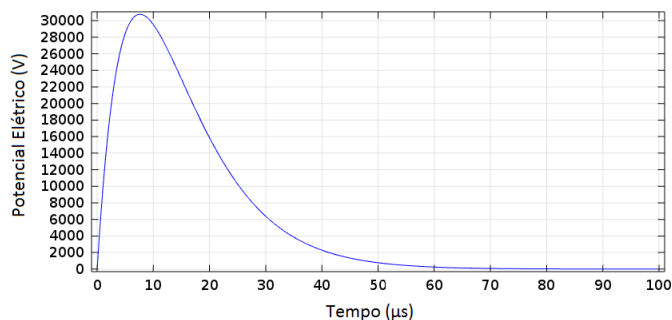


Fig. 4. Potencial elétrico desenvolvido no sistema de aterramento em função do tempo.

Na Figura 5 é mostrada a variação do potencial elétrico na haste de aterramento, no solo e no ar quando a corrente injetada atinge seu valor máximo, nesse caso no instante de tempo de 8 μ s. Pode-se observar que o potencial é atenuado à medida que se afasta da haste e apresenta maior intensidade no domínio que compreende o solo. Foram utilizadas imagens em graduação de cores a fim de representar a intensidade do fenômeno observado, em que nas proximidades da haste tem-se uma graduação de cor mais escura (intensidade mais forte do parâmetro avaliado) variando para uma graduação mais fraca (intensidade menor) à medida que se afasta da haste.

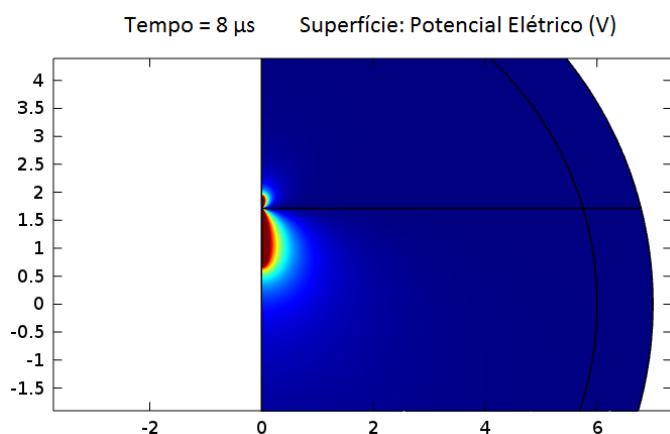


Fig. 5. Potencial elétrico desenvolvido no sistema de aterramento.

Para melhor avaliação dos resultados, foi aplicada revolução de 120 graus na simulação mostrada na Figura 5. Dessa forma, pode-se observar a variação do potencial em três dimensões, como é mostrado na Figura 6.

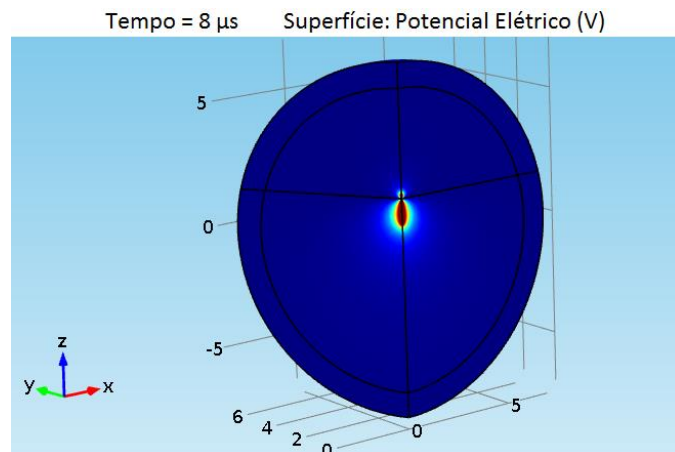


Fig. 6. Potencial elétrico desenvolvido no sistema de aterramento.

Na Figura 7 é mostrada a variação da densidade de corrente no sistema. Sabendo-se que a variável densidade de corrente é a quantidade de corrente que atravessa uma determinada superfície e considerando-se o solo como porção infinitesimal, pode-se fazer uma correlação direta com a própria corrente elétrica.

Dessa forma, observa-se que toda a parcela de corrente se distribui na haste de aterramento e no solo, já que o ar possui resistividade elevada com relação aos outros dois elementos. Observa-se, ainda, que a corrente possui intensidade mais acentuada na haste e em suas proximidades e tende a decair à medida que se dissipa no solo.

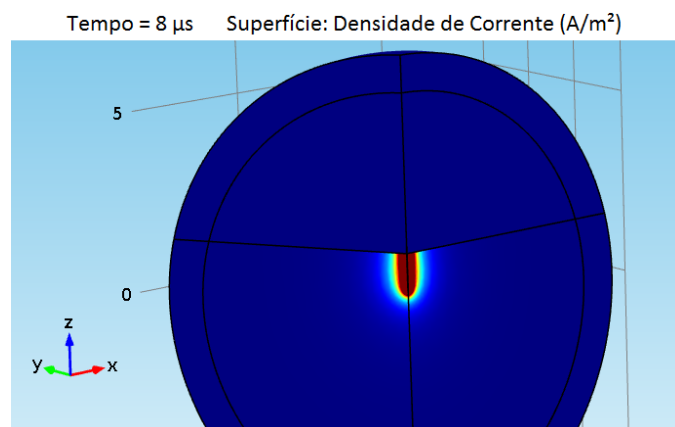


Fig. 7. Densidade de corrente elétrica no sistema de aterramento.

