



# Modelagem de Aterramentos Elétricos Solicitados por Descargas Atmosféricas

Thiago Costa Frade<sup>1</sup>, Gustavo Lobato Campos<sup>1</sup>, Natália Rodrigues de Melo<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Instituto Federal de Minas Gerais – *Campus* Formiga (IFMG)  
Rua Padre Alberico, 440 – Bairro São Luiz 35570-010 – Formiga – MG – Brasil

thiagocfrade2012@gmail.com, gustavo.lobato@ifmg.edu.br,  
natalia.rdsmelo@gmail.com

**Abstract.** *The main function of electrical grounding is to protect electrical equipment and living beings located in its vicinity. Thus, the accurate modelling of these systems is very important. The modelling of low frequency occurrences are well defined in the literature, but on the other hand for high frequency phenomena, as lightning, it is required more complex calculations and greater computational effort. This article presents the modelling of a grounding with a horizontal electrode applying the transmission line model. Parameters such as the grounding impedance and the potential rise of the system are defined, considering the soil parameters constant as well as variable with frequency.*

**Resumo.** *A principal função do aterramento elétrico é proteger equipamentos elétricos e seres vivos que se encontram nas suas proximidades. Portanto, é fundamental que esses sistemas sejam modelados adequadamente. Para fenômenos de baixas frequências, esses sistemas são bem definidos na literatura, porém para fenômenos de altas frequências, como é o caso das descargas atmosféricas, há a necessidade de cálculos mais complexos e um maior esforço computacional. Este artigo apresenta resultados da modelagem de um aterramento elétrico, composto por um eletrodo horizontal, através do modelo de linhas de transmissão. São definidos a impedância de aterramento e a sobretensão na entrada do sistema, para isso, considera-se os parâmetros do solo constantes e variáveis com a frequência.*

## 1. 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. 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 [ALIPIO 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]. 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 [SCHROEDER et al. 2012].

Dado o exposto, este artigo apresenta os resultados de simulações computacionais em que foram obtidas as curvas de impedância de aterramento e sobretensão, para um aterramento elétrico composto por um eletrodo horizontal, solicitado por correntes características de descargas atmosféricas. A modelagem utilizada é baseada na teoria de linhas de transmissão (TLM, *Transmission-Line Modeling Model*), que se baseia 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]. Destaca-se ainda que este artigo é resultado de pesquisa de iniciação científica.

## 2. Desenvolvimento do modelo

A modelagem por linhas de transmissão divide o eletrodo em “M” segmentos, e cada segmento é representado por um circuito com uma indutância, uma capacitância e uma condutância. O equivalente desses M circuitos resulta na impedância de aterramento do aterramento elétrico analisado. A resistência por metro pode ser desconsiderada, pois as perdas internas ao condutor devido à resistência são pequenas quando comparadas com as perdas para o solo. A Figura 1 representa o circuito equivalente de um eletrodo utilizando o modelo TLM.

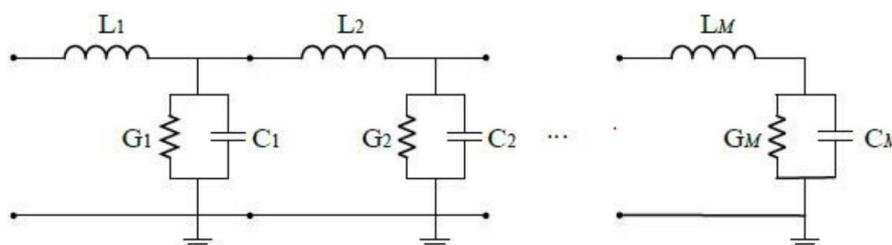


Figura 1. Circuito elétrico simplificado de um eletrodo utilizando o modelo TLM.



## 2.1. Cálculo dos parâmetros do solo

Para as simulações do comportamento do aterramento elétrico analisadas considerou-se tanto os parâmetros do solo constantes com a frequência como variáveis. A análise dos efeitos dos parâmetros do solo, sendo constantes ou variáveis com a frequência, permite identificar o impacto e a importância da consideração desses efeitos ao modelar a impedância de aterramento e a sobretensão do sistema. 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:

$\varepsilon$  – Permissividade elétrica [F/m].

$\varepsilon_r$  – Permissividade relativa.

