







Modelagem computacional da resposta transitória de sistemas de aterramento por meio de circuitos equivalentes

Computational modeling of grounding systems transient response using equivalent circuits

Arthur Francisco Andrade¹, Edson Guedes da Costa²,
George Rossany Soares de Lira³,
Marconni Freitas Barroso Ribeiro Gonçalves⁴

Andrade, A.F; Guedes da Costa, E; Soares de Lira, G.R; Barroso Ribeiro Gonçalves, M.F. Modelagem computacional da resposta transitória de sistemas de aterramento por meio de circuitos equivalentes. *Tecnología en Marcha*. Vol. 34, especial. ALTAE. Diciembre 2021. Pág 158-170.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v34i7.6026>

- 1 Universidade Federal de Campina Grande, Brasil. Instituto Federal da Paraíba, Brasil. Correo electrónico: arthur.andrade@ee.ufcg.edu.br
 <https://orcid.org/0000-0002-0954-8748>
- 2 Universidade Federal de Campina Grande, Brasil. Correo electrónico: edson@dee.ufcg.edu.br
 <https://orcid.org/0000-0003-2998-2039>
- 3 Universidade Federal de Campina Grande, Brasil. Correo electrónico: george@dee.ufcg.edu.br
 <https://orcid.org/0000-0003-0229-0323>
- 4 Instituto Federal de Pernambuco, Brasil. Correo electrónico: marconni.goncalves@ee.ufcg.edu.br
 <https://orcid.org/0000-0001-6606-1509>



Palavras-chave

Aterramento; elevação do potencial de terra; ionização; modelos de circuito; parâmetros do solo; transitórios eletromagnéticos.

Resumo

De modo a viabilizar a modelagem de sistemas de aterramento em estudos sistêmicos e de cálculo de transitórios e aumentar a exatidão e confiabilidade dos modelos utilizados, circuitos equivalentes devem ser estudados de modo a possibilitar a representação de efeitos dinâmicos, de dependência com a frequência dos parâmetros de solo e de ionização do solo. Neste sentido, este artigo apresenta uma metodologia que une simulação eletromagnética com o método dos elementos finitos (MEF) a uma etapa de otimização no domínio do tempo, a qual possibilita a obtenção de circuitos equivalentes de sistemas de aterramento ainda na etapa de projeto. A metodologia foi avaliada mediante dois casos de estudo. Inicialmente, três diferentes topologias de circuito tiveram seus parâmetros ajustados a partir de simulações da resposta de um sistema de aterramento composto por uma haste para diferentes níveis de resistividade do solo. A metodologia proposta se mostrou flexível e adequada à representação de sistemas de aterramento instalados em solos com uma ampla faixa de valores de resistividade do solo, com níveis de erro menores que 2%. Em seguida, demonstrou-se a aplicabilidade da metodologia para modelar uma resposta não-linear associada à ionização do solo. Os resultados evidenciam que a inserção de modelos de circuito aprimorados possibilita uma maior confiabilidade no planejamento de sistemas elétricos de potência.

Keywords

Circuit models; electromagnetic transients; frequency dependence of soil parameters; ground potential rise; grounding system; ionization.

Abstract

To enable the modeling of grounding systems in systemic studies and transient calculations and to increase the accuracy and reliability of the models used, equivalent circuits must be studied in order to enable the representation of dynamic effects, frequency dependence of soil parameters and soil ionization. In this sense, this paper presents a methodology that combines electromagnetic simulation solved by finite-element method (FEM) with a time-domain optimization step, which makes it possible to obtain equivalent circuits for grounding systems in the design stage. The methodology was evaluated using two case studies. Initially, three different circuit topologies had their parameters adjusted from simulations of the response of a single-rod grounding system for different levels of soil resistivity. The proposed methodology proved to be flexible and adequate to the represent soils with a wide range of resistivity values, with error levels lower than 2%. Then, the applicability of the methodology to model a non-linear response associated with soil ionization was demonstrated. The results show that the insertion of improved circuit models allows for greater reliability in the planning of electrical power systems.

Introdução

Os sistemas de aterramento desempenham um papel essencial à operação de subestações e linhas de transmissão [1], além de serem essenciais à segurança humana [2]. Eles devem, portanto, ser considerados nos estudos de transitórios em sistemas de potência, os quais por sua vez requerem um cálculo acurado dos parâmetros do sistema em uma ampla faixa de frequências [3 – 5].

De modo a possibilitar o cálculo de sobretensões em decorrência de descargas atmosféricas, os modelos utilizados para representar sistemas de aterramento devem representar fielmente uma faixa de frequência de até algumas unidades de MHz [6]. A representação do componente é dificultada, ainda, pela dependência com a frequência dos parâmetros do solo [7 – 9] e por uma característica não linear decorrente da ionização do solo [9 – 11].

