

Simulação de Aterramento Sob Surto de Corrente

Gabriel Bezerra, Edson Costa, Helder Pereira

Departamento de Engenharia Elétrica
Universidade Federal de Campina Grande
Email: gabriel.bezerra@ee.ufcg.edu.br

Resumo—Este trabalho apresenta um estudo com simulações em 3D de aterramentos quando estes são submetidos a surtos de correntes. Diversos trabalhos na literatura simulam aterramentos utilizando um premissa quasi-estática. No entanto, essa formulação pode levar a resultados com tensões sub-estimadas. Para contornar esse problema, utilizou-se como equação governante a equação do potencial vetorial magnético, obtida através das equações de Maxwell. Os resultados estão de acordo com a literatura. O surto de corrente estudado neste trabalho não provoca ionização do solo.

Palavras-Chave - Aterramentos, Surtos de Corrente, Método dos Elementos Finitos.

I. INTRODUÇÃO

O sistema de aterramento constitui um essencial componente de uma subestação elétrica. Seu principal objetivo é proporcionar uma baixa impedância no solo, uma vez que este não apresenta naturalmente uma impedância pequena suficiente para as aplicações necessárias a uma subestação. Dessa forma, o sistema de aterramento reduz a tensão de passo e a tensão de toque, assegurando que o pessoal interno transite de forma segura no pátio da subestação. Além disso, um bom aterramento promove uma equipotencialização eficiente para os equipamentos que necessitam ter algum terminal conectado à terra para seu funcionamento. O sistema de aterramento pode ser solicitado direta ou indiretamente em situações de:

- falta no sistema elétrico;
- surtos de manobra;
- incidência de descarga atmosférica em linhas de transmissão;
- incidência de descarga atmosférica no SPDA da subestação.

A norma IEEE Std. 80 [1] indica direcionamentos para projetos de sistemas ou malhas de aterramento. No entanto, conforme [2], a adição de fatores de correção em alguma Visando fornecer uma modelagem mais rígida e eficiente, este trabalho apresenta a modelagem e simulação de uma haste vertical de aterramento submetida a impulsos, utilizando-se o Método dos Elementos Finitos equações e outras considerações utilizadas nos cálculos para conferir resultados mais precisos são pouco justificáveis ante o aparato teórico-computacional que dispõe-se na atualidade. (MEF). A modelagem do problema e simulações foram feitas utilizando o

Software Comsol Multiphysics. Para que a modelagem pudesse ser validada de uma forma fidedigna, utilizou-se os dados e condições dos experimentos realizados por [3]. Para tal, a haste vertical a ser estudada, foi submetida a impulsos provenientes de um Gerador de Impulso de Corrente, o qual também foi modelado.

II. ATERRAMENTOS SUBMETIDOS A IMPULSOS

O sistema de aterramento, quando submetido a impulsos, apresenta uma resposta diferente das ocasiões em que o mesmo é submetido a correntes de baixa frequência [4]. Isso ocorre devido ao fato de que o aterramento não responde igualmente a diferentes tipos de sinais. Ou seja, devido à interações eletromagnéticas entre os elementos do sistema (quando há presença de correntes) há uma resposta dependente da frequência do sinal de tensão ou corrente aplicado. Outro fenômeno que corrobora com o comportamento diferenciado do sistema quando submetido a surtos é a ionização do solo. Esse fenômeno ocorre quando o aterramento é submetido a uma corrente de elevada amplitude. Essa corrente impulsiva produz um campo elétrico na região circunvizinha da haste que ultrapassa o gradiente de ionização do solo (tipicamente 300 a 1000 kv/m [5], [6]), ocorrendo uma ruptura dielétrica do solo e provocando uma redução da resistividade do solo na região ionizada. Neste trabalho, utilizou-se correntes com amplitudes que não provocam ionização do solo.