$\varepsilon_0$  – Permissividade do vácuo [ $8,854 \cdot 10^{-12}$  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 [ALIPIO 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:

$\sigma$  – Condutividade do solo [mS/m].

$\sigma_0$  – 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.

$\gamma$  – Constante relacionada com as propriedades físicas da amostra do solo.

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

$f$  – Frequência [Hz].

Os parâmetros  $h(\sigma_0)$ ,  $\gamma$  e  $\varepsilon'_\infty/\varepsilon_0$  estão indicados na Tabela 1, 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 mais se aproximam de situações reais, ou seja, não são superestimados e nem subestimados.

**Tabela 1. Parâmetros do modelo proposto.**

Tipos de resultados	Função $h(\sigma_0)$	$\gamma$	$\varepsilon'_\infty/\varepsilon_0$
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

## 2.2. 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].

$\mu_0$  – Permeabilidade magnética do vácuo [ $4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$  H/m].

$l$  – Comprimento do eletrodo [m].

$\rho_0$  – Resistividade do solo [ $\Omega \cdot m$ ].

$r$  – Raio do eletrodo [m].

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

## 2.3. 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 [ $\Omega$ ].

$Z_0$  – Impedância característica [ $\Omega$ ].

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

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



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

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

#### 2.4. Cálculo da sobretensão no ponto de injeção de corrente

Neste estudo de caso, a sobretensão no aterramento foi determinada no ponto de injeção de corrente. Para isso, foram utilizados 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.

Como a impedância de aterramento é determinada no domínio da frequência e a corrente de descarga no domínio do tempo, foi aplicada a Transformada de Fourier para obter a resposta da corrente no domínio da frequência para, assim, calcular a tensão na entrada do aterramento. Posteriormente, foi aplicada a Transformada inversa de Fourier no resultado obtido, para definir a sobretensão no domínio do tempo. Assim, 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].

### 3. Estudo de caso

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 ponto de injeção de corrente no aterramento com o intuito de caracterizar o comportamento transitório de um sistema composto por um eletrodo horizontal. 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  $\Omega$ .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.

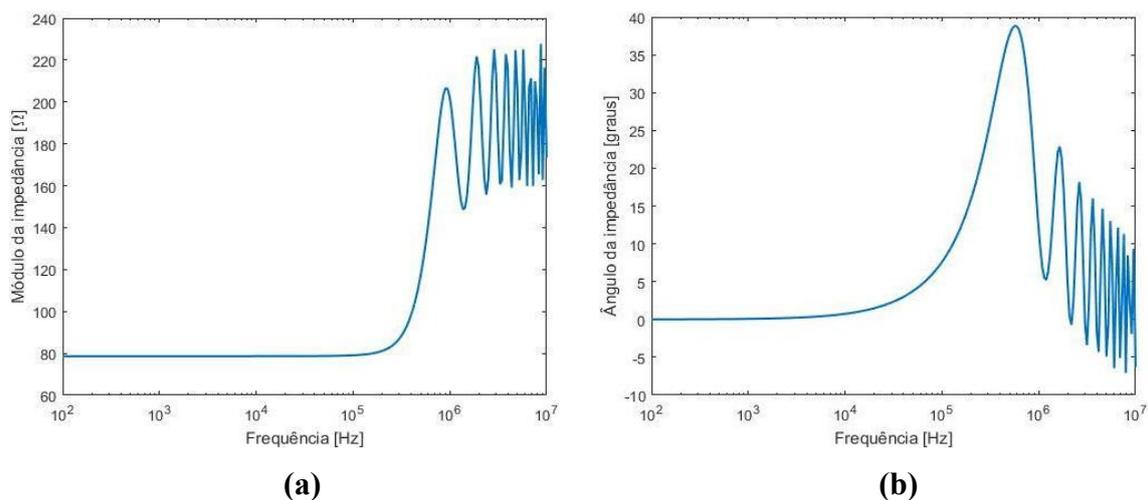
#### 3.1. Impedância de aterramento

Com a configuração de aterramento citada acima, foram definidas as curvas do módulo e ângulo da impedância de aterramento para parâmetros do solo constantes com a frequência. Para as simulações a seguir, utilizou-se o comprimento do eletrodo determinado para as primeiras correntes de descarga indicados na Tabela 2.

