



Reconectando Pessoas,
Ciências, Artes e
Tecnologia

Anais do

XI Congresso de Engenharias da UFSJ

Part of ISSN 2237-0358

Conteúdo disponível em: doi.org/10.29327/1317088.11-1



IMPACTO DA DESCONSIDERAÇÃO DA CORRENTE DE DESLOCAMENTO EM ESTUDOS ENVOLVENDO RESPOSTA IMPULSIVA DE ATERRAMENTOS ELÉTRICOS

Luiz G. Marroquim ⁽¹⁾ (luizmarroquim.ufsj@gmail.com)

Rodolfo A. R. Moura ⁽¹⁾ (moura@ufsj.edu.br)

Marco A. O. Schroeder ⁽¹⁾ (schroeder@ufsj.edu.br)

⁽¹⁾ Universidade Federal de São João del-Rei (UFSJ) – DEPEL – Pça. Frei Orlando, 170 – Centro

RESUMO: Esse artigo apresenta um estudo sobre o impacto da permissividade elétrica em um modelo do solo dependente da frequência utilizando um sistema de aterramento como base. Durante anos, o efeito de descargas elétricas em sistemas elétricos de potência tem sido o principal estudo de uma grande variedade de pesquisadores. Foi descoberto que os parâmetros do solo variam de acordo com a frequência e com suas inerentes características, tais como composição e organização de partículas. Portanto, o intuito desse trabalho é apresentar dados demonstrando o efeito da permissividade elétrica nas tensões induzidas de condutores enterrados, através de uma simulação em um modelo híbrido (HEM).

PALAVRAS-CHAVE: Sistemas de aterramento, HEM, Dependência da frequência em parâmetros do solo.



Os autores são os únicos detentores dos direitos autorais.

São João del-Rei, Minas Gerais, Brasil

25-29 de setembro de 2023

[B.L. Resende](#), [C.M. Vale](#) & [R.J. Silva](#) (Organização & Edição)

1. INTRODUÇÃO

O aterramento elétrico tem papel fundamental nos Sistemas Elétricos de Potência, visto que ele proporciona um caminho para a circulação de correntes indesejadas para terra (curto-circuito ou descargas atmosféricas, por exemplo). Adicionalmente, a resposta para fenômenos lentos que solicitam aterramentos elétricos é relativamente bem caracterizada na literatura [1]. Por outro lado, a resposta impulsiva ainda é tema de investigação [2]. Dentre os temas de investigação de aterramentos elétricos, a representação do solo é um dos temas de grande discussão, pois ele é o fator de maior influência nas elevações de tensão em condutores enterrados [3].

Dito isso, é importante entender que o solo é uma estrutura complexa, composta por diferentes tipos de matéria, organizações de partículas, porosidades e temperaturas. Ele é ainda influenciado por fatores geográficos e climáticos, tornando difícil a criação de um método que possa compreender totalmente tais variações [4]. Entretanto, alguns autores propuseram modelos para exprimir da melhor forma essas variáveis, como é o caso dos trabalhos envolvendo aterramentos elétricos cujos métodos se baseiam num solo homogêneo, com as mesmas condições independentemente da profundidade.

Contudo, para contornar esse problema, a heterogeneidade do solo pode ser expressa por meio de camadas (estratificações), onde em cada uma os parâmetros eletromagnéticos do solo (condutividade e permissividade elétricas e permeabilidade magnética) são definidos como invariáveis no espaço. Sendo assim, com o intuito de considerar essa estratificação em modelos de aterramentos elétricos que representam a resposta em baixas frequências, tem-se como premissa a inexistência de corrente de deslocamento. Nesses casos, existem equações capazes de representar o sistema por meio de coeficientes de reflexão, sendo possível até definir um meio equivalente capaz de representar o solo como um único meio uniforme [5].

Nesse sentido, existem trabalhos na literatura que modelam a resposta dinâmica de aterramentos elétricos considerando a estratificação do solo [6 – 10]. Dentre os trabalhos citados, pode-se destacar os trabalhos [6,7] que apresentam coeficientes de reflexão baseados apenas na condutividade do solo, i.e., desconsiderando a corrente de deslocamento para obtenção desses parâmetros. É válido ressaltar que, apesar de desconsiderar a corrente de deslocamento no cálculo dos coeficientes de reflexão, os autores não a desprezam no modelo matemático que estima a impedância harmônica do aterramento.

