

# Análise de um novo fator geométrico para medição de resistividade do solo

## Analysis of a new geometric factor for soil resistivity measurement

Arthur Francisco Andrade<sup>1</sup>, Edson Guedes da Costa<sup>2</sup>,  
George Rossany Soares de Lira<sup>3</sup>, Matheus Cavalcante Rique<sup>4</sup>

Andrade, A.F; Guedes da Costa, E; Soares de Lira, G.R; Cavalcante Rique, M. Análise de um novo fator geométrico para medição de resistividade do solo. *Tecnología en Marcha*. Vol. 34, especial. ALTAE. Diciembre 2021. Pág 171-181.

 <https://doi.org/10.18845/tm.v34i7.6039>



- 1 Centro de Engenharia Elétrica e Informática, Universidade Federal de Campina Grande, Brasil; Instituto Federal da Paraíba, Campus Itabaiana, Brasil. Correo electrónico: [arthur.andrade@ee.ufcg.edu.br](mailto:arthur.andrade@ee.ufcg.edu.br)  
 <https://orcid.org/0000-0002-0954-8748>
- 2 Centro de Engenharia Elétrica e Informática, Universidade Federal de Campina Grande, Brasil. Correo electrónico: [edson@dee.ufcg.edu.br](mailto:edson@dee.ufcg.edu.br)  
 <https://orcid.org/0000-0003-2998-2039>
- 3 Centro de Engenharia Elétrica e Informática, Universidade Federal de Campina Grande, Brasil. Correo electrónico: [george@dee.ufcg.edu.br](mailto:george@dee.ufcg.edu.br)  
 <https://orcid.org/0000-0003-0229-0323>
- 4 Centro de Engenharia Elétrica e Informática, Universidade Federal de Campina Grande, Brasil. Correo electrónico: [matheus.rique@ee.ufcg.edu.br](mailto:matheus.rique@ee.ufcg.edu.br)  
 <https://orcid.org/0000-0002-6018-5815>



## Palavras-chave

Aterramento; estratificação do solo; método a quatro eletrodos; método de Wenner; resistência de aterramento; resistividade do solo.

## Resumo

O aterramento elétrico é parte fundamental das instalações elétricas e do sistema elétrico como um todo. De modo a assegurar o bom desempenho do aterramento, ele deve ser adequadamente projetado e, para isso, uma etapa fundamental é a medição de resistividade e estratificação do solo. Nesse sentido, este artigo compara diferentes procedimentos para modelagem do solo a partir de medições com o método a quatro eletrodos. São comparados o método convencional de Wenner e um novo método, que utiliza um novo fator geométrico de modo a estimar com maior exatidão a resistividade do solo para o caso de pequenos espaçamentos. Para a comparação, o método dos elementos finitos é aplicado para a elaboração de estudos de caso. Inicialmente, o desempenho de ambos os métodos é comparado para a estratificação de um solo de duas camadas. Em seguida, são analisadas as diferenças que os métodos de modelagem do solo exercem sobre a resistência de aterramento calculada para o caso de eletrodos simples, dos tipos haste vertical e cabo horizontal. Constata-se que o método proposto fornece resultados mais precisos, permitindo modelar com maior exatidão a resistividade da camada superficial do solo. O método convencional de Wenner, se aplicado com espaçamentos menores que 1,0 m, resultou em maiores que 20% para alguns dos casos analisados. Com o fator geométrico proposto, o erro máximo foi de 2,0%.

## Keywords

Four-electrode Method; grounding; grounding resistance; soil resistivity; soil stratification; Wenner method.

## Abstract

Grounding is a fundamental part of electrical installations and of the electrical system as a whole. In order to ensure good performance of grounding, it must be properly designed and, for this, a fundamental step is soil-resistivity measurement and stratification. In this sense, this paper compares different procedures for soil modeling from measurements with the four-electrode method. Wenner's conventional method and a new method, which uses a new geometric factor to estimate with greater accuracy the soil resistivity for the case of small spacings, are compared. For the comparison, finite element method is applied for elaborating case studies. Initially, the performance of both methods is compared for the stratification of a two-layer soil. Then, the differences that the soil modeling methods exert on grounding resistance calculation for the case of simple electrodes (vertical rod and horizontal cable), are analyzed. It is verified that the proposed method provides more accurate results, allowing to model with greater accuracy the resistivity of the soil surface layer. Wenner's conventional method, if applied with spacing smaller than 1.0 m, resulted in greater than 20% for some of the analyzed cases. With the proposed geometric factor, the maximum error was 2.0%.

## Introdução

O aterramento é um componente essencial ao funcionamento adequado e confiável dos sistemas elétricos. Ele é constituído por condutores que conectam um circuito ao solo, de modo a fornecer um caminho seguro para a passagem de corrente, garantindo assim que os equipamentos estejam equipotencializados e minimizando o risco de choques para os operadores [1]. No entanto, um aterramento com baixo desempenho pode comprometer o funcionamento dos equipamentos e a segurança das pessoas, sobretudo no caso de incidência de altas correntes como as associadas aos curtos-circuitos e descargas atmosféricas.