**Tabela 2.** Valores de comprimento do eletrodo para as primeiras descargas e descargas subsequentes, considerando a variação ou não dos parâmetros elétricos do solo, resistividade  $\rho$  e  $\epsilon$ , com a frequência.

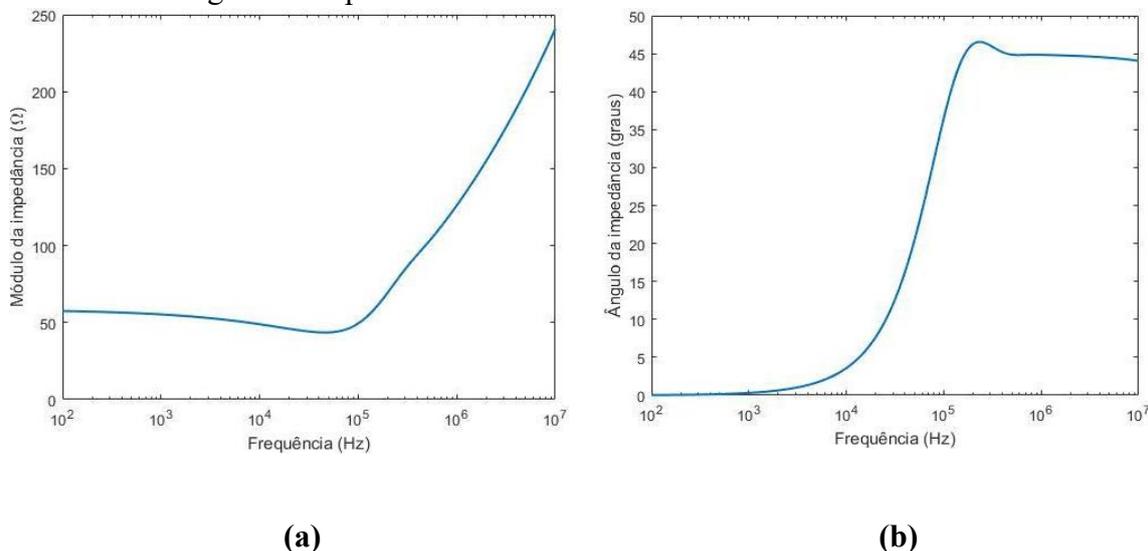
$\rho_0$	l (m)			
	$\rho$ e $\epsilon$ constantes		$\rho(\omega)$ e $\epsilon(\omega)$	
	Primeiras descargas	Descargas subsequentes	Primeiras descargas	Descargas subsequentes
50	8	3	9	4
100	11	6	12	6
300	19	11	23	12
500	25	13	31	15
600	27	14	35	17
800	32	14	42	21
1.000	35	20	49	26
1.500	45	21	63	35
2.400	59	32	84	39
3.000	67	42	96	46
4.000	82	53	120	60
5.000	95	61	140	70
10.000	168	105	190	108

Na Figura 2 são apresentados os resultados obtidos.



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

No cálculo da impedância de aterramento para parâmetros do solo variáveis com a frequência considerou-se o aterramento com as mesmas características, porém agora com os parâmetros do solo descritos pelas Equações (2) e (3). A Figura 3 ilustra os resultados de módulo e ângulo da impedância de aterramento obtidos.



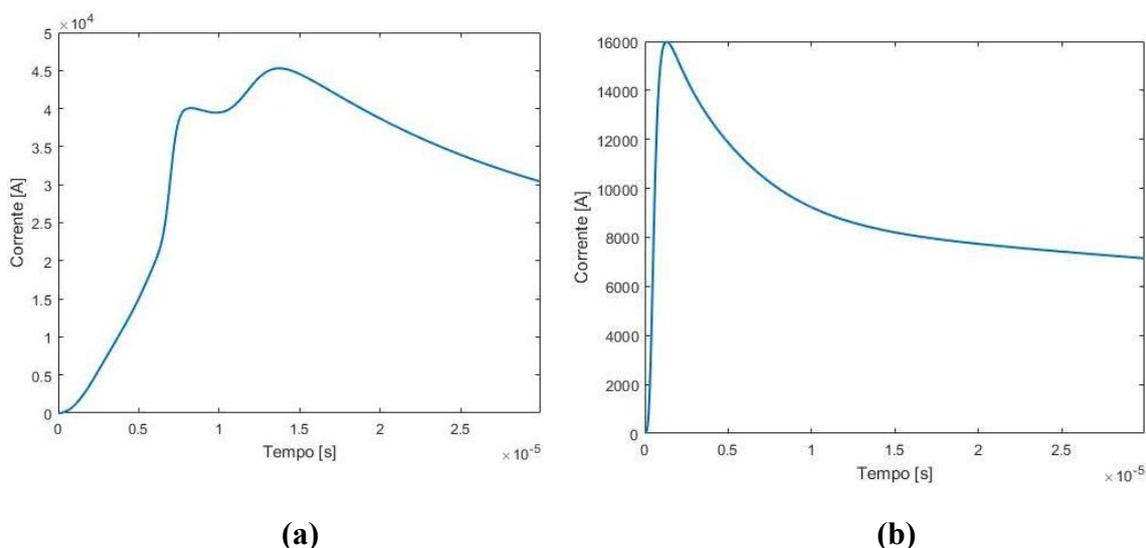
**Figura 3. Módulo (a) e ângulo (b) da impedância de aterramento para parâmetros do solo variáveis com a frequência.**