Com o intuito de investigar a possibilidade de representar solos estratificados por solos homogêneos, em fenômenos rápidos (especialmente aqueles relacionados com às descargas atmosféricas), de maneira similar ao que é feito para fenômenos lentos, esse trabalho investiga o impacto da desconsideração da corrente de deslocamento em modelos de aterramentos elétricos para fenômenos impulsivos. Verificando os limites de validade desse fenômeno, trabalhos futuros poderão lidar com representações mais simplificadas, ganhando tempo computacional e facilidade na implementação computacional. Para obter a impedância de aterramento nos diferentes casos analisados, divide-se esse artigo em 4 seções, considerando essa introdutória. Na Seção 2 são apresentados os modelos numéricos para a estimativa do aterramento elétrico. Na Seção 3 são apresentados os resultados e na Seção 4 as considerações finais desse trabalho.

2. METODOLOGIA

Visando um modelo preciso de aterramento elétrico foi utilizado o HEM [11], um método híbrido que garante uma precisão alta, consequência da aplicação direta das equações de campo utilizadas em sua dedução, e um custo computacional menor, diretamente relacionado com sua mesclagem com modelos de circuitos elétricos. Com este método é feita a análise transitória de aterramentos elétricos, necessária nos casos em que há excitações de fontes de natureza impulsiva, como é o caso das descargas atmosféricas [12].

Adicionalmente, é importante comentar que, todo meio material pode ser representado macroscopicamente, para estudos envolvendo a teoria eletromagnética, por três parâmetros: condutividade elétrica (σ), que representa o consumo de energia por efeito Joule; permeabilidade magnética (μ), associada a energia dos campos magnéticos do sistema, e permissividade elétrica (ϵ), associada a energia dos campos elétricos do sistema. Ademais, o solo é uma estrutura complexa em que suas propriedades elétricas (condutividade e permissividade) variam com a frequência. Para compreender tal fenômeno, nas últimas décadas foram necessárias diversas análises laboratoriais, além de uma gama extensa de métodos numéricos baseados nas Equações de Maxwell [13 – 15].

Considerando a complexidade da modelagem de aterramentos elétricos frente às descargas atmosféricas, essa seção apresenta, de maneira sucinta, a modelagem do aterramento elétrico por meio do HEM e modelagem da natureza dispersiva do solo, ou seja, sua variação com a frequência, por meio do trabalho de Alipio-Visacro [15]. Vale ressaltar que o trabalho de Alipio-Visacro foi escolhido por ter sido realizado com amostras nacionais e as medições feitas em *loco*.

2.1. Modelagem do aterramento elétrico

Um condutor enterrado, sujeito à uma corrente de excitação, é capaz de gerar duas correntes principais, chamadas de: i) I_T (corrente transversal) – corrente essa que flui do condutor para o meio que o envolve (nesse caso o solo), associada ao comportamento divergente do campo eletromagnético e ii) I_L (corrente longitudinal) - corrente essa que flui ao longo do condutor, associada ao comportamento não-conservativo do campo eletromagnético. Ambas as correntes estão exemplificadas na Figura 1.

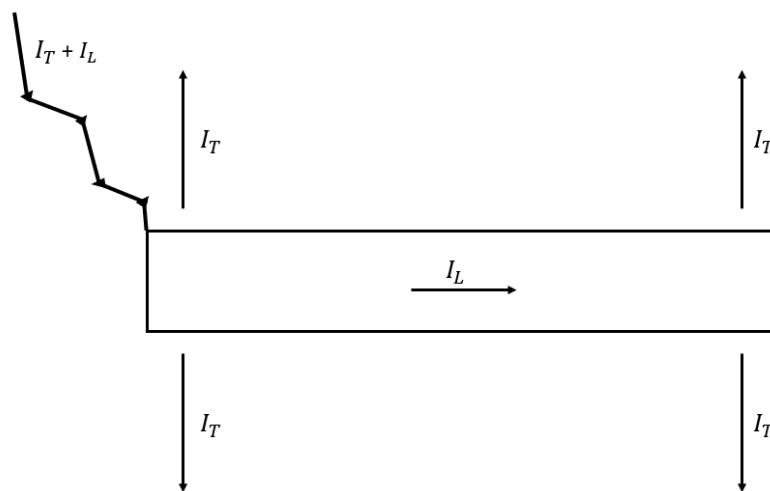


FIGURA 1. Diagrama do problema proposto.

