



FENÔMENOS DE ALTA FREQUÊNCIA EM MODELAGEM DE ATERRAMENTOS ELÉTRICOS

Thiago Costa Frade*¹, Gustavo Lobato Campos¹, Natália Rodrigues de Melo¹

¹IFMG – Instituto Federal de Minas Gerais, *Campus Formiga*

Resumo - A função do aterramento elétrico é proteger os seres vivos e equipamentos em suas proximidades, e por isso, seu dimensionamento deve ser feito de forma adequada. Para fenômenos de baixas frequências, esses sistemas são bem definidos na literatura, porém considerando fenômenos de altas frequências, o dimensionamento desses sistemas demanda cálculos mais complexos e maior esforço computacional. Dado o exposto, este artigo apresenta a modelagem de um aterramento elétrico, solicitado por fenômenos de alta frequência, pela teoria das linhas de transmissão. São definidos, para um eletrodo horizontal, a impedância de aterramento e a sobretensão na entrada do aterramento. Os parâmetros do solo são considerados constantes com a frequência, em alguns casos, e em outros, variáveis. Por fim, destaca-se a importância deste trabalho aproximando os leitores da área do Eletromagnetismo aplicado.

Palavras-Chave – Aterramentos Elétricos. Fenômenos de Alta Frequência. Modelagem.

HIGH FREQUENCY GROUNDING MODELLING

Abstract - The main function of grounding system is to protect nearby living beings and equipments, that's the reason why its specification shall be accurate. These systems are well defined in the literature for low frequency occurrence but for high frequency current the specification of these systems includes complex calculations and greater computational effort. Thus, this paper presents the modeling of a grounding system for high frequency components using the transmission lines model. The parameters calculated are the grounding impedance and the potential rise in a grounding system with a horizontal electrode. The consideration of constant soil parameters are used for some cases and in others the variation of these with the frequency are taken into account. Finally, the importance of this paper is also to approach readers to electromagnetism studies.

Keywords – Electrical Grounding. High Frequency Phenomena. Modeling.

*thiagocfrade2012@gmail.com

I. INTRODUÇÃO

Os estudos referentes ao tema aterramentos elétricos têm se tornado cada vez mais frequentes devido à importância deste elemento para o funcionamento adequado do sistema elétrico. Os sistemas de aterramento apresentam uma resposta em regime permanente e outra em regime transitório. O regime permanente corresponde às respostas em baixas frequências, como por exemplo, um curto circuito e correntes de longa duração. A resposta transitória está associada a altas frequências, como é o caso das ondas impulsivas de descargas atmosféricas [1].

O comportamento do aterramento elétrico, considerando fenômenos solicitantes de baixa frequência, é bem definido na literatura e os cálculos para determinação do comportamento do aterramento são relativamente simples [2]. Em contrapartida, quando o aterramento é submetido a correntes impulsivas, como é o caso das descargas atmosféricas, o seu comportamento se difere do observado para fenômenos de baixa frequência e há uma complexidade maior na modelagem dos fenômenos eletromagnéticos associados às correntes impulsivas [3].

A utilização de modelos matemáticos que forneçam uma representação física consistente de um sistema de aterramento trata-se de uma alternativa adequada para investigar o seu comportamento quando solicitado por descargas atmosféricas. Por meio da modelagem é possível reproduzir as principais características de sistemas de aterramentos reais e determinar o seu desempenho. O correto equacionamento permite determinar parâmetros como sobretensões em diversos pontos do aterramento, campo eletromagnético nas proximidades do sistema aterrado, tensões induzidas em estruturas e equipamentos, tensões de passo e toque, dentre outros [4].

A compreensão do comportamento transitório de sistemas de aterramentos solicitados por descargas atmosféricas possibilita o entendimento de conceitos fundamentais para projetos de aterramentos, que estão diretamente relacionados ao desempenho do sistema aterrado e a segurança dos seres vivos que se encontram nas suas proximidades [5]-[6]-[7]. Este favorece a realização de projetos de aterramentos confiáveis, cujo objetivo principal é evitar prejuízos financeiros, associados a danos em equipamentos e, principalmente, garantir a segurança dos que se encontram nas regiões atingidas [8].