III. EQUAÇÃO DO PROBLEMA

Conforme [7] indica, diversos autores realizaram estudos de aterramentos utilizando o MEF para resolver uma condição quasi-estática. Em vários casos, como [8], é resolvida a equação de Poisson, através da formulação de Garlekin para o MEF. Em outros casos, como o de [9], é utilizada uma condutividade complexa ($\sigma + j\omega\epsilon$) de forma a considerar o efeito da frequência na modelagem do aterramento. Esses casos admitem uma premissa quasi-estática e, conforme [10] e [11], podem fornecer uma sub-estimação da tensão de passo, para altas frequências. Assim, buscando-se contornar esse problema, utilizou-se como equação governante do problema a equação de Maxwell (em função do potencial vetorial magnético A) seguinte:

$$\nabla \times \mu_r^{-1}(\nabla \times A) + \sigma\mu_0 \frac{\partial A}{\partial t} + \mu_0 \frac{\partial}{\partial t} \left(\epsilon_0 \epsilon_r \frac{\partial A}{\partial t} \right) = 0 \quad (1)$$

A equação (1) pode ser obtida da equação de Maxwell, conforme a equação (2):

$$\nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t}, \quad (2)$$

introduzindo-se o potencial magnético A como sendo

$$B = \nabla \times A \quad (3)$$

e inserindo-se o potencial escalar V como

$$E = -\nabla V - \frac{\partial A}{\partial t} \quad (4)$$

Dessa forma, a equação (1) é a modelagem física-matemática que, juntamente com as geometrias do problema, representam o problema em questão a ser resolvido através do MEF.

IV. MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

O método dos elementos finitos é um método numérico para resolução de equações diferenciais parciais. Foi inicialmente desenvolvido por engenheiros de Mecânica Estrutural, tendo sua formulação matemática concebida em 1943 por R. Courant [12]. Após isso, só em meados de 1968 que o método passou a ser utilizado em problemas eletromagnéticos. Desde então, sucessivos aprimoramentos e outros métodos derivados surgiram visando tornar sua aplicação mais ampla, transpondo restrições ou dificuldades que o método inicial possuía.

O MEF tem como ponto positivo a possibilidade de se encontrar soluções para problemas com solução analítica difícil. Além disso, é um método que apresenta bom desempenho para modelos com geometria complexa. Conforme [13], o método baseia-se na quatro etapas seguintes:

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

A. Discretização

A discretização é a etapa base do MEF e constitui-se na divisão de um domínio contínuo em sub-domínios discretos, conforme a Fig.1. Esses sub-domínios são os chamados "elementos finitos", e que podem ter diferentes formas geométricas. Para problemas em 2D geralmente utiliza-se: triângulos, retângulos, hexágonos, etc. No caso de problemas com geometrias em 3D são utilizados: tetraedros, prismas retangulares, etc. De uma forma geral, os elementos finitos preferidos e utilizados em vários *softwares* são os triângulos e tetraedros. Segundo [13], essa se constitui a principal etapa do processo, uma vez que afeta diretamente na precisão da solução bem como pode afetar diretamente o esforço computacional requerido nas etapas posteriores.

Os elementos finitos podem ter diferentes tamanhos. No entanto, é conveniente que nas regiões de maior interesse do problema e em geometrias complexas haja uma maior densidade de elementos. Isso evita que ocorram erros ou discrepâncias no resultado final. Uma falta de atenção por parte do engenheiro quanto a esse ponto pode levá-lo a

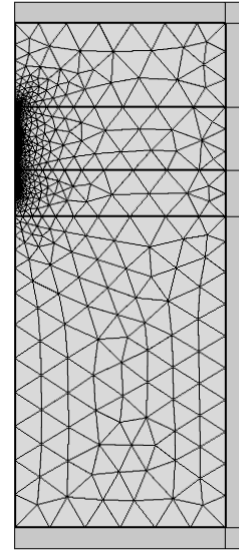


Figura 1. Ilustração do processo de discretização de uma haste de aterramento fincada em um solo de três camadas; com uma camada de ar sobre a haste. Representação com simetria radial.

obter resultados na simulação que não são corretos. Assim, o problema não é o método, mas sim desinformação do especialista que conduz a aplicação deste. Para contornar e evitar erros dessa natureza, alguns *softwares* que utilizam o MEF possuem um sistema de geração automatizada da malha de elementos finitos. No entanto, a depender do problema e do modelo em questão, ainda assim, o usuário necessitará modificar ou aumentar manualmente o número de elementos em uma determinada região de interesse do problema.