Para calcular tal fenômeno, o modelo HEM propõe uma segmentação dos condutores, onde cada parte é analisada separadamente e suas influências são contabilizadas. Foi utilizado uma segmentação total de $10r$ no qual r é o raio do condutor aterrado. Essa é uma prática comum em análises do gênero para garantir uma precisão elevada, mantendo a aproximação de fios finos [16]. Esses pequenos intervalos conseguem exemplificar bem a complexidade do sistema, visto que cada um será responsável por gerar uma tensão induzida no ponto de interesse. Os acoplamentos são tanto mútuos quanto próprios e suas equações (Equação 1 e 2) são deduzidas a partir de Equação 3 e 4.

$$V_{ij} = Z_{Tij} I_{Tj}$$

$$Z_{Tij} = \frac{1}{4\pi(\sigma + j\omega\epsilon)L_j L_i} \int_{L_i} \int_{L_j} \frac{e^{-kb}}{b} dl_j dl_i \quad (1)$$

$$\Delta V_{ij} = Z_{Lij} I_{Lj}$$

$$Z_{Lij} = -j \frac{\omega \mu}{4\pi} \int_{L_i} \int_{L_j} \frac{e^{-kb}}{b} d\vec{l}_j \cdot d\vec{l}_i \quad (2)$$

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

$$\vec{E} = -\nabla V \quad (4)$$

onde i é um elemento do solo e j o condutor emissor do campo; ΔV_{ij} é a queda de tensão no segmento i devido ao I_L ; V_{ij} o potencial médio devido à irradiação da corrente I_T ; b é a distância entre i e j , k é a constante de propagação do campo, ω é a frequência angular e L é o comprimento do elemento.

Tendo o caminho da corrente particionado, cada par de elementos (i e j) são computados utilizando a lei de Ohm, onde o potencial médio em cada parte é calculado pela soma das contribuições transversais, ou seja, $V_i = Z_{Ti1} I_{T1} + Z_{Ti2} I_{T2} + \dots + Z_{Tin} I_{Tn}$. Em contrapartida, a queda de tensão ocorre devido às componentes longitudinais da corrente, $\Delta V_i = Z_{Li1} I_{L1} + Z_{Li2} I_{L2} + \dots + Z_{Lin} I_{Ln}$. Com essas informações é possível obter as relações das Equações 5 e 6.

$$\begin{bmatrix} V \\ \Delta V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_T & 0 \\ 0 & Z_L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_T \\ I_L \end{bmatrix} \quad (5)$$

ou

$$\begin{bmatrix} I_T \\ I_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_T & 0 \\ 0 & Y_L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad (6)$$

Além disso, foi considerado um modelo π (pi) para representação do circuito, onde as correntes transversais são consideradas igualmente distribuídas nas extremidades e a corrente longitudinal não varia ao longo do condutor. Por fim, é possível alterar as representações baseadas nas quedas de tensão (ΔV_i) e nas elevações de tensão média nos condutores (V_i) para representações nodais, ou seja, em relação à cada um dos nós do sistema (Equação 7 e 8).

$$V_i = \frac{V_{Na} + V_{Nb}}{2} \quad (7)$$

$$\Delta V_i = V_{Na} - V_{Nb} \quad (8)$$

Dessa maneira, é possível obter um sistema equivalente que relaciona as tensões nos nós com as correntes injetadas no sistema (Equação 9).

$$[V_N] = [Y_N][I] \quad (9)$$

onde a matriz $[I]$ recebe 1 para os nós onde há injeção de corrente e 0 para os demais, a matriz $[V_N]$ representa as tensões nos nós e a matriz $[Y_N]$ contém as informações das matrizes $[Y_T]$ e $[Y_L]$. Para análises no domínio do tempo, visto que o modelo é no domínio da frequência, aplicou-se a transformada numérica de Laplace [17].