Com a modelagem de aterramentos elétricos é possível obter o comportamento do sistema frente a solicitações por

altas frequências, como as descargas atmosféricas. Com isso, é possível modelar grandezas como a impedância de aterramento e a sobretensão na entrada do aterramento. Deste modo, é extremamente importante o correto dimensionamento desse tipo de sistema.

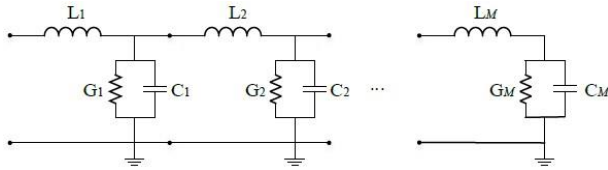
Neste artigo, apresentam-se resultados referente a simulação de um aterramento elétrico solicitado por correntes de descarga. O aterramento é composto por um eletrodo horizontal e sua modelagem é baseada na teoria de linhas de transmissão (TLM, *Transmission-Line Modeling Model*). Esse método baseia-se em equações de propagação de ondas e possui equacionamento simples quando comparado a outros métodos, resultando em um esforço computacional menor [9].

II. DESENVOLVIMENTO DO MODELO

A modelagem por linhas de transmissão parte do princípio que um eletrodo pode ser dividido em “N” segmentos, sendo cada um deles representado por um circuito com uma indutância, uma capacitância e uma condutância. Como as perdas internas ao condutor devido à resistência são pequenas quando comparadas com as perdas para o solo, a resistência por metro do circuito é desconsiderada.

A Figura 1 representa o circuito equivalente de um eletrodo utilizando o modelo TLM.

Figura 1: Circuito equivalente do circuito utilizado na modelagem por linhas de transmissão [9].



A. Cálculo dos Parâmetros do Solo

Para o estudo de caso em questão considerou-se tanto os parâmetros do solo constantes com a frequência como variáveis. O objetivo é identificar o impacto de tal consideração na sobretensão. Para o cálculo da permissividade do solo, considerando os parâmetros do solo invariáveis com a frequência, utilizou-se a Equação (1):

$$\varepsilon = \varepsilon_r \varepsilon_0 \quad (1)$$

Onde:

- ε - Permissividade elétrica [F/m].
- ε_r - Permissividade relativa.
- ε_0 - Permissividade do vácuo [$8,854 \cdot 10^{-12}$ F/m].

As equações que permitem calcular os parâmetros elétricos do solo considerando a variação dos mesmos com a frequência, foram obtidas com base nas medições de campo conduzidas por [10]. Para cálculo da condutividade e permissividade relativa do solo, respectivamente tem-se as Equações (2) e (3), sendo as mesmas determinadas por [11].

$$\sigma = \sigma_0 + \sigma_0 h(\sigma_0) \left(\frac{f}{1\text{MHz}} \right)^\gamma \quad (2)$$

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon'_\infty}{\varepsilon_0} + \frac{\tan(\pi\gamma/2) 10^{-3}}{2\pi\varepsilon_0(1\text{MHz})^\gamma} \sigma_0 h(\sigma_0) f^{\gamma-1} \quad (3)$$

Onde:

- σ - Condutividade do solo [mS/m].
- σ_0 - Condutividade do solo em baixas frequências (100 Hz) [mS/m].
- $h(\sigma_0)$ - Função utilizada para levar em consideração a propriedade de dispersão presente em solos reais.
- γ - Constante relacionada com as propriedades físicas da amostra do solo.
- $\varepsilon'_\infty/\varepsilon_r$ - Permissividade relativa em altas frequências.
- f - Frequência [Hz].

Os parâmetros $h(\sigma_0)$, γ e $\varepsilon'_\infty/\varepsilon_r$ estão indicados na Tabela I e podem ser definidos de modo a se obter resultados medianos, relativamente conservativos e conservativos. Os resultados que serão apresentados no estudo de caso foram considerados resultados medianos, que são resultados que se mais aproximam de casos reais, ou seja, não são superestimados e nem subestimados.

