

12º Congresso de Inovação, Ciência e Tecnologia do IFSP - 2021

Estudo transitório de sistemas de aterramento elétrico submetidos a descargas atmosféricas considerando a abordagem baseada na teoria de linha de transmissão

LEONARDO PEDROSO VIEIRA¹, CLAUDINER MENDES DE SEIXAS²

¹ Graduando em Engenharia Elétrica, voluntária PIVICT, IFSP, Câmpus Votuporanga, leonardo.vieira@aluno.ifsp.edu.br

² Docente, Orientador PIVICT, IFSP, Câmpus Votuporanga, claudiner@ifsp.edu.br

Área de conhecimento (Tabela CNPq): 3.04.04.04-5 - Medição, Controle, Correção e Proteção de Sistemas Elétricos de Potência

RESUMO: Este trabalho tem como objetivo obter a resposta transitória de sistemas de aterramento submetidos a correntes impulsivas por meio do modelo baseado na teoria de Linhas de Transmissão. Um aterramento elétrico bem projetado garante segurança aos equipamentos e seres vivos que podem vir a serem submetidos a surtos elétricos, ocasionados por exemplo por descargas atmosféricas, evitando assim prejuízos econômicos e acidentes que podem vir a ser fatais. Devido tal importância o tema vem despertando interesse de pesquisadores do mundo todo. A partir de uma revisão bibliográfica feita inicialmente, foi possível implementar um código em MATLAB® (validado com a literatura) para simular o comportamento transitório de eletrodos e hastes de aterramento que são submetidos a descargas atmosféricas, sendo possível analisar e apontar quais características respondem melhor para a atenuação da corrente, e conseqüentemente também do ganho de potencial do solo. Essa pesquisa, além de explicar resumidamente o método de LT, traz dois exemplos de aterramento, mostrando como diferentes características respondem de maneira divergente ao serem submetidas a correntes impulsivas.

PALAVRAS-CHAVE: aterramento elétrico; circuitos elétricos; descargas atmosféricas; linha de transmissão; resistividade do solo; domínios do tempo e da frequência.

Transient study of electrical grounding systems subjected to lightning strikes considering the transmission line theory approach

ABSTRACT: This work aims to obtain the transient response of grounding systems subjected to impulsive currents through the model based on the theory of Transmission Lines. A well-designed electrical grounding ensures safety to equipment and living beings that may be subjected to electrical surges, caused for example by atmospheric discharges, thus avoiding economic losses and accidents that can be fatal. Due to its importance, the theme has been arousing the interest of researchers from all over the world. From an initial literature review, it was possible to implement a code in MATLAB® (validated with the literature) to simulate the transient behavior of grounding electrodes and rods that are subjected to lightning discharges, being possible to analyze and point out which characteristics respond best for the attenuation of the current, and consequently also the potential gain of the soil. This research, in addition to briefly explaining the TL method, brings two examples of grounding, showing how different characteristics respond differently when subjected to impulsive currents.

KEYWORDS: electrical grounding; electrical circuits; lightning discharge; transmission line; soil resistivity; time and frequency domains.

INTRODUÇÃO

O aterramento é parte integrante e fundamental de instalações elétrica, segundo Coelho (2019), a extinção de correntes transitórias se dá por meio de um bom desempenho do sistema de aterramentos,

que garante segurança a equipamentos e seres vivos. Basicamente, este é composto por eletrodos ou hastes enterrados e interligados com o sistema a ser aterrado.

Segundo INPE (2007), o setor elétrico é o qual mais sofre com os prejuízos econômicos causados por descargas atmosféricas. Em 2007, desligamentos não programados deram prejuízo avaliado em cerca de 100 milhões de reais, e 600 milhões de reais com a queima de equipamentos.

Para analisar o comportamento transitório de sistemas de aterramento, existem diversos métodos conforme Marti (1988) cita em seu trabalho. Este artigo utiliza um modelo baseado na teoria de linhas de transmissão, que é classificado como um modelo por parâmetros distribuídos, onde basicamente o condutor é dividido em diversos segmentos, modelado por uma linha de transmissão ao longo de seu eixo (LIMA, 2010).

O modelo de aterramento baseado na teoria de linhas de transmissão é uma dos mais simples e não requer grandes esforços computacionais quando comparados com outros métodos, como por exemplo o HEM.

A análise baseada neste modelo permite analisar a impedância do aterramento, variando-se diversos parâmetros do condutor e do solo em que este encontra-se enterrado. Tal estudo permite avaliar quais características fornecem um melhor aterramento, além disso é possível obter o GPR (do inglês, *Ground Potential Rise*, ou do português, aumento do potencial do solo) que permite analisar a atenuação do potencial pelo aterramento submetido a um surto ocasionado por uma descarga elétrica, por exemplo.