2.2. Modelagem da variação dos parâmetros eletromagnéticos do solo com a frequência

Segundo [15], em análises de fenômenos rápidos, como descargas elétricas, os parâmetros do solo (permissividade e condutividade elétrica) variam de acordo com a frequência de excitação do campo eletromagnético, enquanto a permeabilidade magnética permanece constante. Nesse contexto, faz-se necessário adotar modelos que possam expressar essas características da melhor forma possível, feito esse que vem sendo discutido há anos por diversos pesquisadores. Alipio – Visacro [15], por meio de medições realizadas em campo, propuseram expressões fisicamente consistentes, tendo em vista que foram validadas experimentalmente. Sendo assim, criou-se um modelo consistente e com precisão elevada, além de estabelecer precedentes para futuras análises.

Ademais, também foram apresentadas equações (Equação 9 e 10) que se aproximaram com notável precisão dos resultados, tornando-o um dos métodos mais adotados em estudos do gênero.

$$\sigma = \sigma_0 + \sigma_0 * h(\sigma_0) \left(\frac{f}{1\text{MHz}} \right)^\gamma \quad (10)$$

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon'_\infty}{\varepsilon_0} + \frac{\tan\left(\frac{\pi\gamma}{2}\right) * 10^{-3}}{2\pi\varepsilon_0(1\text{MHz})^\gamma} \sigma_0 * h(\sigma_0) f^{\gamma-1} \quad (11)$$

Onde σ_0 é a condutividade para baixas frequências (100 Hz); ε_r , a permissividade elétrica relativa do solo; $\varepsilon'_\infty/\varepsilon_0$, é a permissividade relativa em altas frequências; ε_0 , a permissividade do vácuo

(aproximadamente $8,854 * 10^{-12} F/m$); f , a frequência em Hz ; γ , uma constante. Para a função $h(\sigma_0)$ o estudo sugere três valores (Tabela 1) em função da precisão necessária para a análise: resultados medianos, conservativos e relativamente conservadores.

TABELA 1. Parâmetros do modelo Alipio - Visacro.

Resultados	Função $h(\sigma_0)$	γ	$\varepsilon'_{\infty}/\varepsilon_0$
Medianos	$h = 1,26 * \sigma_0^{-0,73}$	0,54	12
Relativamente conservativos	$h = 1,26 * \sigma_0^{-0,73}$	0,58	8
Conservativos	$h = 1,26 * \sigma_0^{-0,73}$	0,62	4

3. RESULTADOS

3.1. Caso base

Com intuito de representar aterramentos elétricos de linhas de transmissão, foi considerada a configuração ilustrada na Figura 2, que é composta de 4 cabos contrapesos – configuração típica de linhas de transmissão até 230 kV. As simulações foram realizadas com três diferentes valores de resistividade para um solo homogêneo, $\rho_1 = 100 \Omega m$, $\rho_2 = 1000 \Omega m$ e $\rho_3 = 5000 \Omega m$, além de frequência (f) variando de $100Hz$ a $2MHz$, faixa esperada para descargas elétricas [18]. O raio (r) dos condutores é de $7 mm$ e L é o comprimento de cada cabo contrapeso e tem valores de $18 m$ ($100 \Omega m$), $72 m$ ($1000 \Omega m$) e $160 m$ ($5000 \Omega m$), d é a profundidade dos condutores aterrados ($0,5 m$).

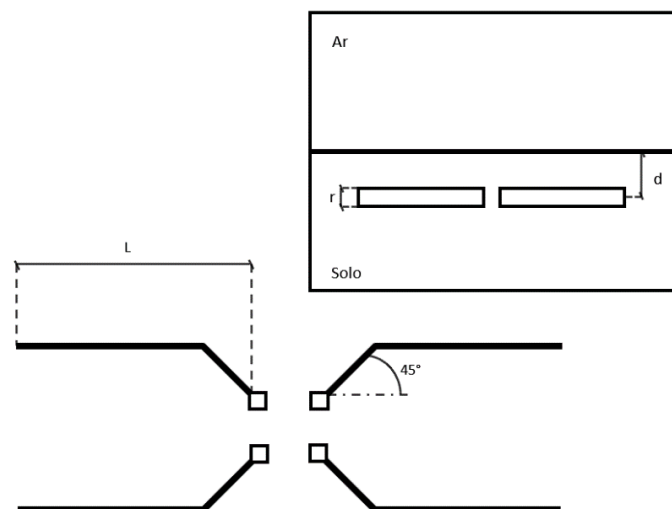


FIGURA 2. Configuração geométrica do sistema de aterramento.