Tabela I: Parâmetros do modelo proposto.

Tipos de resultados	Função $h(\sigma_0)$	γ	$\varepsilon'_\infty/\varepsilon_r$
Resultados medianos	$h_1 = 1,26x \sigma_0^{-0,73}$	0,54	12
Resultados relativamente conservativos	$h_2 = 0,95x \sigma_0^{-0,73}$	0,58	8
Resultados conservativos	$h_3 = 0,70x \sigma_0^{-0,73}$	0,62	4

Fonte: Alípio e Visacro (2014)

B. Cálculo dos Parâmetros Elétricos do Modelo

Considerando um aterramento composto por um eletrodo horizontal, determina-se a indutância, capacitância e condutância por metro através das Equações (4), (5) e (6), propostas por [12], respectivamente.

$$L = \frac{\mu_0}{2\pi} \left[\ln \left(\frac{2l}{r} \right) - 1 \right] \quad (4)$$

$$G = \frac{\pi}{\rho_0} \left[\ln \left(\frac{2L}{\sqrt{2rh}} \right) - 1 \right]^{-1} \quad (5)$$

$$C = \pi\varepsilon \left[\ln \left(\frac{2L}{\sqrt{2rh}} \right) - 1 \right]^{-1} \quad (6)$$

Onde:

- L - Indutância [H/m].
- G - Condutância [S/m].
- C - Capacitância [F/m].
- μ_0 - Permeabilidade magnética do vácuo [$4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$ H/m].
- l - Comprimento do eletrodo [m].
- ρ_0 - Resistividade do solo [$\Omega \cdot m$].
- r - Raio do eletrodo [m].
- h - Profundidade que o eletrodo está inserido no solo [m].

C. Cálculo da Impedância de Aterramento

A impedância de aterramento do sistema é calculada pela Equação (7), definida em [9].

$$Z(f) = Z_0(f) \coth(\hat{\gamma}(f)l) \quad (7)$$

Onde:

- Z - Impedância de aterramento [Ω].
- Z_0 - Impedância característica [Ω].
- $\hat{\gamma}$ - Coeficiente de propagação.

Em que a impedância característica e o coeficiente de propagação são calculados pelas Equações (8) e (9), respectivamente.

$$Z_0(f) = \sqrt{\frac{j\omega L}{G + j\omega C}} \quad (8)$$

$$\hat{\gamma}(f) = \sqrt{j\omega L(G + j\omega C)} \quad (9)$$

D. Cálculo da Sobretenção na Entrada do Aterramento

Para determinar a sobretenção na entrada do aterramento, deve-se definir a corrente de descarga a ser injetada no sistema. Neste estudo de caso, foram utilizados os dados das primeiras correntes e correntes subsequentes de descarga, encontrados em [13], obtidos em medições realizadas na Estação Morro do Cachimbo – MG.

Considerando que a impedância de aterramento é determinada no domínio da frequência e a corrente de descarga no domínio do tempo, aplica-se a Transformada de Fourier para obter a resposta da mesma no domínio da frequência para, assim, calcular a tensão na entrada do aterramento. Depois do cálculo aplica-se a Transformada inversa de Fourier para obter a sobretenção no domínio do tempo. Assim, a sobretenção na entrada do aterramento é definida pela Equação (10), definida em [9].

$$v(t) = F^{-1}\{Z(f) \cdot F[i(t)]\} \quad (10)$$

Onde:

- v - Sobretenção na entrada do aterramento [V].
- F^{-1} - Transformada inversa de Fourier.
- F - Transformada direta de Fourier
- i - Corrente de descarga injetada no sistema [A].

