

MODELAGEM DE ATERRAMENTOS ELÉTRICOS SOLICITADOS POR FENÔMENOS DE ALTA FREQUÊNCIA

Thiago Costa Frade¹; Gustavo Lobato Campos²; Natália Rodrigues de Melo³;

1 Thiago Costa Frade, Bolsista (IFMG), Bacharelado em Engenharia Elétrica, IFMG Campus Formiga, Formiga - MG; thiagocfrade2012@gmail.com

2 Orientador: Gustavo Lobato Campos, Campus Formiga; gustavo.lobato@ifmg.edu.br

3 Coorientadora: Natália Rodrigues de Melo, Campus Formiga; natalia.rds Melo@gmail.com

RESUMO

O aterramento elétrico possui a função de proteger equipamentos elétricos e seres vivos que se encontram em suas proximidades. Para fenômenos de baixas frequências, em que a impedância de aterramento é definida como apenas uma resistência, as equações e análises são bem definidas na literatura, porém quando se trata de fenômenos de altas frequências, como as descargas atmosféricas, há a necessidade de cálculos mais complexos e um maior esforço computacional. Dado o exposto, neste trabalho, fruto de projeto de iniciação científica, é apresentada a modelagem, via software MATLAB, de um sistema de aterramento elétrico através do modelo de linhas de transmissão. São apresentados as equações utilizadas e os resultados de impedância de aterramento e sobretensão na entrada do aterramento quando submetido às primeiras correntes e correntes subsequentes de descarga, medidas na Estação Morro do Cachimbo – MG. Nas análises considera-se os parâmetros do solo constantes e variáveis com a frequência. Com os resultados obtidos observa-se o impacto e a importância de se considerar os parâmetros do solo variáveis com a frequência, que se resulta na aproximação de resultados reais. Enquanto que, quando os parâmetros do solo são considerados constantes com a frequência, a impedância de aterramento e a sobretensão são superestimadas, já que o efeito global da variação da permissividade e condutividade do solo diminuem os valores de impedância. A diferença de valores de pico encontrada entre as curvas de sobretensão, utilizando parâmetros do solo constantes e variáveis com a frequência, foi de 43,12% para as primeiras correntes de descarga e de 50,51% para as correntes de descarga subsequentes. Por fim, observa-se que para a configuração de aterramento simulada, o resultado de sobretensão calculado se aproxima dos valores medidos, sendo a diferença de valor de pico entre as curvas de 7,75%, o que valida o trabalho. A diferença encontrada pode ser associada ao modelo utilizado, que é um modelo com cálculos mais simples e menos preciso que outros modelos.

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 (SILVA, 2016).

O comportamento do aterramento elétrico, considerando fenômenos solicitantes de baixa frequência, é bem definido na literatura e os cálculos para determinação do seu comportamento são relativamente simples [IEEE 2013]. Contudo, 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, além de ter uma complexidade maior na modelagem dos fenômenos eletromagnéticos associados às correntes impulsivas (VISACRO, 2007).

A utilização de modelos matemáticos, que forneçam uma representação física consistente de um sistema de aterramento, é uma alternativa adequada para investigar o seu comportamento quando solicitado por fenômenos de alta frequência, como é o caso das descargas atmosféricas. Por meio da modelagem computacional é possível reproduzir as principais características de sistemas de aterramentos reais e determinar o seu desempenho. (ALÍPIO, 2008).

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 (SUNDE, 1949; GRCEV, 1996; VISACRO, 2002).

Assim, este artigo apresenta resultados de simulações, via *software* MATLAB, de curvas de impedância de aterramento e sobretensão no ponto de injeção de corrente, para primeiras correntes e correntes subsequentes de descarga. A configuração de aterramento simulada possui um eletrodo horizontal e o modelo utilizado é o modelo baseado na teoria de linhas de transmissão, que se fundamenta em equações de propagação de ondas e possui equacionamento mais simples quando comparado a outros métodos, resultando em um esforço computacional menor (SILVA e ALVES 2016).

METODOLOGIA:

Cálculo dos parâmetros do solo

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 [8,854·10⁻¹² F/m].

Ao considerar os parâmetros elétricos do solo variáveis com a frequência, utilizou-se as equações obtidas com base nas medições de campo conduzidas por (VISACRO et al., 2011). Para cálculo da condutividade e permissividade relativa do solo, respectivamente, tem-se as Equações (2) e (3), definidas por (ALÍPIO e VISACRO, 2014):

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

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

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 [1,26x $\sigma_0^{-0,73}$].