Os resultados discutidos na Seção 2 foram obtidos utilizando a linguagem de programação Julia para realizar a simulação. Sendo assim, os valores mencionados foram inseridos e a corrente de excitação foi igualmente dividida entre os quatros condutores.

3.2. Respostas no domínio da frequência

As Fig. 3, 4 e 5 ilustram a impedância do aterramento em função da frequência, considerando o modelo proposto com e sem a variação da permissividade elétrica do solo, ou seja, desprezando ou não a corrente de deslocamento. Observa-se a partir das Figuras 3, 4 e 5 que há um aumento da diferença entre as impedâncias em frequências mais altas. Isso se dá principalmente ao fato de que com o aumento da frequência espera-se ter uma maior contribuição das correntes de deslocamento, visto que sua natureza está diretamente ligada a taxa de variação, ou seja, quanto maior a taxa de variação dos campos eletromagnéticos, mais representativa será a consideração da corrente de deslocamento.

O impacto da desconsideração da corrente de deslocamento é ainda mais perceptível com o aumento da resistividade (Figura 4 e 5), onde a corrente de natureza de condução é cada vez mais próxima, em módulo, da de deslocamento. É importante ainda notar que o comportamento do aterramento em frequências menores que 100 kHz para $\rho = 1000 \Omega m$ e 50 kHz para $\rho = 5000 \Omega m$ possui características similares, ilustrando que para fenômenos lentos a desconsideração da corrente de deslocamento é uma aproximação plausível.

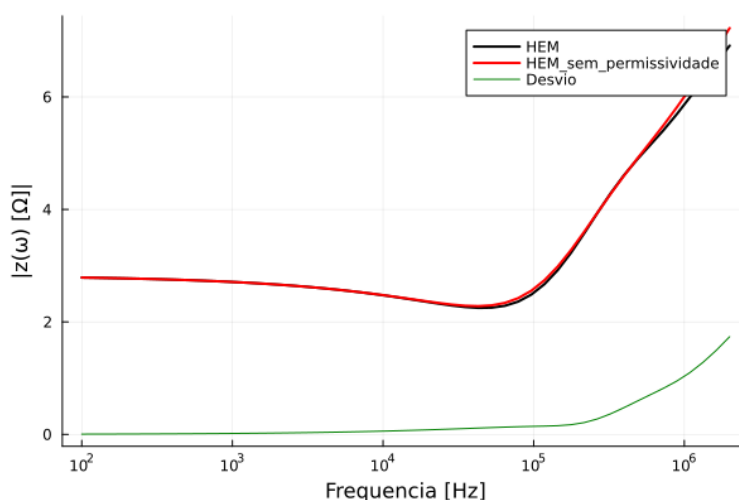


FIGURA 3. Impedância harmônica do aterramento elétrico. Solos com resistividade medidas em baixas frequências de $\rho = 100 \Omega m$.

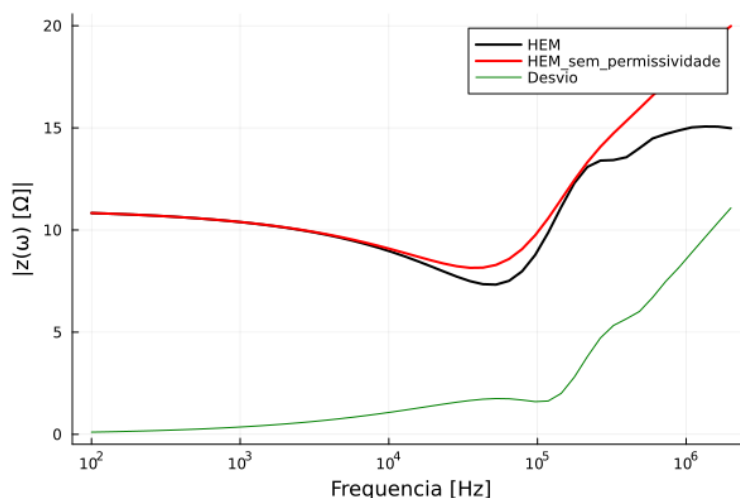


FIGURA 4. Impedância harmônica do aterramento elétrico. Solos com resistividade medidas em baixas frequências de $\rho = 1000 \Omega m$.