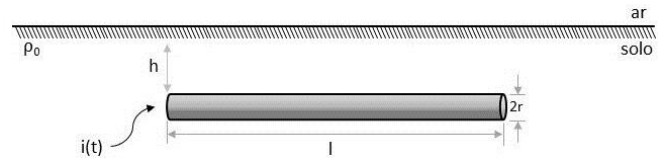
III. ESTUDO DE CASO

Diante do modelo apresentado, foram calculados, mediante ao *software* MATLAB (versão estudante), os parâmetros elétricos do solo e do modelo, a impedância de aterramento e a sobretenção na entrada do aterramento com o intuito de caracterizar o comportamento transitório de um aterramento elétrico constituído por um eletrodo horizontal.

Os resultados apresentados foram simulados para a configuração de aterramento mostrada na Figura 2, composta por um eletrodo horizontal de 30 m de comprimento, raio de 7 mm, inserido em uma profundidade de 0,5 m em um solo com resistividade de 2.400 Ωm . Quando os parâmetros do solo

foram considerados constantes com a frequência, a permissividade relativa utilizada foi igual a 15.

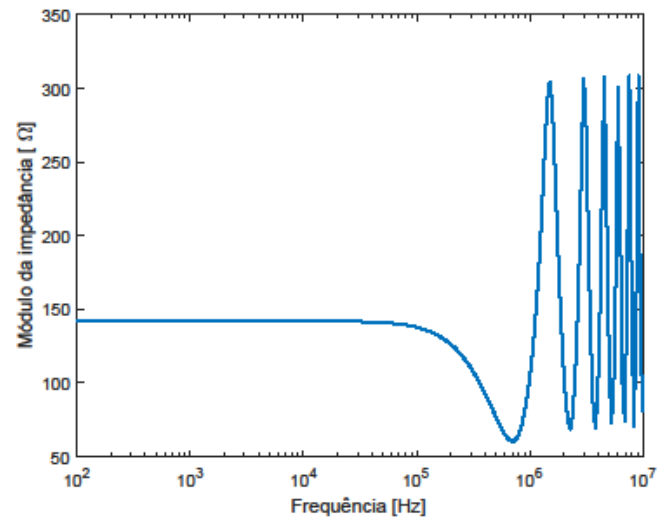
Figura 2: Configuração de aterramento analisada.



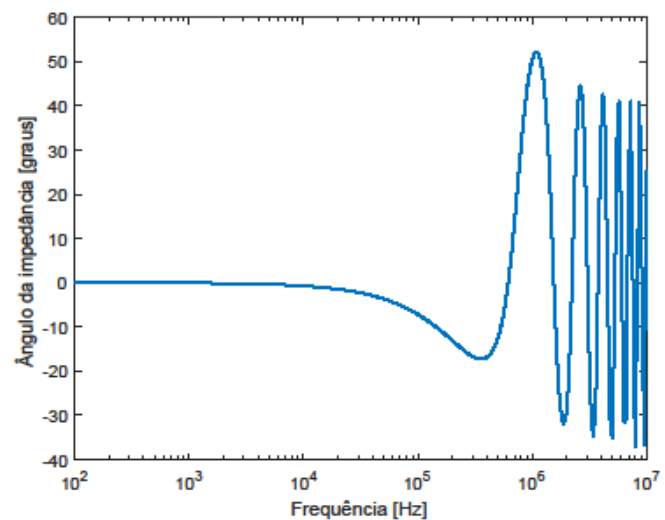
A. Impedância de Aterramento

A partir da configuração de aterramento citada acima, definiu-se as curvas do módulo e ângulo da impedância de aterramento para parâmetros do solo constantes com a frequência. A Figura 2 ilustra os resultados obtidos.

Figura 3: Módulo (a) e ângulo (b) da impedância de aterramento de um sistema de aterramento com um eletrodo horizontal e parâmetros do solo constantes com a frequência.



(a)



(b)

Fonte: Próprio autor.

Por meio da Figura 3 é possível observar que em baixas frequências o módulo da impedância de aterramento

praticamente não varia, enquanto o ângulo é aproximadamente zero. Isto acontece devido à reatância indutiva do sistema ser diretamente proporcional à frequência, assim, ela se torna muito pequena e a reatância capacitiva, por ser inversamente proporcional à frequência, se torna muito alta, e portanto, o sistema é caracterizado apenas por uma condutância.