γ – Constante relacionada com as propriedades físicas da amostra do solo [0,54].

$\varepsilon'_\infty/\varepsilon_0$ – Permissividade relativa em altas frequências [12].

f – Frequência [Hz].

Cálculo dos parâmetros elétricos

Ao considerar o aterramento composto por um eletrodo horizontal, determina-se a indutância, capacitância e condutância por metro, através das Equações (4), (5) e (6), respectivamente, propostas por (SUNDE, 1968):

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

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

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

Onde:

L – Indutância [H/m].

G – Condutância [S/m].

C – Capacitância [F/m].

μ_0 – Permeabilidade magnética do vácuo [4· π ·10⁻⁷ H/m].

l – Comprimento do eletrodo [m].

ρ_0 – Resistividade do solo [Ω ·m].

r – Raio do eletrodo [m].

h – Profundidade que o eletrodo está inserido no solo [m].

Cálculo da impedância de aterramento

A impedância de aterramento do sistema é calculada pela Equação (7), definida por (SILVA e ALVES 2016):

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

Onde:

Z – Impedância de aterramento [Ω].

Z_0 – Impedância característica [Ω].

$\hat{\gamma}$ – Coeficiente de propagação.

A impedância característica e o coeficiente de propagação são determinados pelas Equações (8) e (9), respectivamente.

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

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

Cálculo da sobretensão no ponto de injeção de corrente

No cálculo de sobretensão no ponto de injeção de corrente, utilizou-se os dados das primeiras correntes e correntes subsequentes de descarga, encontrados em (DE CONTI e VISACRO, 2007), obtidos através de medições realizadas na Estação Morro do Cachimbo – MG. A sobretensão na entrada do aterramento é definida pela Equação (10), definida em (SILVA e ALVES, 2016):

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

Onde:

v – Sobretensão na entrada do aterramento [V].

F^{-1} – Transformada inversa de Fourier.

F – Transformada direta de Fourier.

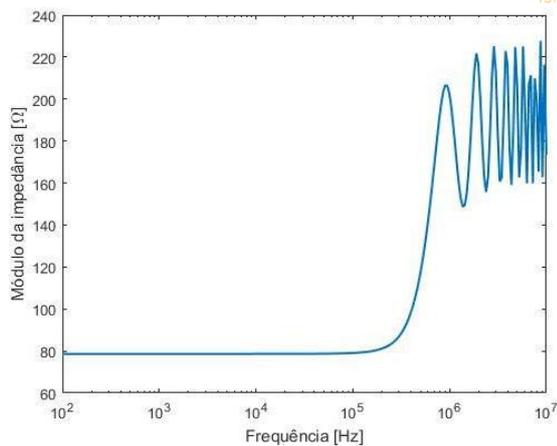
i – Corrente de descarga injetada no sistema [A].

RESULTADOS E DISCUSSÕES:

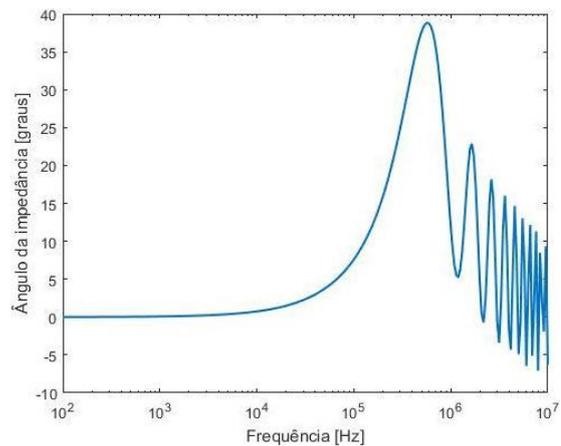
Através do modelo apresentado, foram calculados, mediante ao *software* MATLAB (versão estudante), os parâmetros elétricos do solo e do modelo, a impedância de aterramento e a sobretensão no aterramento com o intuito de caracterizar o comportamento transitório de um sistema de aterramento. As simulações foram feitas considerando um eletrodo horizontal de raio de 7 mm, inserido em uma profundidade de 0,5 m em um solo com resistividade de 2.400 Ω .m. Quando os parâmetros do solo foram considerados constantes com a frequência, a permissividade relativa utilizada foi igual a 15. O comprimento do eletrodo, para os parâmetros do solo constantes com a frequência, foi igual a 59 m. Para os parâmetros do solo variáveis com a frequência, o comprimento do eletrodo utilizado foi de 84 m.