Ainda que simulações por meio de modelos eletromagnéticos possam ser utilizadas para a modelagem de sistemas de aterramento considerando ambos os fatores associados a descargas atmosféricas [12 – 14], modelos de circuito são mais adequados a estudos sistêmicos de cálculo de transitórios [15 – 20]. Nesse sentido, alguns trabalhos têm proposto modelos de circuito elétrico equivalente adequados para utilização em programas do tipo EMTP. Em [19] e [21], técnicas de estimação de parâmetros no domínio da frequência são utilizadas para a obtenção de funções de transferência ou circuitos elétricos equivalentes, as quais se mostram efetivas, entretanto possuem a desvantagem de não permitirem a análise de fenômenos não lineares associados à ionização do solo. De modo a analisar e modelar concomitantemente a influência de efeitos dinâmicos e não lineares, [22 – 24] propuseram métodos para a obtenção de circuitos elétricos equivalentes diretamente no domínio do tempo. Entretanto, estes trabalhos utilizam medições para estimação dos parâmetros de circuito e se restringem a pontos específicos das formas de onda medidas. Ainda que, a princípio, medições sejam uma forma confiável de caracterizar um sistema de aterramento, em alguns casos elas não são possíveis, quer por razões práticas, financeiras, ou mesmo porque o sistema de aterramento cuja resposta transitória se deseja conhecer ainda está na etapa de projeto. Uma alternativa à realização de medição é a utilização de simulações eletromagnéticas como referência para a obtenção de circuitos elétricos equivalentes.

Neste contexto, este trabalho apresenta uma metodologia que permite a obtenção de circuitos elétricos equivalentes para sistemas de aterramento a partir de simulações computacionais nas quais um modelo eletromagnético é resolvido. A partir das simulações, os sinais de tensão e corrente no domínio do tempo são obtidos e aplicados como entrada a um processo de estimação de parâmetros que considera toda a forma de onda do sinal de referência. A utilização de simulações para a obtenção de circuitos equivalentes permite que aterramentos ainda na etapa de projeto sejam modelados em estudos sistêmicos.

A utilização de sinais no domínio do tempo permite que a dependência dos parâmetros do solo com a frequência e o efeito não linear decorrente da ionização possam ser prontamente representados no modelo de circuito resultante. Os circuitos assim obtidos podem ser aplicados a programas do tipo EMTP para a representação de sistemas de aterramento, de modo a aprimorar o cálculo de transitórios e estudos de coordenação de isolamento.

Metodología

Metodología para obtenção de circuitos equivalentes

A metodologia adotada para a obtenção de circuitos elétricos equivalentes consiste nas etapas ilustradas no fluxograma da figura 1. Conforme ilustrado no fluxograma, o circuito é estimado a partir de uma forma de onda de corrente especificada e dos detalhes da geometria do sistema de aterramento e do solo. Estes dados são inseridos em uma simulação que resolve um modelo eletromagnético. Neste trabalho, a ferramenta computacional utilizada para o cálculo do modelo eletromagnético foi o COMSOL *Multiphysics*®, que aplica o método dos elementos finitos (MEF).

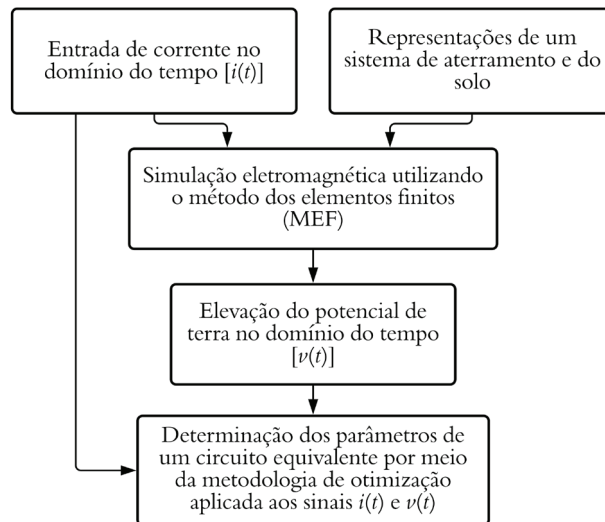


Figura 1. Fluxograma da metodologia para obtenção de circuitos equivalentes a partir da simulação eletromagnética de sistemas de aterramento.

Após a simulação, tendo como entrada um sinal de corrente, a forma de onda da tensão no sistema de aterramento (GPR) no sistema de aterramento é obtida, e as formas de onda de tensão e corrente são utilizadas para o ajuste dos parâmetros de um circuito elétrico pré-estabelecido com base em uma análise crítica do tipo de sistema de aterramento, solo e formas de onda obtidas da simulação.

A metodologia de otimização utilizada, por sua vez, é descrita no fluxograma da figura 2. Assim, o sinal de entrada $u(t)$ considerado é a corrente, enquanto o sinal de saída $y(t)$ é a GPR, ambos obtidos em etapas anteriores.

A etapa de otimização consiste em aplicar um método de otimização pré-definido para ajustar os parâmetros de circuito de modo a minimizar o erro quadrático total [$f(x)$] entre a curva de tensão obtida da simulação e a curva de tensão simulada com o circuito. Neste trabalho, o método de Nelder-Mead foi utilizado. Na notação utilizada, x representa um vetor contendo os valores dos parâmetros de circuito estimados.