Por meio das Figuras 2 e 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  $10^4$  Hz como mostrado nas Figuras 2 e 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.

Além disso, ao comparar as Figuras 2 e 3, 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.

### 3.2. Correntes de descarga

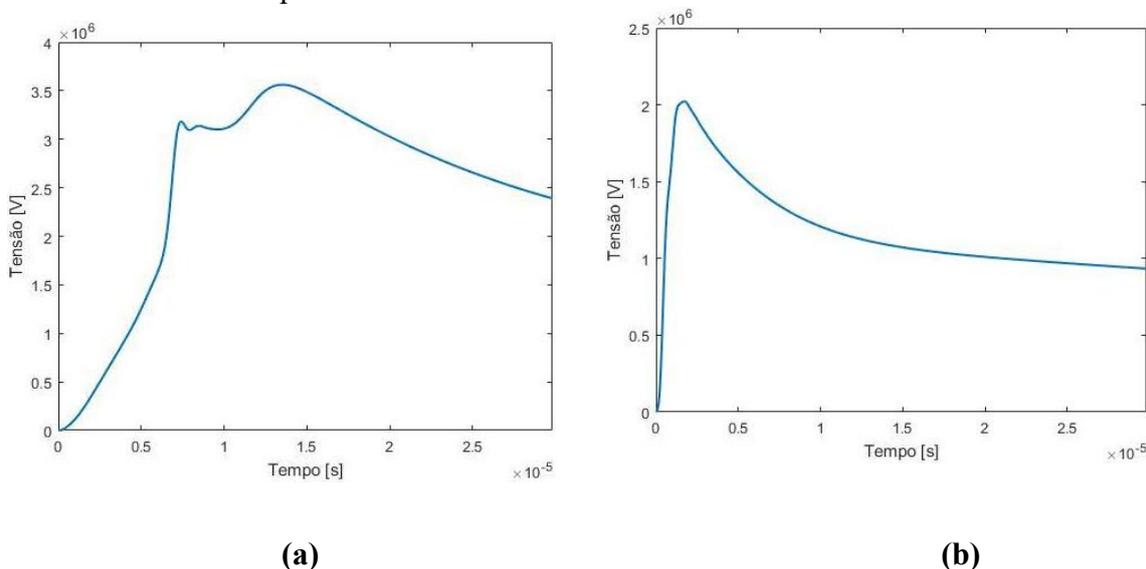
Os dados provenientes de medições na Estação Morro do Cachimbo – MG, obtidos por [DE CONTI E VISACRO 2007], foram utilizados para obtenção das curvas das primeiras correntes de descarga e correntes subsequentes (Figura 4), a fim de calcular a sobretensão no aterramento.