Impedância de aterramento

A partir da configuração de aterramento citada, foram definidas as curvas do módulo e ângulo da impedância de aterramento para parâmetros do solo constantes com a frequência. A Figura 1 ilustra os resultados obtidos.



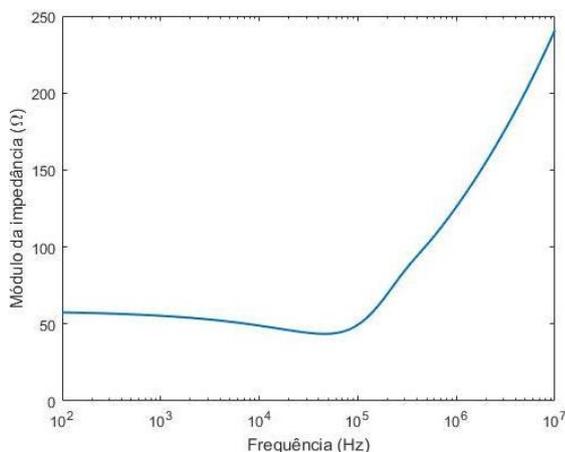
(a)



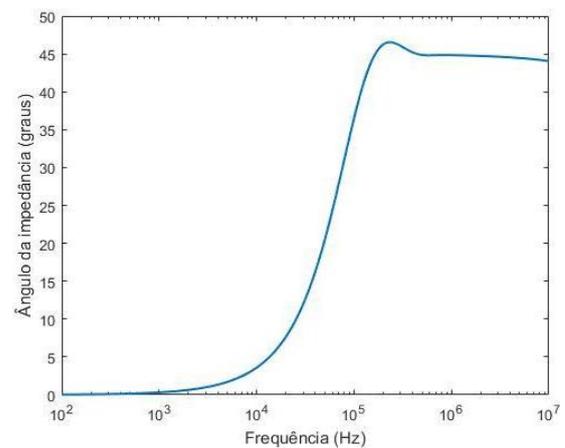
(b)

Figura 1. Módulo (a) e ângulo (b) da impedância de aterramento para parâmetros do solo constantes com a frequência.

Considerando a mesma configuração de aterramento, porém definindo os parâmetros do solo de acordo com as Equações (2) e (3), foram obtidas as curvas do módulo e ângulo da impedância de aterramento para parâmetros do solo variáveis com a frequência. A Figura 2 ilustra os resultados obtidos.



(a)



(b)

Figura 2. Módulo (a) e ângulo (b) da impedância de aterramento para parâmetros do solo variáveis com a frequência.

Com as Figuras 1 e 2 percebe-se que em baixas frequências o módulo da impedância é quase constante e o ângulo praticamente zero. Isso acontece pelo fato da reatância indutiva ser proporcional à frequência e a reatância capacitiva ser inversamente proporcional à frequência, assim o sistema equivalente se caracteriza por uma condutância. Em altas frequências, aproximadamente acima de 10^4 Hz, 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.

Além disso, ao comparar as Figuras 1 e 2, percebe-se que para a configuração de aterramento com parâmetros do solo variáveis com a frequência os valores de impedância de aterramento são menores do que para parâmetros do solo constantes com a frequência. Isso acontece porque a permissividade elétrica do meio diminui em altas frequências, e a condutividade do solo aumenta, portanto, o efeito global da variação desses parâmetros ocasiona na diminuição da impedância de aterramento.

Correntes de descarga

Os dados provenientes de medições na Estação Morro do Cachimbo – MG, obtidos por (DE CONTI e VISACRO, 2007), foram utilizados para digitalização das curvas das primeiras correntes de descarga e correntes subsequentes.

Sobretensão

Com as curvas de impedância de aterramento e de corrente, obtidas anteriormente, calculou-se a elevação de potencial no ponto de injeção de corrente quando o sistema é submetido a uma corrente característica de descarga atmosférica. A Figura 3 ilustra as curvas de sobretensão na entrada do aterramento para parâmetros do solo constantes com a frequência.