MATERIAL E MÉTODOS

Este projeto propôs um estudo teórico de sistemas de aterramento considerando o modelo de linhas de transmissão baseado em uma revisão bibliográfica com o auxílio de ferramentas computacionais, portanto, não houve o uso de materiais.

A revisão bibliográfica foi feita por meio de acessos aos sites eletrônicos de revistas especializadas, anais de congressos científicos e publicações disponíveis na internet, na área de Sistemas Elétricos de Potência/Proteção Elétrica. Os resultados encontrados a partir desse levantamento serviram para obtenção de informações relevantes e entendimento sobre o método baseado em linhas de transmissão.

Tal revisão serviu de base para elaborar um código em MATLAB® capaz de simular o comportamento transitório de sistemas de aterramento elétrico, sendo possível obter a curva de impedância por frequência e do GPR, assim como variar vários parâmetros do eletrodo/haste e do solo.

Este programa permitiu avaliar como a variação dos parâmetros do aterramento influenciam na atenuação do potencial elétrico, sendo possível classificar a qualidade do aterramento.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na modelagem baseada na teoria de Linhas de Transmissão, basicamente o condutor é dividido em diversos segmentos de comprimento Δx , aonde cada um destes segmentos é representado por uma resistência R por metro e uma indutância L por metro em série; uma condutância G por metro e uma capacitância C por metro em paralelo (LIMA, 2010). Tal representação é mostrada na figura 1.

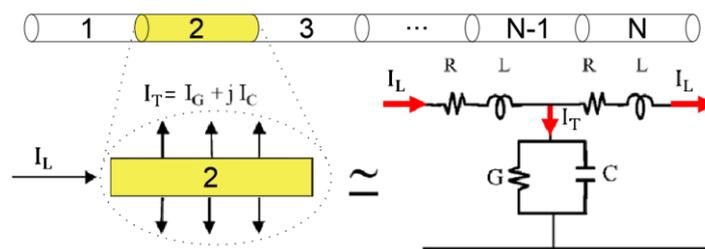


Figura 1 - Eletrodo de aterramento segmentado e sua representação através de um circuito RLCG com as componentes da corrente no solo.

Fonte: Adaptado de Visacro (2007, pg. 381)

O condutor é representado dessa maneira, pois este em contato direto com a terra traz características resistivas, indutivas e capacitivas. Com isso, a corrente tem duas componentes: a corrente

transversal I_T , que é dispersa para o solo; e a corrente longitudinal, I_L que é transferida para os demais segmentos do eletrodo (VISACRO, 2007).

Os parâmetros representados na Figura 1, para um eletrodo horizontal podem ser calculados por meio das equações (1-4) apresentadas por Velazquez e Mukhedkar (1984) e para uma haste vertical conforme (5-7), conforme Kazemi e Ostadzadeh (2015) que não consideram a resistência R , porque $R \ll \omega L$, já que se trata de uma análise em alta frequência.

$$R_{EH} = \frac{\rho_{cu}}{\pi \cdot r^2} \quad \left[\frac{\Omega}{m} \right] \quad (1)$$

$$G_{EH} = \frac{2\pi}{\rho \left[\ln \left(\frac{2l}{\sqrt{2rh}} \right) - 1 \right]} \quad [S/m] \quad (2)$$

$$C_{EH} = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_r}{\left[\ln \left(\frac{2l}{\sqrt{2rh}} \right) - 1 \right]} \quad \left[\frac{F}{m} \right] \quad (3)$$

$$L_{EH} = \frac{\mu}{2\pi} \left[\ln \left(\frac{2l}{\sqrt{2rh}} \right) - 1 \right] \quad \left[\frac{H}{m} \right] \quad (4)$$

$$G_{HV} = \frac{2\pi}{\rho \left[\ln \left(\frac{4l}{r} \right) - 1 \right]} \quad [S/m] \quad (5)$$

$$C_{HV} = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_r}{\left[\ln \left(\frac{4l}{r} \right) - 1 \right]} \quad \left[\frac{F}{m} \right] \quad (6)$$

$$L_{HV} = \frac{\mu}{2\pi} \left[\ln \left(\frac{4l}{r} \right) - 1 \right] \quad \left[\frac{H}{m} \right] \quad (7)$$

em que,

R a resistência (longitudinal) do eletrodo/haste em Ω/m .

L a indutância (longitudinal) do eletrodo/haste em H/m .

G a condutância (transversal) do conjunto eletrodo-solo/haste-solo em S/m .

C a capacitância (transversal) do conjunto eletrodo-solo/haste-solo em F/m .