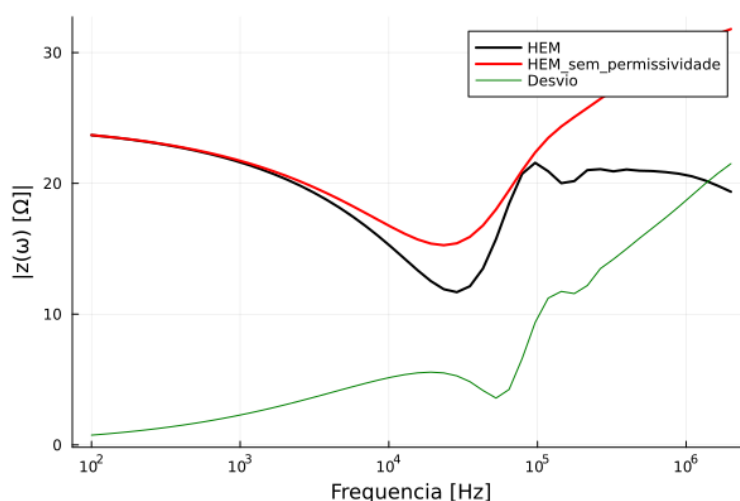


FIGURA 5. Impedância harmônica do aterramento elétrico. Solos com resistividade medidas em baixas frequências de $\rho = 5000 \Omega m$.

3.3. Respostas no domínio do tempo

As Figuras 6, 7 e 8 ilustram o aterramento elétrico quando solicitado por descargas atmosféricas. Para obtenção de tais resultados, foi considerado os dados da estação meteorológica de San Salvatore, na Suíça [19], para as primeiras descargas de retorno (pior caso). A corrente foi reconstruída considerando 7 funções de Heidler, conforme mostrado em [20].

Conforme pode ser visto na Figura 6, de maneira similar ao que acontece no domínio da frequência (impedância harmônica), a elevação de tensão no ponto de injeção de corrente praticamente não sofre alteração do modelo que considera a corrente de deslocamento em relação

ao modelo mais completo, para os casos de baixas resistividades. Por outro lado, conforme pode ser visto nas Figuras 7 e 8, solos com resistividade elevada apresentam uma diferença significativa no valor máximo de elevação de tensão. Nesse sentido, para solos com resistividade inferior à $1000 \Omega m$ (caso da maioria dos solos europeus, por exemplo) espera-se que a diferença percentual máxima entre a consideração ou não da corrente de deslocamento no solo seja menor que 12%. Por fim, é digno de atenção que em todas as respostas temporais analisadas nesse trabalho, após $20 \mu s$, a desconsideração da corrente de deslocamento levou aos mesmos resultados que o modelo completo. Isso corrobora com os modelos utilizados para fenômenos lentos.

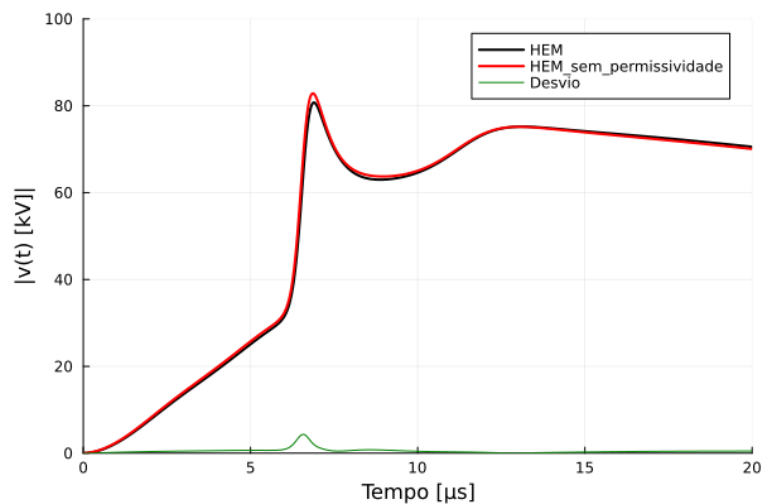


FIGURA 6. Elevação de tensão do aterramento no ponto de injeção de corrente. Solos com resistividades medidas em baixas frequências de $\rho = 100 \Omega m$.