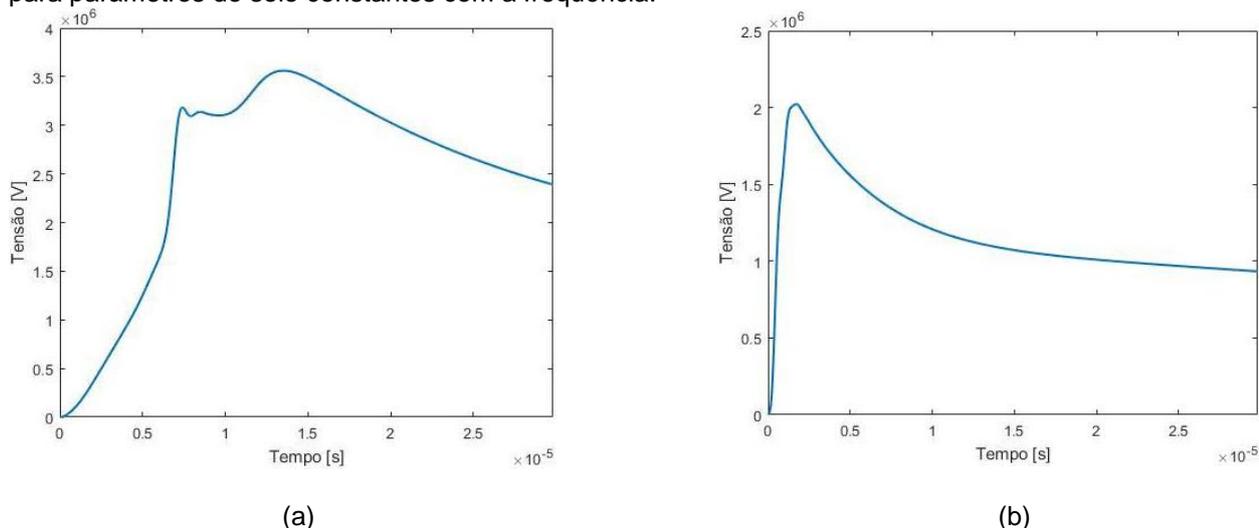


Figura 3. Sobretensão na entrada do aterramento para parâmetros do solo constantes com a frequência, quando submetidos às primeiras correntes (a) e correntes subsequentes (b) de descarga da Figura 4.

A Figura 4 ilustra as curvas de sobretensão na entrada do aterramento para parâmetros do solo variáveis com a frequência.

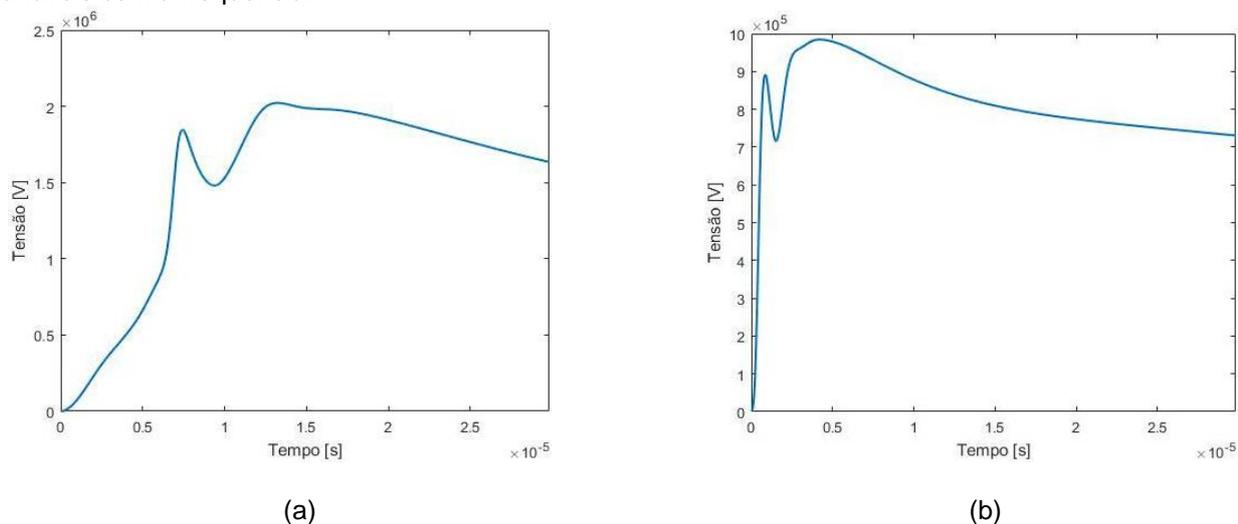


Figura 4. Sobretensão na entrada do aterramento para parâmetros do solo variáveis com a frequência, quando submetidos às primeiras correntes (a) e correntes subsequentes (b) de descarga da Figura 4.