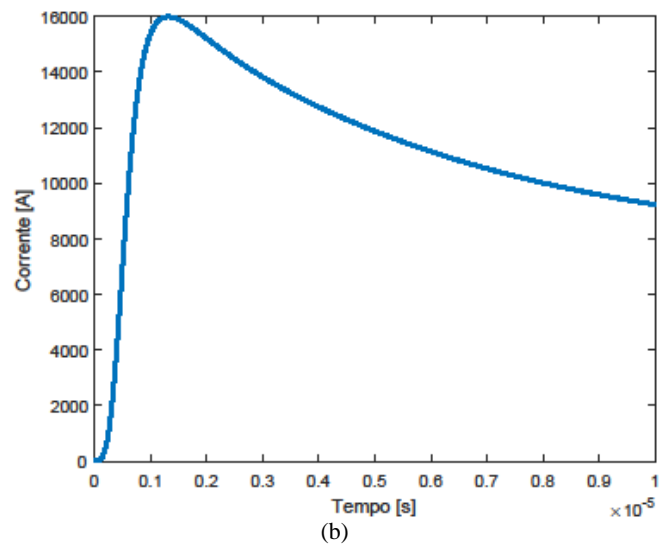
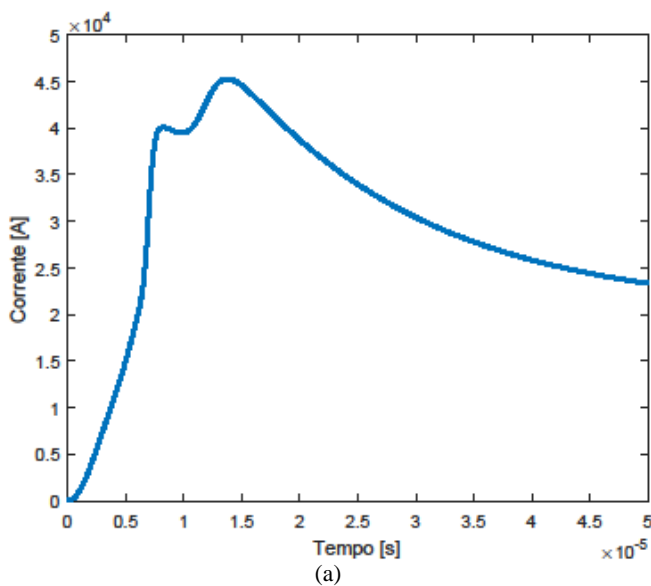
Em altas frequências, aproximadamente acima de 10^5 Hz como mostrado na Figura 3, a impedância de aterramento apresenta características capacitivas e indutivas. Quando o ângulo possui valores negativos, os efeitos capacitivos do sistema são predominantes. Para ângulos com valores positivos, os efeitos indutivos prevalecem.

Para o cálculo da impedância de aterramento para parâmetros do solo variáveis com a frequência realizou-se o mesmo procedimento que o cálculo para parâmetros do solo constantes com a frequência, porém considerou-se os parâmetros descritos nas equações (2) e (3).

B. Corrente de Descarga

Os dados, obtidos em [13], provenientes de medições na Estação Morro do Cachimbo – MG, foram utilizados para obtenção das curvas das primeiras correntes de descarga e correntes subsequentes, a fim de definir as curvas de sobretensão no aterramento. A Figura 4 ilustra as curvas de corrente de descarga utilizadas para descrever o comportamento do aterramento.

Figura 4: Primeiras correntes (a) e correntes subsequentes (b) de descarga medidas na estação Morro do Cachimbo.