B. Funções de Interpolação

Como mencionado na seção anterior, o MEF transforma um problema contínuo, em que existem infinitos pontos no domínio a serem resolvidos, em um problema discreto, em que alguns pontos do domínio são resolvidos por aproximação. Caso contrário, jamais seria possível realizar os cálculos através de computadores. No entanto, a função de interpolação escolhida para o método permite calcular de forma aproximada a solução em qualquer ponto dentro de qualquer elemento finito. Obviamente, o usuário não poderá querer saber a solução aproximada em todos os (infinitos) pontos, pois isso incorreria no mesmo problema citado anteriormente. O que é possível é que o usuário informe uma quantidade finita de quaisquer pontos no domínio e, assim, o MEF retornará os valores aproximados. Dessa forma a função de interpolação de cada elemento confere flexibilidade ao método.

As funções de interpolação a serem escolhidas em geral são polinomiais, conforme [2]. Podem ser de primeiro grau, segundo grau ou de graus maiores. No entanto, embora as funções de graus maiores forneçam resultados mais precisos, aumentam a complexidade dos cálculos. Assim, as funções de primeiro e segundo grau são mais amplamente utilizadas e oferecem um custo benefício razoável, principalmente se nas

regiões mais complexas (ou de maior interesse) do modelo houver uma maior quantidade de elementos, o que aumenta a precisão dos resultados em tais regiões.

C. Formulação do Sistema de Equações

A formulação do sistema de equações constitui a estratégia que será adotada para a resolução da Equação Diferencial Parcial inerente ao problema (propagação térmica, averiguação de distribuição de campo elétrico e/ou magnético, etc.), considerando um domínio discreto.

Existem diferentes possíveis formulações, no entanto, as mais utilizadas são:

- Formulação de *Rayleigh-Ritz*: é classificado como método variacional direto, uma vez que permite a solução do problema variacional sem recorrer à equação diferencial associada [14].
- Formulação de *Galerkin*: Classificado como um método variacional indireto, também chamado de método de resíduos ponderados.

D. Resolução do Sistema de Equações Obtido

Essa etapa consiste na resolução do sistema de equações (em geral descritas na forma matricial), obtido pela formulação escolhida na seção anterior. Para resolução desse sistema, pode-se utilizar diversos métodos, os quais são classificados em métodos diretos ou métodos iterativos [15].

Conforme [2], os métodos diretos utilizam fatoração LU de maneira otimizada para trabalhar com matrizes esparsas através de técnicas de preordenamento que buscam permutar as colunas da matriz de coeficientes de tal maneira a minimizar o número de elementos não nulos nas matrizes diagonal superior L e inferior U. Em problemas tridimensionais este método possui um custo computacional superior aos métodos iterativos.

Os métodos iterativos utilizam algoritmos baseados no método do gradiente conjugado com a possibilidade da utilização de preconditionadores como o método da sobre-relaxação sucessiva (SOR) e o método de Jacobi como meio de aceleração da convergência da solução [2].

V. METODOLOGIA

Neste trabalho é apresentado uma simulação de aterramento submetido a impulso, utilizando o *Comsol*. A modelagem, conforme a Fig. 2, foi realizada de tal forma a se reproduzir as condições dos experimentos de [3]. Assim, através dessa metodologia, buscou-se validar as simulações.

Embora a simulação tenha sido, de fato, modelada em 3D, para facilitar o desenho, modelagem e análise, utilizou-se uma geometria de revolução cilíndrica, uma vez que o problema de uma haste cilíndrica dentro de um cilindro de solo possui simetria radial. Isso não prejudica a análise 3D, só a simplifica.