ρ_{cu} a resistividade do condutor em $\Omega \cdot m$;

ρ a resistividade do solo em $\Omega \cdot m$;

μ a permeabilidade magnética do solo em H/m ;

ϵ_0 a permissividade do vácuo em F/m ;

ϵ_r a permissividade relativa do solo;

l o comprimento do eletrodo ou profundidade de cravamento, em m ;

r o raio do eletrodo em m , e

h a profundidade do centro do eletrodo enterrado em m .

Os parâmetros definidos de (1-7) permitem calcular a impedância característica Z_C , que é definida conforme Budner (1970) em (8).

$$Z_C = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} \quad \left[\frac{\Omega}{m} \right] \quad (8)$$

A partir de (8) é possível encontrar o comportamento transitório da impedância de aterramento em função da frequência, e conseqüentemente, transformando está para o domínio do tempo e aplicando uma corrente transitória, obtém-se o ganho de potencial no ponto de injeção da corrente (GPR).

A partir da revisão bibliográfica feita apresentada de forma breve acima, foi possível elaborar um código em MATLAB® que simula o comportamento transitório do aterramento. A figura 2 mostra a validação do programa para eletrodo horizontal colocando digitalmente a curva obtida comparando-a com uma curva Grcev e Grceva (2009), cuja características de ambos são: eletrodo horizontal de 100m, 7mm de raio, enterrado a 0,8m de profundidade, considerando três solos de 10, 100 e 1.000 $\Omega.m$ de resistividade, permissividade relativa igual a 10 e permeabilidade magnética relativa igual a 1.

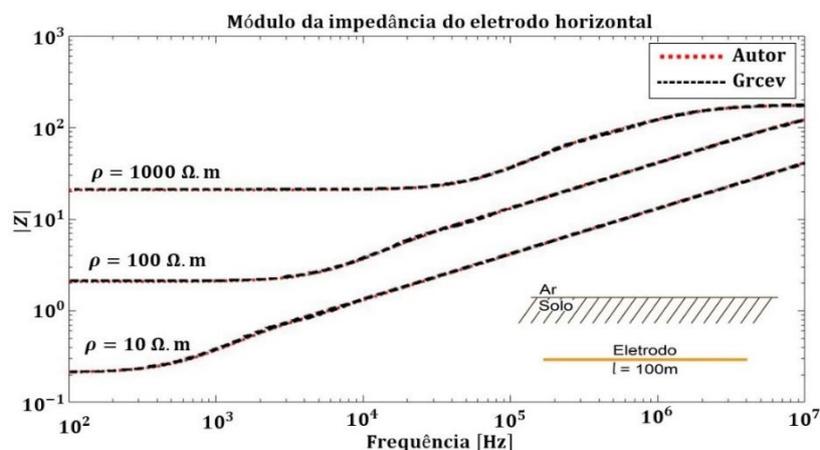


Figura 2 – Módulo da impedância de um eletrodo horizontal de 100 metros
Fonte: Adaptado de Grcev e Grceva (2009, pg. 874)

Para haste vertical foi realizado o mesmo processo de validação, comparando a curva obtida pelo programa elaborado em MATLAB® com as curvas obtidas por Akbari, Sheshyekani e Alemi (2012) e o resultado foi satisfatório em ambos os casos.

Após a validação, foi simulado diversos sistemas de aterramento, variando características como por exemplo a resistividade e permissividade do solo, o comprimento e raio do eletrodo/haste.

Ao final de todas as simulações, foi possível constatar dentro das características variadas dois casos que respondem de forma bem diferente. O caso 1 foi o com eletrodo de raio 4,72 mm (seção 70 mm²), comprimento de 20 m, enterrado a uma profundidade de h=0,7 m, com um solo de permissividade relativa igual a 10 e a resistividade de 100 $\Omega.m$. O caso 2 foi com um eletrodo com de raio igual a 3,34 mm (35 mm²), comprimento de 80m, enterrado a uma profundidade de 0,3 m, em um solo de permissividade relativa igual a 1 e resistividade de 1.000 $\Omega.m$. A figura 3 mostra o GPR em ambos os casos.