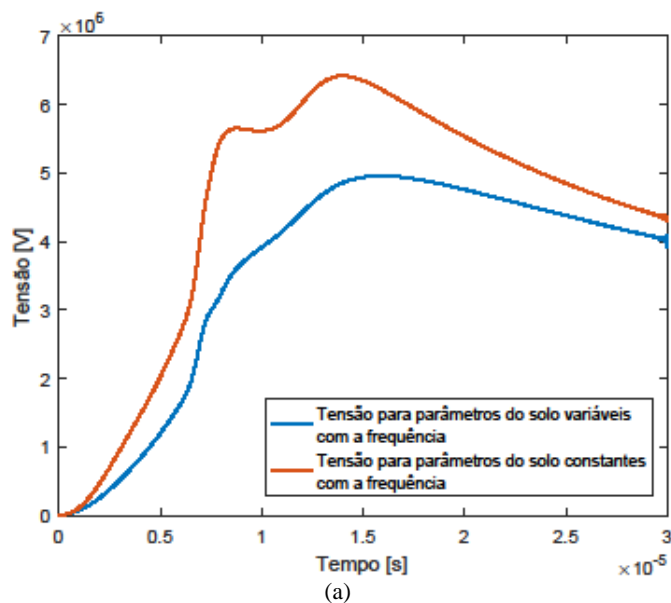


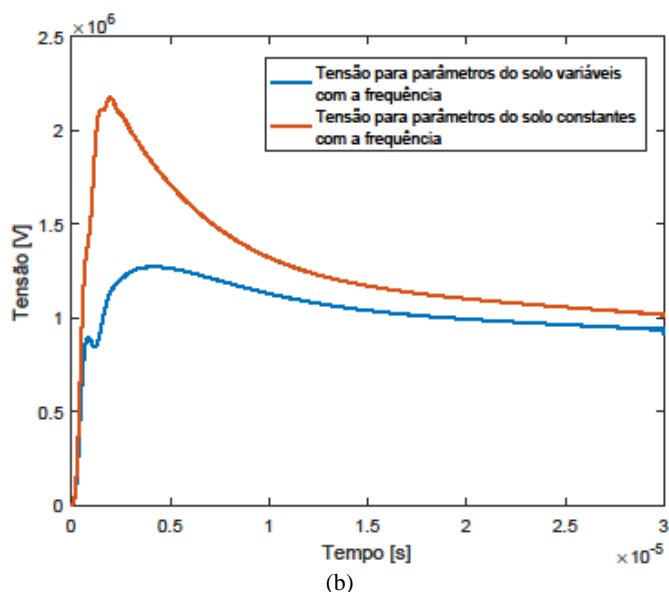
Fonte: Próprio autor.

C. Sobretensão na Entrada do Aterramento

Com os dados de impedância de aterramento, de primeiras correntes e correntes subsequentes de descarga obtidos anteriormente definiu-se as curvas de elevação de potencial quando o sistema é submetido a uma corrente de descarga. A Figura 5 ilustra as curvas de sobretensão na entrada do aterramento.

Figura 5: Sobretensão na entrada do aterramento elétrico para parâmetros do solo constantes e variáveis com a frequência, quando submetidos às primeiras correntes (a) correntes subsequentes (b) de descarga da Figura 3.





Fonte: Próprio autor.

A diferença de valores de sobretensão entre um aterramento com parâmetros do solo constantes com a frequência e um aterramento estes parâmetros variáveis com a frequência, como citado anteriormente, pode ser verificada na Figura 5.

A diferença de tensão de pico nas curvas da Figura 5 (a) é de aproximadamente 1,46 MV, totalizando em uma diferença percentual de 77,24%. Nas curvas da Figura 5 (b), a diferença da tensão de pico é de aproximadamente 0,94 MV, totalizando uma diferença percentual de 58,43%.

Para parâmetros do solo constantes com a frequência a impedância de aterramento e , conseqüentemente, a sobretensão do sistema são superestimadas, e portanto possuem valores mais elevados. Ao analisar a configuração de sistema de aterramento com parâmetros do solo variáveis com a frequência, percebe-se que os valores de sobretensão na entrada do aterramento são menores, isto porque a permissividade elétrica do meio diminui em altas frequências, e a condutividade do solo aumenta, e assim, o efeito global da variação desses parâmetros ocasiona na diminuição da impedância de aterramento e , conseqüentemente, da sobretensão.