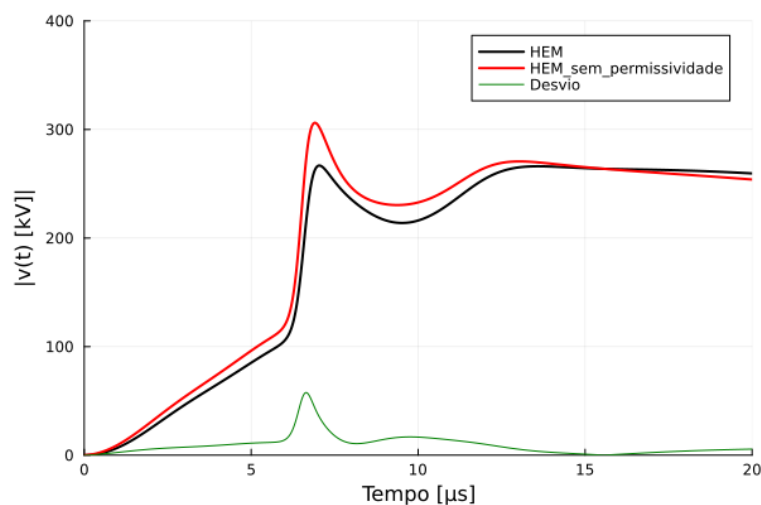


FIGURA 7. Elevação de tensão do aterramento no ponto de injeção de corrente. Solos com resistividades medidas em baixas frequências de $\rho = 1000 \Omega m$.

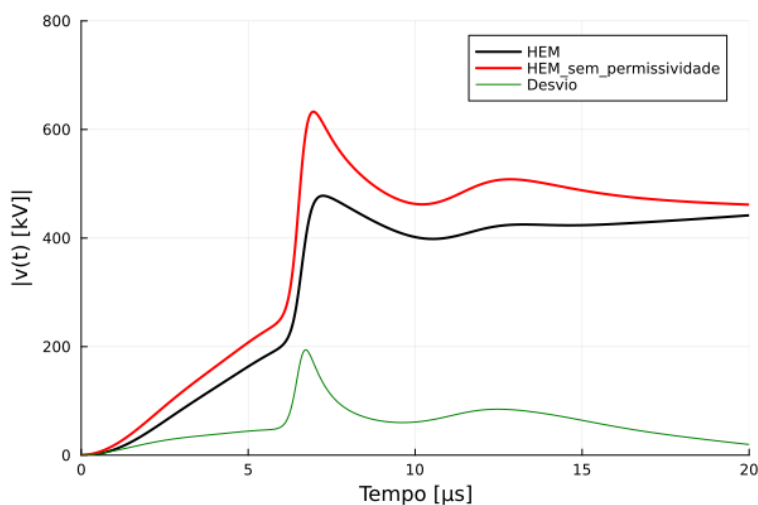


FIGURA 8. Elevação de tensão do aterramento no ponto de injeção de corrente. Solos com resistividades medidas em baixas frequências de $\rho = 5000 \Omega m$.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Conclui-se que a desconsideração da permissividade do solo é um fator agravante na precisão para frequências altas e condutividades maiores, esse comportamento pôde ser visto ao utilizar o modelo eletromagnético híbrido (HEM), conhecido por sua precisão e custo computacional menor. Ademais, notou-se que o modelo simplificado gerou uma sobretensão maior para os valores de ρ escolhidos, ou seja, desconsiderar a permissividade elétrica do solo é uma postura conservadora. Vale a ressalva que, segundo os resultados, para valores reduzidos de ρ , desprezar a permissividade mostrou-se ser uma aproximação válida.

A análise dos parâmetros aqui citados é de extrema importância para sistemas elétricos, visto que a simplificação desses pode causar danos a equipamento e aos seres vivos circundantes, tornando-se assim de extrema relevância o estudo das aproximações e modelos matemáticos a serem utilizados.