A partir das curvas apresentadas nas Figuras 3 e 4, percebe-se que, com as curvas de sobretensão para as primeiras correntes de descargas, a diferença dos valores de tensão de pico é de aproximadamente 1,577 MV, sendo uma diferença percentual de 43,12%. Enquanto que, com a tensão para as correntes de descarga subsequentes, a diferença de tensão de pico é de 1,036 MV, sendo uma diferença percentual de 50,51%. A diferença obtida é justificada pelo fato de que, ao considerar os parâmetros do solo constantes

com a frequência, os resultados de impedância de aterramento, e consequentemente de sobretensão, são superestimados, devido à proporcionalidade entre estas grandezas.

Validação dos resultados

A fim de validar o código e os resultados obtidos, digitalizou-se a curva de corrente obtida de dados medidos por Electricité de France (EDF), através da ferramenta WebPlotDigitizer. A impedância de aterramento foi calculada considerando, de acordo Rochereau (1988), um aterramento com um eletrodo horizontal com 8 m de comprimento, raio de 6 mm, inserido no solo a uma profundidade de 0,6 m. A resistividade do solo considerada é de $65 \Omega \cdot m$ e a permissividade relativa igual a 15.

Através da curva de corrente digitalizada e com o cálculo da impedância de aterramento, definiu-se a sobretensão no ponto de injeção de corrente e comparou-se com a curva obtida através de dados de medições. A Figura 5 ilustra o resultado obtido.

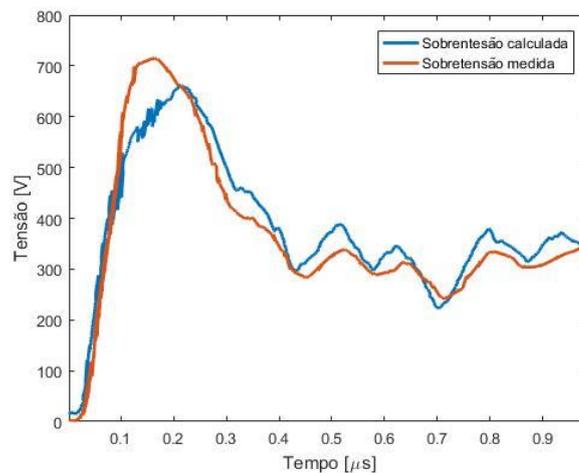


Figura 5. Sobretensão calculada e medida na entrada do aterramento ao injetar a corrente digitalizada no aterramento.

Com as curvas da Figura 5, percebe-se que a sobretensão calculada se encontra bem próxima da curva obtida através das medições de campo. A diferença percentual do valor de pico das curvas é de 7,75% e pode ser associada a precisão do modelo utilizado para modelar o aterramento elétrico, que possui cálculos mais simples e resultados menos precisos que outros modelos, como por exemplo, o HEM (*Hybrid Electromagnetic Model*).

CONCLUSÕES:

Este resumo expandido apresenta resultados oriundos do projeto de iniciação científica intitulado “Modelagem de Aterramentos Elétricos Solicitados por Fenômenos de Alta Frequência”, vinculado ao Grupo de Soluções de Engenharia (GSE) do Instituto Federal de Minas Gerais – *Campus* Formiga. Neste trabalho são apresentados resultados de impedância de aterramento e sobretensão no ponto de injeção de corrente do aterramento quando submetido às primeiras correntes e correntes subsequentes de descarga, medidas na Estação Morro do Cachimbo – MG, através da simulação, com o *software* MATLAB, da modelagem por linhas de transmissão de um aterramento elétrico composto por um eletrodo horizontal. Nas análises, os parâmetros do solo são considerados constantes e variáveis com a frequência.

Com os resultados apresentados percebe-se que, ao considerar os parâmetros do solo constantes com a frequência, tanto a impedância de aterramento (módulo e ângulo), quanto a sobretensão são superestimadas. Assim, ao considerar os parâmetros do solo variáveis com a frequência, percebe-se que os resultados se aproximam mais de resultados reais, isso porque a permissividade do meio diminui em altas frequências, enquanto a condutividade do solo aumenta, e o efeito destas variações ocasionam na diminuição da impedância de aterramento.