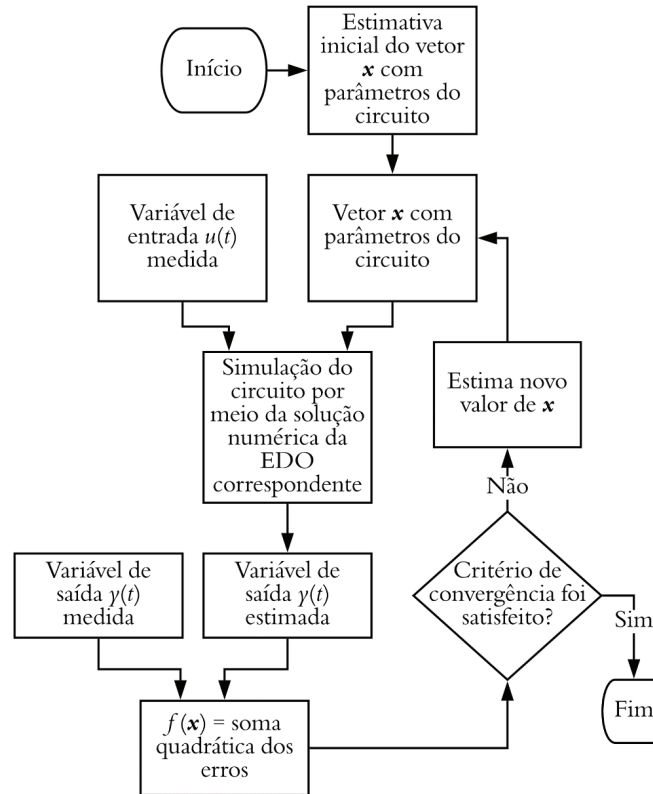


Figura 2. Fluxograma do método de estimação dos parâmetros de circuito a partir de respostas experimentais de tensão e corrente no aterramento.

Estudos de caso

Para a avaliação da viabilidade de implementação da metodologia proposta e da exatidão dos resultados obtidos, dois casos foram analisados, os quais são descritos a seguir.

Simulação da resposta de um sistema de aterramento composto por uma haste

Inicialmente, um sistema de aterramento a eletrodo concentrado foi simulado de modo a obter a GPR decorrente de um impulso de corrente. Em seguida, os sinais de GPR e corrente foram utilizados para a obtenção de circuitos equivalentes. A simulação considera o solo com característica linear, isto é, o efeito da ionização não está sendo considerado. Na simulação utilizou-se os seguintes parâmetros:

- Haste de aterramento com 3,0 m de comprimento e raio de 8mm;
- A corrente utilizada nas análises foi modelada como uma forma de onda dupla-exponencial, 1,1/32 μ s e amplitude de 1 kA. Os tempos correspondem aos quantis de 50% para descargas subsequentes negativas, conforme dados de Berger et al. [25].
- Solo considerado uniforme e com parâmetros dependentes da frequência representado conforme o modelo apresentado em [26], o qual, em sua formulação média, pode ser expresso por (1) e (2):

$$\sigma(f) = \sigma_0(1 + 4,6813 \times 10^{-6} \sigma_0^{-0,73} f^{0,54}) \quad (1)$$

e

$$\epsilon_r(f) = 12 + 9,5447 \times 10^4 \sigma_0^{0,27} f^{-0,46} \quad (2)$$

Em (1) e (2), σ denota a condutividade elétrica do solo em função da frequência f , ϵ_r é a permissividade relativa e $\sigma_0 = 1/\rho_0$ é a condutividade de baixa frequência. As resistividades de baixa frequência: $\rho_0 = 100 \Omega\text{m}$, $300 \Omega\text{m}$, $1000 \Omega\text{m}$ e $3000 \Omega\text{m}$ foram utilizadas. O objetivo de considerar uma ampla faixa de resistividades foi analisar possíveis alterações na característica da GPR simulada em função do valor de resistividade do solo.

Após a definição da geometria e dos parâmetros do solo, o cálculo de campo eletromagnético foi realizado mediante a aplicação das equações de Maxwell, as quais são resolvidas por meio do MEF. A plataforma COMSOL *Multiphysics*® foi utilizada para a modelagem e cálculo do problema eletromagnético resultante. Para isso, simulações no domínio da frequência foram utilizadas com a física *Magnetic and Electric Fields* do módulo AC/DC. A geometria utilizada foi 2D de revolução, de modo a aproveitar a simetria do problema modelado. Na figura 3, é apresentada uma representação gráfica da malha produzida para representar os domínios simulados.