A haste de aterramento utilizada consiste em uma haste vertical de cobre nú, de altura $h = 1\text{ m}$ e diâmetro $d = 12.2\text{ mm}$.

O solo em que a haste está fincada foi modelado considerando-se um modelo com estratificação de três camadas (Fig. 2), semelhantemente ao trabalho de [3]. A primeira

camada possui resistividade $\rho_1 = 43,19\ \Omega.m$ e espessura $c_1 = 75\text{ cm}$. A segunda camada possui resistividade $\rho_2 = 6,24\ \Omega.m$ e espessura $c_2 = 55\text{ cm}$. A terceira camada possui resistividade $\rho_3 = 76,10\ \Omega.m$ e sua espessura não é especificada, pois considera-se que possui espessura infinita ou suficientemente grande para ser considerada infinita.

Considerou-se que todas as camadas do solo, anteriormente descritas, estão contidas dentro de um cilindro com 5 m de espessura. Esse cilindro é o contorno ou representação do infinito para o problema apresentado.

Foi considerado uma camada de ar de 20 cm sobre a haste para simular a atmosfera próxima à mesma.

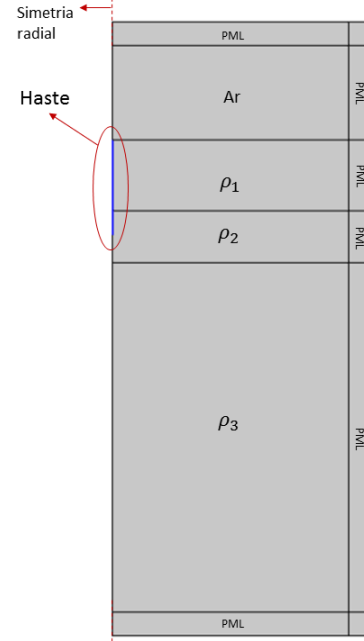


Figura 2. Representação da modelagem 3D através de uma simetria de revolução radial.

Para a aplicação do surto sobre a cabeça da haste, utilizou-se um circuito modelo de Gerador de Impulso de Corrente, descrito e calibrado conforme os experimentos de [3]. Assim, pôde-se garantir que a excitação (impulsiva) seria a mesma, aumentando a segurança do processo de validação.

Para evitar reflexões de onda nas bordas que representam o contorno do problema, utilizou-se *Perfect Matched Layer-PML*, também chamadas de absorvedores anisotrópicos fictícios [16]. Camadas de PML foram colocadas ao redor de todo o contorno cilíndrico. Dessa forma, a modelagem fica compatível com o caso real em que a corrente passa pelo aterramento e se dispersa na terra.

VI. RESULTADOS

Após a modelagem e simulação, obteve-se os resultados apresentados na Fig. 3, a qual indica a tensão e corrente na cabeça da haste de aterramento durante a excitação do circuito Gerador de Impulso de Corrente.

Observou-se que, para uma tensão de carregamento de 10 kV nos capacitores do Gerador de Impulso de Corrente,

a corrente simulada atingiu um valor de pico de 720 A e tensão máxima sobre a cabeça da haste foi de 9,8 kV. Para as mesmas condições, o trabalho de [3] apresenta um resultado experimental de 646 A; o que implica um erro de 11%. Além disso, a impedância impulsiva simulada foi de 12,8 Ω , enquanto a apresentada por [3] foi de 13,6 Ω ; indicando um erro de 5.9%.