IV. CONCLUSÕES

Neste artigo foi apresentada a modelagem de sistemas de aterramentos elétricos solicitados por fenômenos de alta frequência, como por exemplo as descargas atmosféricas, baseando-se na teoria de linhas de transmissão. Através desta modelagem define-se as curvas de impedância de aterramento (módulo e ângulo) e de sobretensão na entrada do sistema.

Com os resultados apresentados observa-se a importância de considerar a variação dos parâmetros do solo com a frequência, visto que com esta consideração os resultados de impedância de aterramento, e conseqüentemente, de sobretensão, são reduzidos e assim se aproximam mais do resultado real.

Destaca-se ainda a importância de trabalhos com este foco, visto que os sistemas de aterramentos precisam ser modelados de forma a garantir a segurança de equipamentos e seres vivos em suas proximidades. Além disso, a modelagem de

aterramentos para fenômenos de alta frequência não é tão bem definida na literatura e possui cálculos mais complexos em relação à modelagem de aterramentos para o regime permanente.

Vale ressaltar ainda que estes resultados se baseiam no projeto de pesquisa aplicada: Modelagem de Aterramentos Elétricos Solicitados por Fenômenos de Alta Frequência, vinculado ao Grupo de Soluções em Engenharia (GSE) do IFMG – Campus Formiga. Além disso, este trabalho se encontra na área do Eletromagnetismo, que apesar de ser uma área complexa e de difícil aceitação por parte dos alunos em geral, demanda por soluções aplicadas, e por isso, espera-se esse projeto e este artigo aproximem mais os alunos da Engenharia com o Eletromagnetismo.

REFERÊNCIAS

- [1] Silva, B. P. (2016). Modelagens e solução de aterramentos sujeitos a surtos de corrente: respostas nos domínios da frequência e do tempo. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Goiás.
- [2] IEEE Std 80 (2013). IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding. Substations Committee of the IEEE Power Engineering Society.
- [3] Visacro, S. (2007). A comprehensive approach to the grounding response to lightning currents. IEEE Transactions on Power Delivery, 22(1):381–386.
- [4] Alípio, R. S. (2008). Modelagem eletromagnética de aterramentos elétricos nos domínios do tempo e da frequência. Dissertação de Mestrado, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais-CEFET/MG.
- [5] Sunde, E. D. (1949). Earth conduction effects in transmission systems. Dover Publications Inc.
- [6] Grece, L. D. (1996). Computer analysis of transient voltages in large grounding systems. IEEE Transactions on Power Delivery, 11(2):815–823.
- [7] Visacro, S. (2002). Aterramentos elétricos: conceitos básicos, técnicas de medição e instrumentação, filosofias de aterramento. Artliber.
- [8] Schroeder, M. A., Afonso, M. M., Oliveira, T. A., & Assis, S. C. (2012). Computer analysis of electromagnetic transients in grounding systems considering variation of soil parameters with frequency. Journal of Electromagnetic Analysis and Applications, 4(12), 475.
- [9] SILVA, Bárbara Pereira; ALVES, Antônio César Baleeiro. Aterramentos sob Altas Frequências: modelagem eletromagnética e por linha de transmissão: Modelagem Eletromagnética e por Linha de Transmissão. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SISTEMAS ELÉTRICOS, 6, 2016, Goiânia - GO. Artigo em Anais de Congresso. Natal-RN, 2016. p.1-7.
- [10] Visacro, S., Alípio, R., Vale, M. H. M., e Pereira, C. (2011). The response of grounding electrodes to lightning currents: The effect of frequency-dependent soil resistivity and permittivity.
- [11] Alípio, R. e Visacro, S. (2014). Modeling the frequency dependence of electrical parameters of soil. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 56(5):1163–1171.
- [12] E. D. Sunde, Earth Conduction Effects in Transmission Systems. New York: Dover Publications, 1968.

[13] De Conti, A. e Visacro, S. (2007). Analytical representation of single-and double-peaked lightning current waveforms. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 49(2):448–451.

[14] MATLAB (2020). The Mathworks, Incorporation, USA. Disponível em: <<https://www.mathworks.com>>. Acesso em: 22 de abr. de 2020.