Ao comparar o resultado de sobretensão calculado com a sobretensão medida em campo, observa-se que os resultados se encontram próximos, o que valida a modelagem por linhas de transmissão realizada neste trabalho. A diferença entre as curvas calculadas e medidas podem ser associadas à precisão do modelo utilizado.

Por fim, destaca-se a importância de trabalhos nesta área, visto que as simulações representam o dimensionamento e a análise do comportamento de sistemas de aterramentos elétricos, que precisam ser dimensionados adequadamente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

- ALÍPIO, R. S.; VISACRO, S. Modeling the Frequency Dependence of Electrical Parameters of Soil. **IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility**, Estados Unidos da América, v. 56, n. 5, p. 1163-1171, 09 mai. 2014. ISSN 1558-187X. DOI: 10.1109/TEMC.2014.2313977.
- ALÍPIO, Rafael Silva. **Modelagem Eletromagnética de Aterramentos Elétricos nos Domínios do Tempo e da Frequência**. 2008. Dissertação (Mestrado em Modelagem Matemática e Computacional) - Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.
- DE CONTI, A.; VISACRO, S. Analytical Representation of Single-and Double-Peaked Lightning Current Waveforms. **IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility**, Estados Unidos da América, v. 49, n. 2, p. 448-451, 18 jun. 2007. ISSN 1558-187X. DOI: 10.1109/TEMC.2007.897153.
- GRCEV, L. D. Computer analysis of transient voltages in large grounding systems. **IEEE Transactions on Power Delivery**, Estados Unidos da América, v. 11, n. 2, p. 815-823, abr. 1996. ISSN 1937-4208. DOI: 10.1109/61.489339.
- The Institute of Electrical and Electronics Engineers Power Engineering Society. **IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding**. Nova Iorque, 2013.
- ROCHEREAU, H. Response of earth electrodes when fast fronted currents are flowing out. EDF Buletin de la Direction des Etudes et Recherches, **Electricité de France**, serie B, n. 2, 1998, p. 13–22.
- ROHATGI, A. WebPlotDigitizer: Web based tool to extract data from plots, images and maps, 2010. Disponível em: <<https://automeris.io/WebPlotDigitizer/>>. Acesso em: 10 nov. 2020.
- Silva, Bárbara Pereira. **Modelagens e Solução de Aterramentos Sujeitos a Surtos de Corrente: Respostas nos Domínios da Frequência e do Tempo**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2016.
- SILVA, B. P.; ALVES, A. C. B. 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, Natal. **Anais [...]**. Goiânia: Universidade Federal de Goiás, 2016, p. 1-7.
- Sunde, E. D. **Earth conduction effects in transmission systems**. Nova Iorque: Dover Publications Inc, 1949
- Sunde, E. D. **Earth Conduction Effects in Transmission Systems**. Nova Iorque: Dover Publications Inc, 1968.
- VISACRO, S. A Comprehensive Approach to the Grounding Response to Lightning Currents. **IEEE Transactions on Power Delivery**, Estados Unidos da América, v. 22, n. 1, p. 381-386, 26 dez. 2006. ISSN 1937-4208. DOI: 10.1109/TPWRD.2006.876707.
- VISACRO, S. **Aterramentos elétricos: conceitos básicos, técnicas de medição e instrumentação, filosofias de aterramento**. São Paulo: Artliber Editora Ltda, 2012.
- VISACRO, S. et al. The Response of Grounding Electrodes to Lightning Currents: The Effect of Frequency-Dependent Soil Resistivity and Permittivity. **IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility**, Estados Unidos da América, v. 53, n. 2, p. 401-406, 03 mar. 2011. ISSN 1558-187X. DOI: 10.1109/TEMC.2011.2106790.

Participação em Congressos, publicações e/ou pedidos de proteção intelectual:

MODELAGEM DE UM ATERRAMENTO ELÉTRICO CONSIDERANDO SOLICITAÇÕES EM ALTA FREQUÊNCIA. Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia, COBENGE 2020 – Publicação e apresentação de artigo. Link: http://abenge.org.br/sis_artigo_doi.php?e=COBENGE&a=20&c=3135

FENÔMENOS DE ALTA FREQUÊNCIA EM MODELAGEM DE ATERRAMENTOS ELÉTRICOS. Conferência de Estudos em Engenharia Elétrica, CEEL 2020 – Publicação e apresentação de artigo. Link: https://www.peteletricaufu.com/static/ceel/artigos/artigo_570.pdf