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

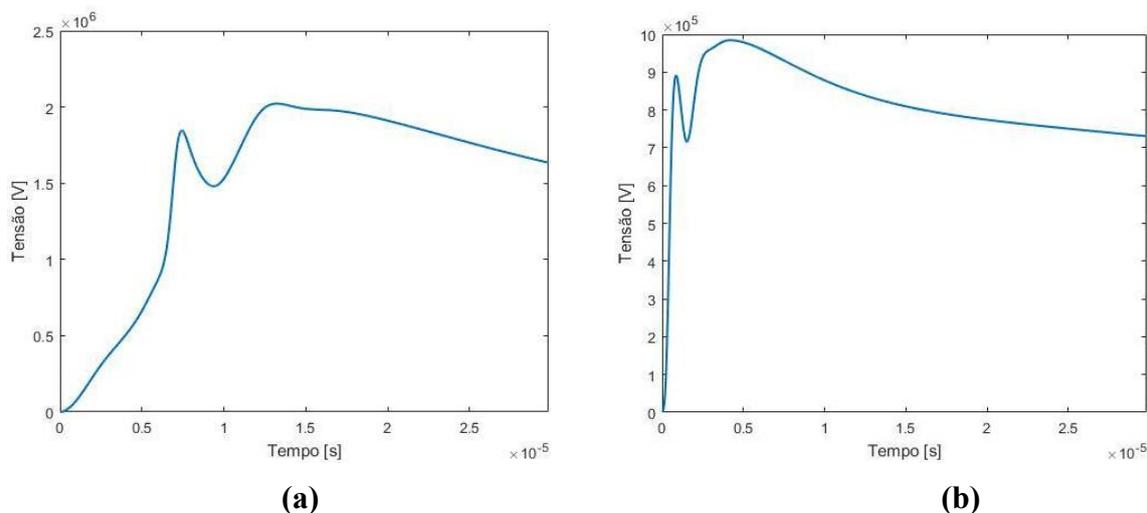
### 3.3. Sobretensão

A partir dos valores da impedância de aterramento e corrente, obtidos 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 5 ilustra as curvas de sobretensão na entrada do aterramento para parâmetros do solo constantes com a frequência.



**Figura 5. 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 6 ilustra as curvas de sobretensão na entrada do aterramento para parâmetros do solo variáveis com a frequência.



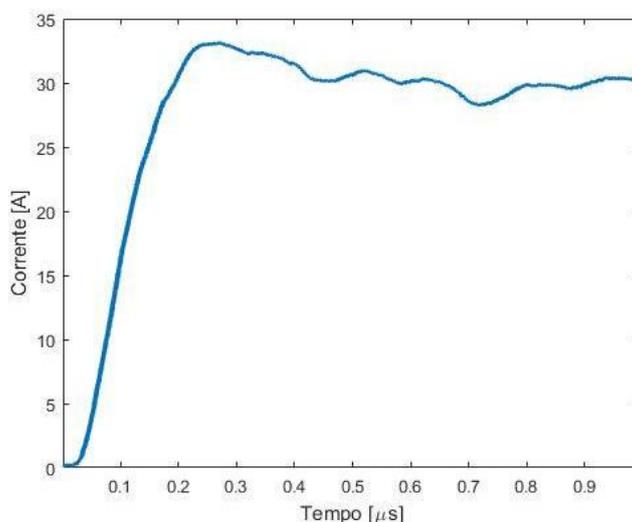
**Figura 6. Sobretensão na entrada do aterramento para parâmetros do solo variáveis com a frequência, quando submetidos às primeiras correntes (a) e correntes subsequentes (b) de descarga da Figura 4.**

Com os resultados apresentados nas Figuras 5 e 6, percebe-se que a diferença no valor de tensão de pico entre as curvas de sobretensão para as primeiras correntes de descargas é de 1,577 MV, totalizando em uma diferença percentual de aproximadamente 43,12%. Já nas curvas de tensão para as correntes de descarga subsequentes, a diferença de tensão de pico é de 1,036 MV, sendo a diferença percentual de aproximadamente 50,51%.

Essa diferença é justificada pelo fato de ao considerar os parâmetros do solo constantes com a frequência, os resultados de impedância de aterramento são superestimados, e consequentemente, os resultados de sobretensão também o são, já que a tensão é proporcional à impedância de aterramento.