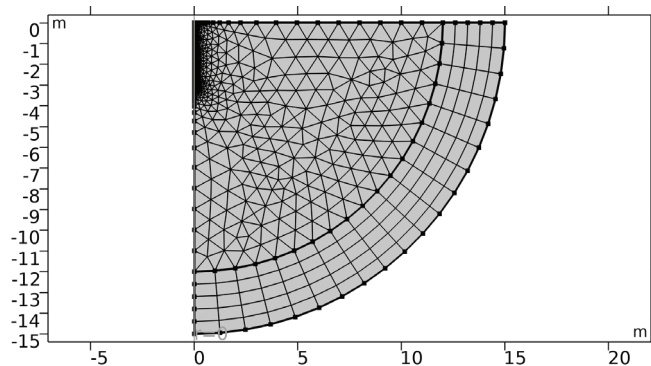


Figura 3. Ilustração da malha gerada para discretização do problema físico simulado com o MEF.

Após a execução das simulações, a transformada de Fourier foi utilizada para obter a resposta do aterramento no domínio do tempo. Em seguida, os circuitos apresentados na figura 4 foram utilizados para a modelagem da resposta do sistema de aterramento a partir da forma de onda de corrente especificada e da forma de onda de tensão calculada na etapa anterior. Os circuitos apresentados na figura, doravante denominados circuitos B, C e D. Os circuitos B e C foram propostos por [24] e [27]. O circuito D foi proposto em [28] e [15].

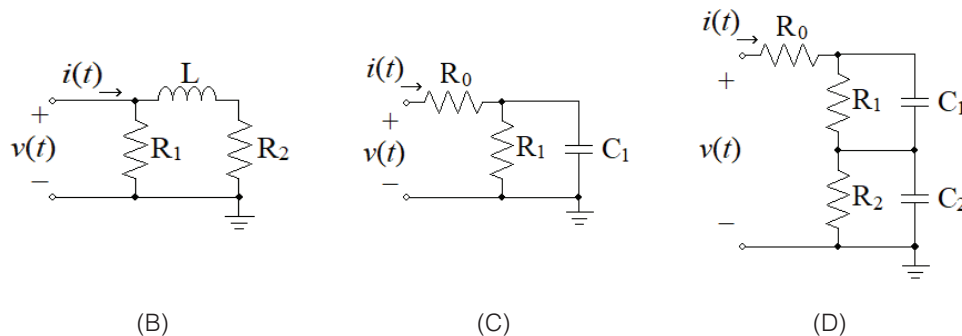


Figura 4. Circuitos B, C e D utilizados para a modelagem da resposta transitória de sistemas de aterramento.

Enquanto o circuito B se destina à representação de sistemas de aterramento com resposta indutiva, os circuitos C e D representam aterramentos com resposta capacitiva. Contudo, o circuito D também permite modelar a variação da frequência dos parâmetros do solo [15], para o caso de solos com maior resistividade. Para cada valor analisado de resistividade do solo em baixa frequência, avaliou-se qual era o circuito mais adequado para a representação da

resposta transitória. Para a avaliação do desempenho dos circuitos, foi calculada a diferença relativa (δ_v) entre o pico de GPR obtido da simulação com o MEF e o valor corresponde determinado por meio do circuito, definida como:

$$\delta_v = \frac{\hat{v}_p - v_p}{v_p} \quad (3)$$

Em (3), v_p e \hat{v}_p são a GPR de referência e a GPR calculada com o circuito, respectivamente. Adicionalmente, para cada caso foi calculado o valor eficaz do erro médio quadrado (RMSE) entre as formas de onda de tensão simuladas com o MEF e com o circuito equivalente. O RMSE é definido por:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (\hat{v}_n - v_n)^2} \quad (4)$$

em que N é o número de pontos do sinal de tensão, e v_n e \hat{v}_n representam as tensões simuladas com o MEF e com o circuito equivalente, respectivamente. De modo a possibilitar a comparação do desempenho dos circuitos para diferentes casos, o RMSE foi normalizado com base na tensão de pico de referência para cada caso.

Simulação da resposta de um sistema de aterramento com característica não-linear

Neste estudo de caso, sinais de tensão e corrente com pronunciada característica não linear obtidos de ensaios reportados em [29] foram aplicados ao método de otimização proposto para a modelagem de um circuito equivalente. A tensão aplicada foi significativamente maior do que no caso de estudo anterior. O aterramento analisado foi uma haste singela de 0,61 m de comprimento, fixada em um solo com resistividade de cerca de 50 Ωm , o que resulta em uma característica indutiva da resposta do aterramento. De acordo com os pesquisadores, o sistema de aterramento analisado foi submetido a um processo de ionização difusa. Os sinais de tensão e corrente utilizados na análise são mostrados na figura 5. A versão não linear do circuito B foi utilizada para a modelagem da resposta experimental do aterramento representada na figura 5. Após o cálculo dos parâmetros, foram obtidos os valores apresentados na tabela 1.