5. REFERÊNCIAS

- [1] IEEE Std. 80-2000, IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding, 2000.
- [2] Moura, R. A. R., Schroeder, M. A. O., Lima, A. C. S. et al. Closed-Form Approximation for Grounding Grids Transient Analysis. J Control Autom Electr Syst 32, 796–806 (2021). <https://doi.org/10.1007/s40313-021-00708-x>

- [3] Lima, A. C. S., Vieira, P. H. N., Schroeder, M. A. O., Moura, R. A. R., "Modeling Grounding Systems for Electromagnetic Compatibility Analysis," Recent Topics in Electromagnetic Compatibility, IntechOpen, 2021.
- [4] Brady, N. C., Weil, R. R., "The Nature and Properties of Soils". Pearson. 15^a Ed. 2016.
- [5] E. Mombello, O. Trad, J. Rivera, A. Andreoni, "Two-layer soil model for power station grounding system calculation considering multilayer soil stratification", Electric Power Systems Research, Vol. 37, 1, pp. 67-78, 1996.
- [6] R. Batista, C. E. F. Caetano, J. O. S. Paulino, W. C. Boaventura, I. J. S. Lopes, E. N. Cardoso, A study of grounding arrangements composed by vertical electrodes for two-layered stratified soil models, Electric Power Systems Research, Vol. 180, 2020.
- [7] Raphael Batista, José Osvaldo Saldanha Paulino, A practical approach to estimate grounding impedance of a vertical rod in a two-layer soil, Electric Power Systems Research, Volume 177, 2019.
- [8] Vesna Arnautovski-Toseva, Leonid Grcev, Electromagnetic analysis of horizontal wire in two-layered soil, Journal of Computational and Applied Mathematics, Volume 168, Issues 1–2, 2004, Pages 21-29,
- [9] L.D. Grcev, A. Kuhar, V. Arnautovski-Toseva, B. Markovski, Evaluation of highfrequency circuit models for horizontal and vertical grounding electrodes, IEEE Trans. Power Deliv. 33 (6) (2018) 3065–3074.
- [10] Anderson R.J. de Araújo, Jaimis S.L. Colqui, Claudiner M. de Seixas, Sérgio Kurokawa, Bamdad Salarieh, José Pissolato Filho, Behzad Kordi, Computation of ground potential rise and grounding impedance of simple arrangement of electrodes buried in frequency-dependent stratified soil, Electric Power Systems Research, Volume 198, 2021, 107364.
- [11] S. Visacro and A. Soares, "HEM: a model for simulation of lightning-related engineering problems," in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 20, no. 2, pp. 1206-1208, April 2005, doi: 10.1109/TPWRD.2004.839743.
- [12] Marco Aurélio O. Schroeder, Maria Teresa Correia de Barros, Antonio C.S. Lima, Márcio M. Afonso, Rodolfo A.R. Moura, Evaluation of the impact of different frequency dependent soil models on lightning overvoltages, Electric Power Systems Research, Volume 159, 2018, Pages 40-49.
- [13] R. L. Smith-Rose, "The electrical properties of soils for alternating currents at radio frequency," Proc. R. Soc., vol. 140, no. 841A, pp. 359-377, 1933.
- [14] R. Alipio e S. Visacro, "Modeling the frequency dependence of electrical parameters of soil," IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol. 56, no. 5, pp. 1163-1171, 2014.
- [15] R. A. R. Moura, M. A. O. Schroeder, T. M. Pereira, M. T. C. Barros, R. S. Alipio e A. C. S. Lima, "Analysis of frequency-dependence of soil resistivity: Emphasis at low frequencies," em

International Conference on Grounding, Lightning Physics and Effects, GROUND18 and 8th LPE, 2018.

[16] M. A. O. Schroeder, R. A. R. de Moura and V. M. Machado, "A Discussion on Practical Limits for Segmentation Procedures of Tower-Footing Grounding Modeling for Lightning Responses," in IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol. 62, no. 6, pp. 2520-2527, Dec. 2020, doi: 10.1109/TEM.2020.2982358.

[17] VIEIRA, Pedro H.N. Implementação computacional de alto desempenho do modelo eletromagnético híbrido e suas variantes. Dissertação de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica – Universidade Federal de São João Del – Rei, 8 p.,2020.

[18] MOURA, Rodolfo A.R. Comparação de formulações para inclusão do efeito do solo no comportamento transitório de linhas de transmissão. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica – Universidade Federal de São João Del – Rei, 2-3 p.,2014.

[19] R. B. Anderson and A. J. Eriksson, "Lightning parameters for engineering application," Electra, vol. 69, pp. 65–102, 1980.

[20] A. De Conti and S. Visacro, "Analytical Representation of Single- and Double-Peaked Lightning Current Waveforms," in IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol. 49, no. 2, pp. 448-451, May 2007, doi: 10.1109/TEM.2007.897153.