Na Figura 8 podem ser observadas as linhas equipotenciais de campo elétrico geradas pela passagem de corrente elétrica no sistema. O campo elétrico é mais intenso nas adjacências da haste de aterramento e tornam-se mais espaçadas à medida que a corrente é dissipada no solo.

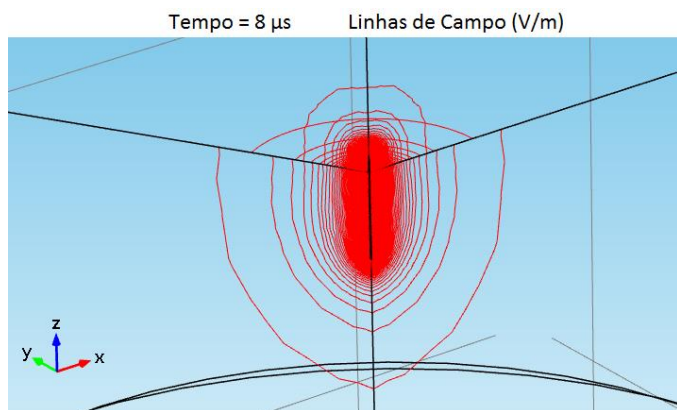


Fig. 8. Linhas de campo elétrico desenvolvido no sistema de aterramento.

Por fim, na Figura 9 é mostrada a atenuação do potencial em função da distância da haste. A partir do gráfico percebe-se uma forte atenuação do potencial para apenas poucos metros de distância da haste. Isso mostra que os potenciais de toque e de passo podem alcançar níveis perigosos para pessoas e equipamentos quando o sistema de aterramento é excitado por um impulso de corrente.

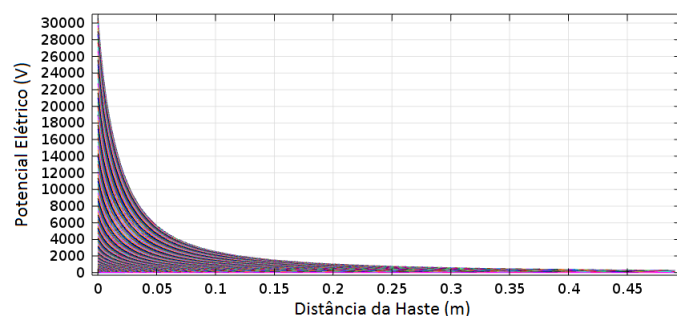


Fig. 9. Variação do potencial elétrico na superfície do solo em função da distância da haste de aterramento.

V. CONCLUSÕES

No trabalho apresentado foi realizada simulação computacional de um sistema de aterramento submetido a um impulso de corrente específico ($8/20 \mu s$) utilizando o *software* COMSOL *Multiphysics*®.

A partir do desenvolvimento da pesquisa, é possível concluir que ferramentas computacionais que utilizam de métodos numéricos, mais especificamente o método dos elementos finitos, se apresentam como uma forma alternativa para avaliação de sistemas de aterramento quando submetidos a descargas atmosféricas simuladas.

A importância da utilização de ferramentas computacionais se dá pelo fato de que as soluções numéricas possibilitam análises dos efeitos da passagem de uma corrente pelo solo, tais como, potencial e campo elétrico.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à COPELE (Coordenação de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica), à EDPI (Eletrobras Distribuição Piauí), ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) e à UFCG (Universidade Federal de Campina Grande).

REFERÊNCIAS

- [1] Kowalenko, K., "Illuminating the Dangers of Lightning Strikes: Protection is key to preventing damage". Disponível em: <<http://theinstitute.ieee.org/technology-focus/technology-topic/illuminating-the-dangers-of-lightning-strikes>>. Acesso em: 12/02/2015.
- [2] Tao, Y.; Sima, W.; Yang, C.; Yang, Q., "Experimental Investigation on the Impulse-Current Distribution of Grounding Electrodes with Various Structures". International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE), Chongqing, China, 2008.
- [3] Sunde, E. D., "Surge Characteristics of a Buried Bare Wire". Electrical Engineering, v. 59, no. 12, pp. 987-991, 1940.
- [4] Dvegan, S. S.; Whitehead, E. R., "Analytical Models for Distributed Grounding Systems". IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, v. PAS-92, no. 5, pp. 1763-1770, 1973.
- [5] Sekioka, S.; Hayashida, H.; Hara, T.; Ametani, A., "Measurements of Grounding Resistances for High Impulse Currents". IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution, v. 145, no. 6, pp. 693-699, 1998.
- [6] Haddad, A.; Griffiths, H.; Ahmeda, M.; Harid, N., "Experimental Investigation of the Impulse Characteristics of Practical Ground Electrodes Systems". International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE), New Orleans, LA, 2010.
- [7] Grcev, L., "Lightning Surge Efficiency of Grounding Grids". IEEE Transactions on Power Delivery, v. 26, no. 3, pp. 1692-1699, 2011.
- [8] Visacro, S., "Descargas Atmosféricas: Uma Abordagem de Engenharia". Ed. São Paulo: Artliber Editora Ltda, 2005.
- [9] Jin, J., "The Finite Element Method in Electromagnetics". Wiley New York, 2002.
- [10] Coelho, R. R. A.; Thé Pontes, R. S.; Pontes, M. G. S. R., "Projeto de Malhas de Aterramento Através do Método dos Elementos Finitos". Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos (SBSE), Foz do Iguaçu, 2014.
- [11] Silva, V. C.; Cardoso, J. R.; Nabeta, S. I.; Palin, M. F.; Pereira, F. H., "Determination of Frequency-Dependent Characteristics of Substation Grounding Systems by Vector Finite-Element Analysis". IEEE Transactions on Magnetics, v. 43, no. 4, pp. 1825 - 1828, 2007.