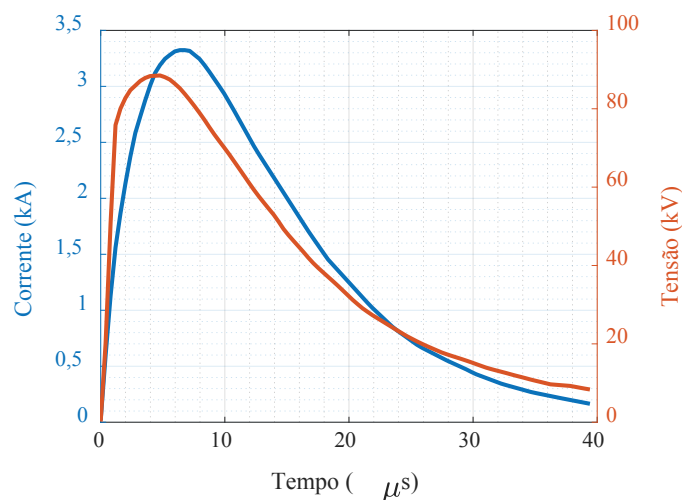


Figura 5. Formas de onda impulsivas de corrente e tensão medidas por Liew e Darveniza (1974) durante ensaios de aplicação de impulso realizados em um aterramento de haste singela.

Tabela 1. Valores dos parâmetros de circuito calculados para a modelagem da resposta impulsiva de um dos sistemas de aterramento ensaiados por Liew e Darveniza (1974).

A	α	$R_2 (\Omega)$	L (μH)
0,0824	2,20	0,0394	0,112

Resultados

Os resultados dos estudos de caso realizados são apresentados e discutidos a seguir.

Simulação da resposta do sistema de aterramento composto por uma haste

Os parâmetros dos circuitos foram determinados para cada caso utilizando a metodologia de otimização proposta. Os valores obtidos para as métricas de erro calculadas após a simulação dos circuitos são mostrados na Tabela 2.

Na tabela, são destacados em negrito os melhores resultados obtidos (menores erros) para cada nível de resistividade do solo considerado. Ao se comparar os resultados apresentados na tabela 2, constata-se que o Circuito B foi o mais adequado à representação do aterramento no caso da resistividade em baixa frequência igual a 100 Ωm . Para este caso, as discrepâncias no valor de pico da GPR calculada com os demais circuitos foram de 7,5%.

Tabela 2. Métricas de erros calculadas para os circuitos B, C e D aplicados à simulação da resposta impulsiva de um eletrodo singelo, considerando diferentes níveis de resistividade do solo.

Resistividade em baixa frequência $\rho_0 (\Omega\text{m})$	Circuito	$\delta_v (\%)$	RMSE/ $V_p (\%)$
100	B	0,8	1,4
	C	-7,5	2,3
	D	-7,5	2,3
300	B	6,3	2,4
	C	-1,6	0,9
	D	-0,9	0,8
1000	B	14,6	8,5
	C	0,7	2,3
	D	0,3	0,6
3000	B	21,7	16,8
	D	1,4	3,4
	D	-0,2	0,7

Desse modo, pode-se constatar que, em solos com resistividade reduzida, a resposta do aterramento é predominantemente influenciada pela corrente resistiva e pelos efeitos indutivos, e circuitos com natureza capacitiva como os circuitos B e C não são capazes de representar com exatidão aceitável o valor de pico da GPR. Ainda assim, os valores de RMSE foram relativamente pequenos para todos os circuitos, indicando que todos os circuitos representaram adequadamente a cauda da GPR, como se evidencia na figura 6.

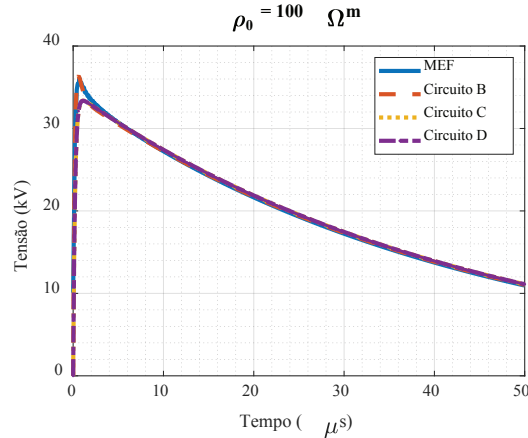


Figura 6. Curvas de GPR simuladas com o MEF e com versões otimizadas dos circuitos B, C e D para uma haste de aterramento em um solo com resistividade em baixa frequência $\rho_0 = 100 \Omega\text{m}$.

Ao se analisar na tabela 2 os resultados referentes aos demais valores de resistividade do solo em baixa frequência, constata-se que o circuito D apresentou o melhor desempenho, com desvios no pico de GPR e RMSE relativo menores que 1%. O circuito C, ainda que associado a maiores erros, resultou em discrepâncias menores que 2% para o cálculo do pico da GPR e em valores de RMSE relativo menores que 3%. O desempenho dos circuitos C e D pode também ser comparado a partir de uma análise da figura 7, na qual são apresentadas as formas de onda de tensão calculadas com os circuitos otimizados C e D e com a simulação eletromagnética resolvida com o MEF para cada caso.