Desse modo, para se projetar um sistema de aterramento confiável é necessário que este atenda a uma série de requisitos mínimos indicados em normas como a IEEE 80 [1]. Os principais parâmetros utilizados pela norma IEEE 80 são a resistência de aterramento, tensões de passo e de toque, além da elevação do potencial de terra (GPR, do inglês *ground potential rise*). De modo a estimar esses valores e determinar se os mesmos se encontram dentro dos valores-limite permitidos, usualmente são utilizadas simulações que têm base uma representação do solo, geometria do aterramento, condições de contorno e entradas especificadas associadas a um modelo eletromagnético. A partir da resolução da simulação pode-se, assim, calcular os parâmetros de avaliação de desempenho desejados. A representação de solo, por sua vez, comumente consiste de modelos estratificados em camadas horizontais, obtidos a partir de medições realizadas em campo com métodos de prospecção geoeletrica [2] O método mais amplamente empregado para este fim é o método a quatro eletrodos de Wenner [3].

Para a realização das simulações a partir de uma configuração de aterramento e uma representação de solo especificados, diversos métodos numéricos podem ser aplicados. Dentre os métodos utilizados, pode-se destacar o método dos momentos [4] – [7], o método das diferenças finitas (MDF) [8] – [9] e o método dos elementos finitos (MEF) [8], [10] – [13]. Adicionalmente, softwares comerciais vêm sendo cada vez mais utilizados para a análise e projeto de sistemas de aterramento.

Além do propósito de simular a resposta de sistemas de aterramento, recentemente as simulações computacionais têm sido utilizadas para a análise de métodos de medição e prospecção do solo em si. Entre os primeiros trabalhos encontrados na literatura e que adotam esta abordagem estão os artigos de Butler e Sinha [14] e Butler e Zhang [15]. Neles, os autores descreveram a aplicação do software COMSOL *Multiphysics*®, que aplica o MEF, à simulação de métodos eletromagnéticos para a prospecção de solos. Em [14], o perfil de resistividade aparente, simulado por meio do MEF para uma aplicação do método de prospecção de Schlumberger, foi comparado a resultados experimentais obtidos com um modelo em escala reduzida elaborado com um tanque de água. Os resultados numéricos e experimentais foram coincidentes e, em [15], os autores ressaltaram que simulações similares às realizadas podem ser aplicadas em processos de inversão, isto é, estudos para a obtenção de parâmetros do solo a partir de dados experimentais [16]. Entretanto, não foi fornecido, nesses artigos, um exemplo prático de aplicação da simulação na estimação de parâmetros elétricos no solo.

Outro exemplo de uso das simulações no contexto de aterramento elétrico e prospecção do solo é a análise do método a quatro eletrodos de Wenner encontrado em [17]. Nesse trabalho, os pesquisadores utilizaram o método dos momentos para o cálculo do potencial elétrico no solo decorrente da aplicação do método a quatro eletrodos. Os autores propuseram um fator geométrico para aplicação do método a espaçamentos reduzidos, e o compararam ao fator convencional proposto por Wenner [3] quando aplicado ao cálculo de resistividade aparente em uma representação de solo típica. Entretanto, o efeito do comprimento do eletrodo não é considerado.

Em [18], por sua vez, um novo fator geométrico foi apresentado para a aplicação do arranjo a quatro eletrodos, de modo a possibilitar a estimação com maior exatidão a resistividade aparente do solo mesmo para o caso de valores reduzidos de espaçamento entre os eletrodos, e considerando também o efeito do comprimento do eletrodo. Para isso, foram utilizadas simulações com o MEF. Também foram propostas fórmulas para os fatores geométricos.

O presente trabalho, por sua vez, tem o objetivo de comparar diferentes procedimentos para modelagem do solo a partir de medições com o método a quatro eletrodos. São comparados o método convencional de Wenner e o método proposto em [18], que utiliza um novo fator geométrico de modo a estimar com maior exatidão a resistividade do solo para o caso de pequenos espaçamentos. Para a realização dos estudos de caso necessários, simulações computacionais foram elaboradas com o MEF, de modo a avaliar os efeitos da aplicação dos diferentes métodos de medição sobre a estratificação do solo e o cálculo de resistência de aterramento.