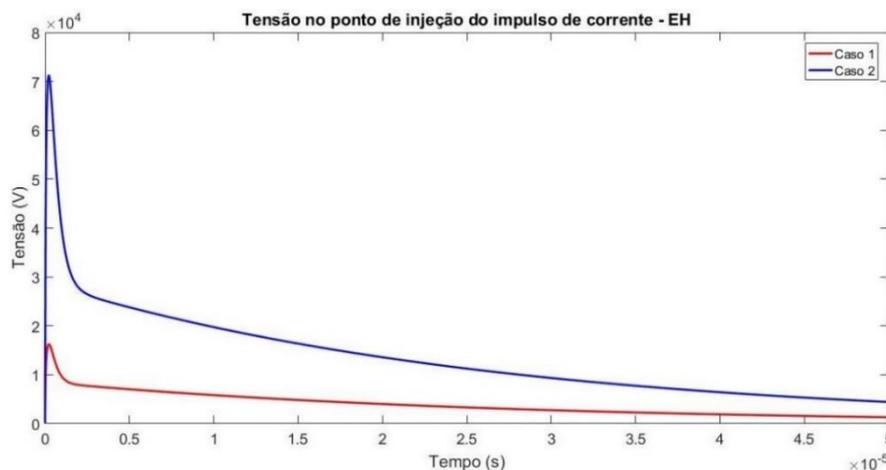


Figura 3 – Ganho de potencial no ponto de injeção de corrente em eletrodo horizontal
Fonte: Elaborado pelo próprio autor (2021)

Notoriamente, o caso 1 respondeu bem melhor a atenuação de corrente do que caso 2, sendo aproximadamente 4,5 vezes menor.

De modo geral, foi possível notar que para alta frequência, eletrodos de menor comprimento apresentam menor impedância, ou seja, melhor desempenho, e outro fator de efeito considerável é a resistividade do solo. Os demais parâmetros não causaram efeito considerável na variação da impedância.

Também é possível afirmar que tanto eletrodo horizontal como haste vertical têm desempenho parecidos, cabendo ao projetista do aterramento ver qual a melhor forma de executá-lo de acordo com as características exigidas ao sistema elétrico.

CONCLUSÕES

Durante o decorrer da pesquisa, a partir da revisão bibliográfica foi possível implementar dois códigos em MATLAB® um que fornecesse a impedância do sistema de aterramento para eletrodo e o outro para haste. Ambos foram validados com a literatura permitindo assim sua utilização para simulações.

A partir dos resultados obtidos com essa pesquisa também é possível afirmar que tanto eletrodo horizontal como haste vertical têm desempenho parecidos, cabendo ao projetista do aterramento ver qual a melhor forma de executá-lo de acordo com as características exigidas ao sistema elétrico.

A modelagem baseada em Linhas de transmissão é capaz de representar o comportamento transitório de sistemas de aterramento de forma simples e com pouco esforço computacional quando comparado a outros métodos, como por exemplo o HEM, sendo possível utilizar em aplicações que não necessitam de um grau tão alto de exatidão com a realidade.

AGRADECIMENTOS

À instituição de ensino do proponente, pela oportunidade da realização desta IC voluntária.

REFERÊNCIAS

AKBARI, M.; SHESHYEKANI, K.; ALEMI, M. R. **The effect of frequency dependence of soil electrical parameters on the lightning performance of grounding systems.** IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, v. 55, n. 4, p. 739-746, 2012.

BUDNER, A. **Introduction of Frequency-Dependent Line Parameters into an Electromagnetic Transients Program.** IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, v. PAS-89, p.88-97, n. 1, Jan. 1970.

COELHO, R. R. A. **Uma contribuição à análise de sistemas de aterramento em meios horizontalmente estratificados.** 2019. 158f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2019.

GRCEV, L.; GRCEVA, S. **On HF circuit models of horizontal grounding electrodes.** IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, v. 51, n. 3, p. 873-875, 2009.

INPE, **INPE avalia prejuízos causados por raios,** 2007. Disponível em:< http://www.inpe.br/noticias/noticia.php?Cod_Noticia=936>. Acesso em: 29. jun. 2021.

KAZEMI, M.; OSTADZADEH, S. R. **Vector Fitting-Based Models of Vertical and Horizontal Electrodes under Lightning Strikes to Interface with EMTP.** Asian Journal of Fuzzy and Applied Mathematics, v. 3, n. 1, 2015.

LIMA, A. B. **Método para cálculo da impedância de malhas de aterramento de torres de linhas de transmissão.** 2010. 124 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, setembro, 2010.

MARTI, L. **Simulation of transients in underground cables with frequency-dependent modal transformation matrices.** IEEE transactions on Power delivery, v. 3, n. 3, p. 1099-1110, 1988.

VELAZQUEZ, R.; MUKHEDKAR, D. **Analytical modelling of grounding electrodes transient behavior.** IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, v.PAS-103, n. 6, jun. 1984. p.1314-1322.

VISACRO, S. **A comprehensive approach to the grounding response to lightning currents.** IEEE Transactions on Power Delivery, New York, v. 22, n. 1, p. 381-386, jan. 2007.