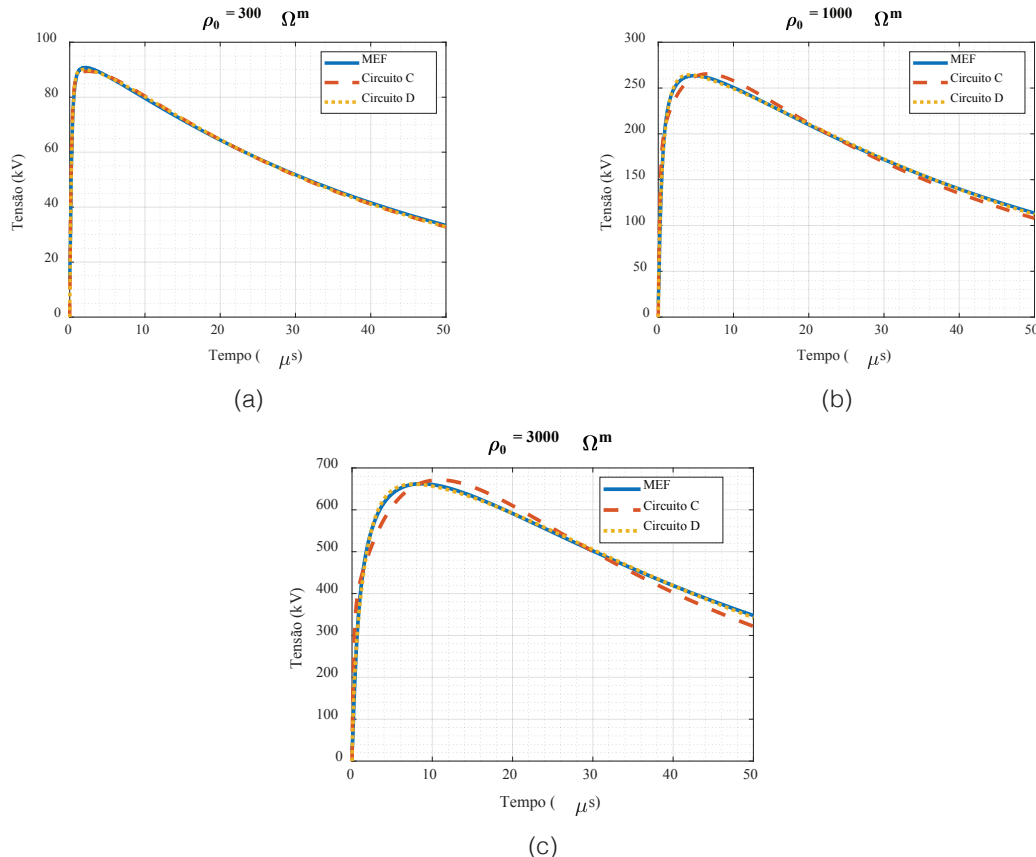


Figura 7. Curvas de GPR simuladas com o MEF e com versões otimizadas dos circuitos C e D para uma haste de aterramento em um solo com resistividade em baixa frequência: (a) $\rho_0 = 300 \Omega\text{m}$, (b) $\rho_0 = 1000 \Omega\text{m}$ e (c) $\rho_0 = 3000 \Omega\text{m}$.

Como uma análise da figura 7 evidencia, conforme o nível de resistividade do solo aumenta, os efeitos capacitivos e de variação com a frequência dos parâmetros do solo se tornam mais significativos, e o circuito C perde a sua exatidão na representação da forma de onda transitória. Os valores dos parâmetros estimados para os circuitos C e D em cada caso descrito na Figura 7 são apresentados na tabela 3.

Na tabela 3, para cada valor de resistividade em baixa frequência, a soma das resistências do circuito C é muito próxima da soma correspondente ao circuito D, com diferença menor ou igual a 3%. Este valor total corresponde à resistência em baixa frequência do aterramento.

Tabela 3. Valores dos parâmetros estimados para os circuitos C e D para os solos com maiores valores de resistividade em baixa frequência.

Resistividade em baixa frequência ρ_0 (Ωm)	300		1000		3000	
	C	D	C	D	C	D
R_0 (Ω)	85,1	69,3	183,9	125,2	364,0	192,0
R_1 (Ω)	12,4	18,2	129,0	55,8	519,9	430,7
R_2 (Ω)	-	10,1	-	137,2	-	291,9
C_1 (nF)	243,9	10,1	26,2	182,4	11,7	3,7
C_2 (nF)	-	378,2	-	6,6	-	48,3

As análises realizadas evidenciaram que, a partir do cálculo das métricas de erro, é possível definir o circuito mais adequado para a representação da resposta transitória de um sistema de aterramento. Para isso, deve-se inserir, na simulação eletromagnética, o sinal de corrente transitória frente ao qual o aterramento deve ser avaliado, um modelo de solo contendo resistividade e permissividade e a geometria do aterramento. Em seguida, após os testes dos circuitos apresentados, deve-se determinar qual apresentou menores valores de RMSE e menores erros na estimativa da GPR de pico.