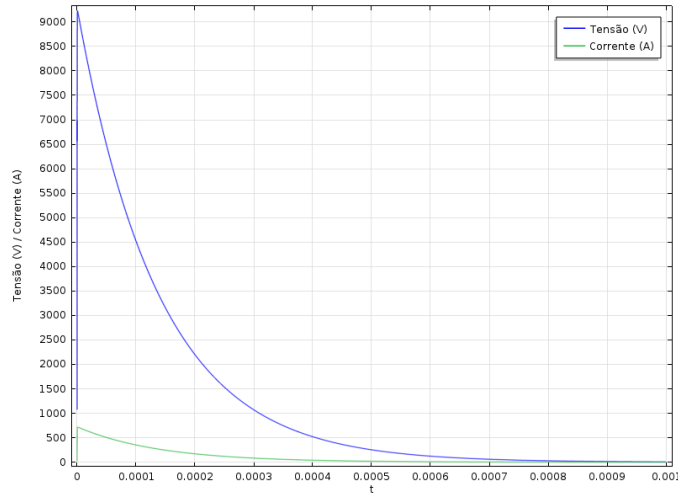


Figura 3. Tensão e Corrente medidas na cabeça da haste aterramento

Os resultados apresentam similaridades com os dados experimentais. Buscou-se modelar de forma fidedigna o arranjo experimental de [3], tanto o aterramento quanto o Gerador de Impulso de Corrente.

VII. CONCLUSÃO

O trabalho apresentou uma modelagem através da equação diferencial do potencial magnético, a qual apresenta vantagens em relação a outras modelagens. Modelou-se tanto o aterramento quanto o gerador de impulso de corrente que fornece a excitação impulsiva ao aterramento. Dessa forma, pôde-se simular de maneira fiel à prática experimental geralmente utilizada para geração de impulsos de corrente em laboratórios. Observou-se que os resultados foram compatíveis com os dados experimentais.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o incentivo técnico e financeiro da Coordenadoria de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica - COPELE da Universidade Federal de Campina Grande - UFCG.

REFERÊNCIAS

- [1] IEEE, "IEEE Guide for safety in AC substation grounding," Tech. Rep., 2000.
- [2] R. R. A. Coelho and M. d. G. S. R. Pontes, "Projeto de malhas de aterramento através do método dos elementos finitos," in *V Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos-SBSE*, Foz do Iguaçu, PR - Brasil, 2014.
- [3] M. A. de Oliveira Rodrigues, "Avaliação de Desempenho de Novas Concepções de Malhas de Aterramento," Master's thesis, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Março 2012.
- [4] S. Visacro and G. Rosado, "Response of grounding electrodes to impulsive currents: an experimental evaluation," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 51, no. 1, pp. 161 – 164, February 2009.
- [5] L. Grcev and M. Popov, "On high-frequency circuit equivalents of a vertical ground rod," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 20, no. 2, pp. 1598–1603, April 2005.
- [6] EPRI, "Transmission Line Grounding," *Electric Power Research Institut*, vol. I, pp. 7–23 a 7–29, 1982.
- [7] F. Hanaffi, W. H. Siew, and I. Timoshkin, "Grounding grid safety evaluation under lightning current," in *PIERS Proceedings*, Stockholm, Sweden, 2013.
- [8] M. Trlep, A. Hamler, and B. Hribernik, "The analysis of complex grounding systems by fem," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 34, pp. 2521–2524, 1998.
- [9] Q. Lei, C. Xiang, and L. Huiqi, "Grounding performance analysis of the substation grounding grids by finite element method in frequency domain," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 43, pp. 1181–1184, 2007.
- [10] R. G. Olsen and M. C. Willis, "A comparison of exact and quasi-static methods for evaluating grounding systems at high frequencies," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 11, pp. 1071–1081, 1996.
- [11] —, "Comparison between exact and quasi-static methods for hf analysis of horizontal buried wires," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 51, pp. 1051–1054, 2009.
- [12] R. Courant, "Variational Methods for The Solution of Problem of Equilibrium and Vibrations," *Bulletin of American Mathematical Society*, vol. 49, pp. 1–23, January 1943.
- [13] J.-M. Jin, *The finite element method in electromagnetics*. John Wiley & Sons, 2015.
- [14] M. N. O. Sadiku, *Numerical Techniques in Electromagnetics*. CRC Press, 2001.
- [15] C. Inc., "Comsol multiphysics use's guide v 5.0," Estocolmo - Suécia, Tech. Rep., 2015.
- [16] V. C. Silva, "Método de Elementos Finitos Aplicado à Solução de Problemas de Aterramento Elétrico," Livre Docência, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.