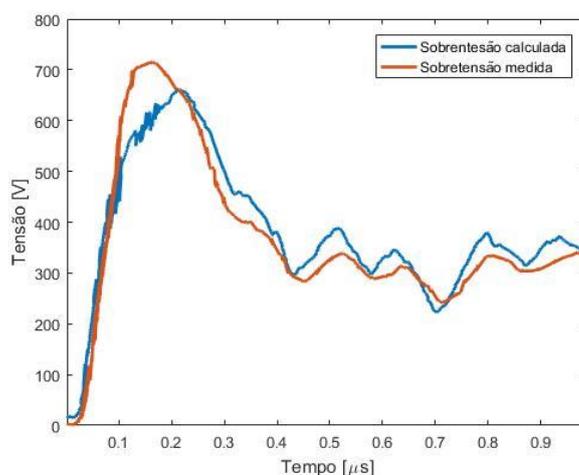
### 3.4. Validação dos resultados

Para validar os resultados obtidos, digitalizou-se a curva de corrente impulsiva obtida através de dados medidos por Electricité de France (EDF), por meio de uma ferramenta de digitalização denominada WebPlotDigitizer. A configuração do aterramento consiste em um eletrodo horizontal de 8 m de comprimento, com raio igual a 6 mm, inserido no solo a uma profundidade de 0,6 m. De acordo com Rochereau (1988), a resistividade do solo é de 65  $\Omega \cdot m$  e a permissividade relativa é igual a 15. A Figura 7 ilustra a curva obtida.



**Figura 7. Onda de corrente injetada no eletrodo.**

Com a curva de corrente digitalizada e com o cálculo da impedância de aterramento, foi definida a curva de sobretensão na entrada do aterramento e comparada com os dados de medições. A Figura 8 mostra o resultado obtido.



**Figura 8. Sobretensão calculada e medida na entrada do aterramento ao injetar a corrente da Figura 7 no aterramento.**

Com a curva da Figura 8, percebe-se que o resultado encontrado está bem próximo da sobretensão medida. A diferença percentual do valor de pico 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 modelo HEM (*Hybrid Electromagnetic Model*), cuja modelagem é baseada nas equações de campo e teoria de circuitos.



#### 4. Conclusões

Este artigo contempla resultados oriundos do projeto de pesquisa 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. São apresentados e discutidos resultados da modelagem por linhas de transmissão de um aterramento elétrico constituído por um eletrodo horizontal. Incluem nestes resultados a impedância de aterramento, considerando os parâmetros do solo constantes e variáveis com a frequência, e a sobretensão na entrada do aterramento quando submetido às primeiras correntes e correntes subsequentes de descarga, medidas na estação Morro do Cachimbo – MG.

Através dos resultados apresentados observa-se que, ao considerar no cálculo da impedância de aterramento os parâmetros do solo constantes com a frequência, os resultados de impedância (módulo e ângulo) e de sobretensão são superestimados. Assim, ao considerar os parâmetros do solo variáveis com a frequência, os resultados obtidos se aproximam mais de resultados reais.

Por fim, destaca-se a importância de trabalhos nesta área, visto que as simulações computacionais representam uma alternativa para representação do sistema de aterramento de forma mais fiel ao real, além de contribuir para um dimensionamento mais adequado desses sistemas.

#### Referências

- Alípio, R. e Visacro, S. (2014). Modeling the frequency dependence of electrical parameters of soil. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 56(5):1163–1171.
- 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.
- 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.
- Grcev, L. D. (1996). Computer analysis of transient voltages in large grounding systems. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 11(2):815–823.
- IEEE Std 80 (2013). IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding. Substations Committee of the IEEE Power Engineering Society.
- MATLAB (2020). The Mathworks, Incorporation, USA. Disponível em: <www.mathworks.com>. Acesso em: 22 de abr. de 2020.
- Melo, Natália Rodrigues de. Limites Práticos do Uso da Função Pulso para Avaliação do Comportamento Transitório de Aterramentos Elétricos. 2019. 150 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Associação Ampla entre a Universidade Federal de São João del-Rei e o Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, São João del-Rei, 2019.



- Rochereau, H. (1988). 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, 2:13–22.
- Rohatgi, A. (2010). WebPlotDigitizer: Web based tool to extract data from plots, images and maps. Disponível em: <<https://automeris.io/WebPlotDigitizer/>>. Acesso em: 10 de nov. de 2020.
- 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.
- 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.
- 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.
- Sunde, E. D. (1949). *Earth conduction effects in transmission systems*. Dover Publications Inc.
- Sunde, E. D. *Earth Conduction Effects in Transmission Systems*. New York: Dover Publications, 1968.
- Visacro, S. (2007). A comprehensive approach to the grounding response to lightning currents. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 22(1):381–386.
- Visacro, S. (2002). *Aterramentos elétricos: conceitos básicos, técnicas de medição e instrumentação, filosofias de aterramento*. Artliber.
- 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.