O circuito B é mais adequado para a representação da resposta transitória de aterramentos situados em solos de baixa resistividade (da ordem de 100 Ωm ou menos), os quais tem resposta predominantemente indutiva. Os circuitos C e D são adequados no caso de solos com maior resistividade. O circuito D, ainda que mais complexo, resulta em uma maior exatidão da resposta modelada para o caso de solos com maior valor de resistividade

Simulação da resposta de um sistema de aterramento com característica não-linear

Na figura 8, são comparadas as formas de onda de GPR medida em Liew e Darveniza (1974) e simulada com o circuito B utilizando os parâmetros obtidos e tomando como entrada a forma de onda de corrente apresentada na figura 5.

Como indicado na figura 8, o circuito não linear propicia uma boa estimativa para o valor de pico da GPR. O erro relativo entre o valor medido e o valor calculado com o circuito foi de 1,2% e o RMSE normalizado pela GPR de pico foi de 4,5%. Os valores relativamente pequenos de erro atestam a adequação dos circuitos obtidos a partir da metodologia proposta para a representação de efeitos não lineares associados à ionização do solo e determinação do valor de pico da GPR.

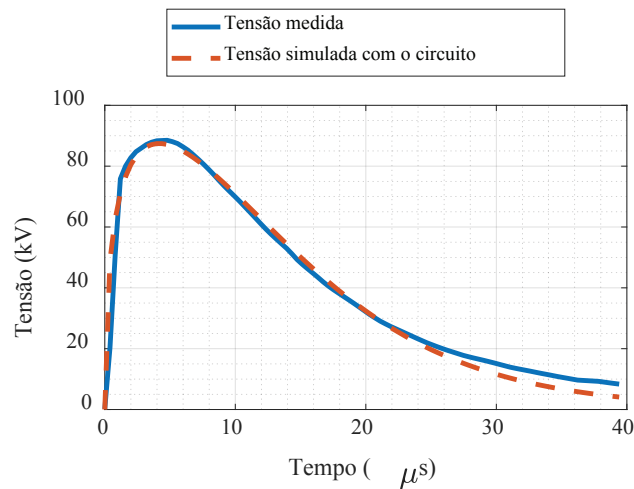


Figura 8. Formas de onda de tensão associadas ao ensaio de ionização do solo medida por Liew e Darveniza (1974) e simulada com o circuito não linear proposto.

Conclusões

As principais conclusões do estudo são:

- A metodologia de estimação de parâmetros de circuito proposta possibilita, a partir de simulações que aplicam um modelo eletromagnético, a representação de efeitos dinâmicos e de dependência com a frequência dos parâmetros elétricos do solo e, como se baseia na otimização das formas de onda no domínio do tempo, permite adicionalmente a representação do efeito não linear associado à ionização do solo. Para os circuitos mais adequados para cada caso analisado, erros menores que 1% foram obtidos para a estimativa da GPR quando se comparou as respostas obtidas com o modelo eletromagnético e com o modelo de circuito;
- A obtenção de circuitos a partir de simulações, nas quais a geometria de um sistema de aterramento e um modelo de solo são inseridos, possibilita que o efeito do aterramento elétrico em estudos sistêmicos possa ser estimado ainda na etapa de projeto, sem a obrigatoriedade da construção do aterramento.
- Além disso, a utilização de um modelo eletromagnético para o cálculo dos parâmetros de circuito é vantajosa quando comparada à utilização de equações analíticas aproximativas, as quais apresentam exatidão reduzida e têm sua aplicação limitada a geometrias simplificadas de aterramento;
- A representatividade do circuito está associada, necessariamente, às formas de onda utilizadas como referência para estimação dos parâmetros. Assim, recomenda-se a utilização de formas de onda com espectro de frequência o mais abrangente possível.
- A inserção dos modelos de circuito aprimorados para a representação do aterramento possibilita uma maior confiabilidade no planejamento de sistemas elétricos de potência. Os circuitos elétricos equivalentes apresentados podem ser prontamente inseridos em programas do tipo EMTP para estudos sistêmicos e cálculo de transitórios e de coordenação de isolamento.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade de Campina Grande (COPELE - UFCG), à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela concessão de bolsas de estudo, bem como a ANEEL e a Light Energia S.A., pelo financiamento provido durante o projeto de P&D que envolveu o trabalho (ANEEL N° 13/18).

Referências

- [1] A. R. Hileman, *Insulation coordination for power systems*. CRC Press, 1999.
- [2] H. Griffiths e N. Pilling, "Earthing," in *Advances in High Voltage Engineering*, A. Haddad and D. Warne, Eds., Stevenage, UK: The Institution of Engineering and Technology, 2004.
- [3] T. A. Papadopoulos et al., "Impact of the Frequency-Dependent Soil Electrical Properties on the Electromagnetic Field Propagation in Underground Cables," in *International Conference on Power Systems Transients (IPST2019)* in Perpignan, France June 17-20, 2019.
- [4] A. Haddad et al., "Power System Test Cases for EMT-type Simulation Studies," in *International Conference on Power Systems Transients (IPST2019)* in Perpignan, France June 17-20, 2019.
- [5] J. Mahseredjian, V. Dinavahi, and J.A. Martinez, "Simulation Tools for Electromagnetic Transients in Power Systems: Overview and Challenges," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 24, issue 3, pp. 1657-1669, Jul. 2009. in *International Conference on Power Systems Transients (IPST2019)* in Perpignan, France June 17-20, 2019.
- [6] M. Ghomi et al., "Full-Wave Modeling of Grounding System: Evaluation The Effects of Multi-Layer Soil and Length of Electrode on Ground Potential Rise," in *International Conference on Power Systems Transients*, Perpignan, França, 2019.
- [7] R. L. Smith-Rose, "The Electrical Properties of Soil for Alternating Currents at Radio Frequencies," *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, vol. 140, no. 841, pp. 359-377, 1933.
- [8] J. He, R. Zeng e B. Zhang, *Methodology and Technology for Power System Grounding*. 1st ed. Wiley – IEEE Press, 2013, pp. 31-35.
- [9] S. Visacro, "A comprehensive approach to the grounding response to lightning currents," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 22, no. 1, pp. 381-386, Jan. 2007.
- [10] A. M. Mousa, "The soil ionization gradient associated with discharge of high currents into concentrated electrodes," in *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 9, no. 3, pp. 1669-1677, July 1994.
- [11] N. Harid et al., "On the analysis of impulse test results on grounding systems," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 51, no. 6, pp. 5324-5334, Jun. 2015.
- [12] A. Habjanic and M. Trlep, "The simulation of the soil ionization phenomenon around the grounding system by the finite element method," in *IEEE Trans. Magn.*, vol. 42, no. 4, pp. 867-870, April 2006.
- [13] H. Chen, Y. Du, "Lightning grounding grid model considering both the frequency-dependent behavior and ionization phenomenon," *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 6, no. 1, pp. 157-165, Jan. 2018.
- [14] M. Moradi, "Analysis of Transient Performance of Grounding System Considering Frequency-Dependent Soil Parameters and Ionization," in *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 62, no. 3, pp. 785-797, June 2020.
- [15] S. Sekioka, "Frequency and current-dependent grounding resistance model for lightning surge analysis," *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 61, no. 2, pp. 419-425, Jul. 2018.
- [16] M. Mokhtari, Z. Abdul-Malek, Z. Salam, "An improved circuit-based model of a grounding electrode by considering the current rate of rise and soil ionization factors," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 30, no. 1, pp. 211-219, Aug. 2014.
- [17] G. Celli, E. Ghiani, e F. Pilo, "Behaviour of grounding systems: A quasi-static EMTP model and its validation," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 85, pp. 24-29, 2012.
- [18] C. M. Seixas e S. Kurokawa, "Using circuit elements to represent the distributed parameters of a grounding systems under lightning strokes," in *2017 International Symposium on Lightning Protection (XIV SIPDA)*, Natal, Brazil, 2-6 Oct. 2017, pp.28-34.
- [19] A. De Conti e R. Alípio, "Single-port equivalent circuit representation of grounding systems based on impedance fitting," *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 61, no. 5, pp. 1683-1685, Sept. 2018.



- [20] A. Manunza, "Grounding grids in electro-magnetic transient simulations with frequency dependent equivalent circuit," *Electr. Power Energy Syst.*, vol. 116, p. 105546, Mar. 2020.
- [21] A. F. Andrade et al., "Analysis of the Frequency Response of a Grounding System Using the Finite Element Method," in *Lecture Notes in Electrical Engineering*, Bálint Németh, Ed. 1 ed. Suíça: Springer, 2019, pp. 1491–1501.
- [22] M. Loboda and Z. Pochanke, "A numerical identification of dynamic model parameters of surge soil conduction based on experimental data," in *21st International Conference on Lightning Protection*, Berlim, 21-25 Sept. 1992, pp. 139–143.
- [23] R. A. C. Altafim et al., "One-port nonlinear electric circuit for simulating grounding systems under impulse current," *Electric. Power Syst. Res.*, vol. 130, pp. 259–265, Jan. 2016.
- [24] M. F. B. R. Gonçalves et al. "Grounding system models for electric current impulse," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 177, p. 105981, Dec. 2019.
- [25] K. Berger, R.B. Anderson and H. Kroninger, "Parameters of Lightning Flashes," *Electra*, No. 41, pp. 23-37, July 1975.
- [26] R. Alipio and S. Visacro, "Modeling the Frequency Dependence of Electrical Parameters of Soil," *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 56, no. 5, pp. 1163-1171, Oct. 2014.
- [27] A. F. Andrade, E. G. Costa, M. F. Gonçalves, G. R. Lira, and R. Teixeira, "Modeling grounding systems response to current impulses considering nonlinear effects," *IEEE Trans. Power Deliv.*, 2021.
- [28] S. Sekioka, M. I. Lorentzou, M. P. Philippakou and J. M. Prousalidis, "Current-dependent grounding resistance model based on energy balance of soil ionization," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 21, no. 1, pp. 194-201, Jan. 2006.
- [29] A. C. Liew e M. Darveniza, "Dynamic model of impulse characteristics of concentrated earths," *Proc. IEE*, vol. 121, no. 2, pp. 123-135, Fev. 1974.