## Metodologia

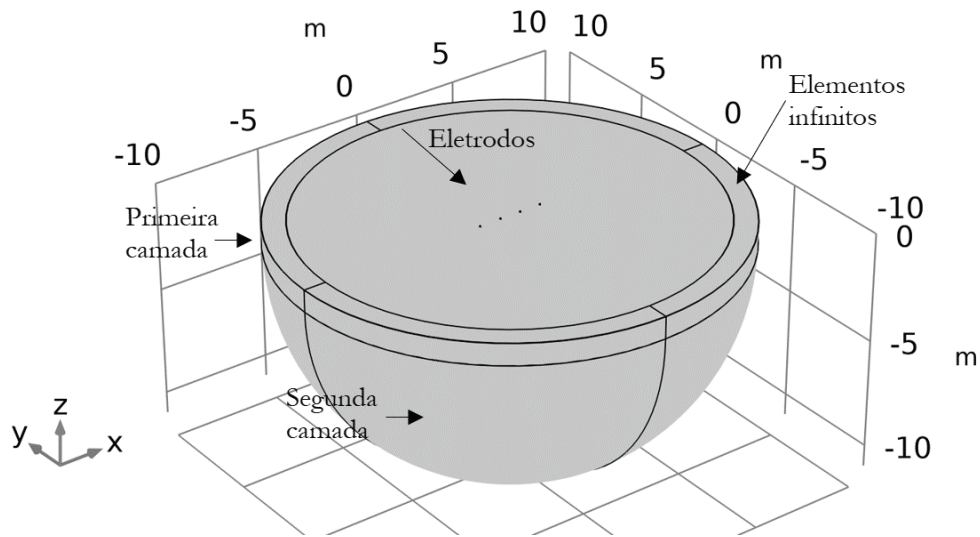
### Procedimentos de simulação

De modo a analisar a influência do fator geométrico utilizado para a aplicação do arranjo de prospecção a quatro eletrodos sobre o projeto de aterramento, foram realizadas simulações computacionais com o MEF utilizando a plataforma COMSOL *Multiphysics*®. O objetivo era emular a caracterização de dois solos de referência, assumidos como compostos por duas camadas horizontais e representados pelos seguintes parâmetros:

- Resistividade da primeira camada:  $\rho_1 = 100 \Omega\text{m}$  ou  $900 \Omega\text{m}$ , a depender do caso;
- Resistividade da segunda camada:  $\rho_2 = 300 \Omega\text{m}$ ;
- Espessura da primeira camada igual a 1,0 m.

Para a simulação do arranjo a quatro eletrodos aplicado a um solo composto por duas camadas, foi utilizado o modelo tridimensional exemplificado na figura 1, para um valor de espaçamento entre eletrodos igual. Na figura, pode-se discernir as representações dos eletrodos, da primeira camada, que foi definida como um domínio cilíndrico, da segunda camada, definida como um domínio hemisférico, e dos elementos infinitos, nos quais é aplicada uma técnica numérica que simula regiões ilimitadas, como é o caso do solo [19].

As condições de contorno atribuídas à simulação foram a aplicação de uma corrente de 1 A entre os eletrodos externos do arranjo e a definição do potencial nulo nas bordas externas do domínio, o que corresponde à condição de campo distante. A corrente elétrica no solo em decorrência da aplicação do arranjo foi simulada, e a diferença de potencial produzida entre os eletrodos centrais do arranjo foi calculada para cada caso analisado. O espaçamento entre eletrodos ( $a$ ) foi variado. O comprimento enterrado dos eletrodos ( $b$ ) foi assumido como sendo de 0,2 m. Os valores de tensão  $\Delta V$  entre os eletrodos centrais foram registrados em cada caso e utilizados para a estimação de resistividade aparente utilizando diferentes fatores geométricos.



**Figura 1.** Exemplo de representação geométrica utilizada para simular com o MEF a aplicação de um arranjo a quatro eletrodos.

### Estudos de caso para comparação dos fatores geométricos

A resistividade aparente pode ser calculada para o arranjo a quatro eletrodos a partir da equação (1):

$$\rho(x) = 2\pi a K_1(x) \frac{\Delta V}{I}, \quad (1)$$

em que  $x = b/a$  representa um fator geométrico relacionado ao espaçamento entre eletrodos,  $I$  é a corrente elétrica nos eletrodos externos e  $\Delta V$  é a diferença de potencial produzida entre os eletrodos internos do arranjo e  $K_1(x)$  é o fator geométrico, cuja formulação é dependente do método adotado.

Inicialmente, o método de Wenner foi utilizado para o cálculo da resistividade aparente associada a valores de espaçamento ( $a$ ) entre 0,2 m e 32 m, no qual o fator geométrico convencional  $K_1(x)$  (WENNER, 1915; IEEE, 2012) é descrito na equação (2).

$$K_1(x) = \frac{2}{1 + \frac{2}{\sqrt{4x^2 + 1}} - \frac{1}{\sqrt{x^2 + 1}}} \quad (2)$$

A equação (2) corresponde ao fator de Wenner completo. Usualmente, o fator simplificado também é utilizado para prospecção do solo, o qual consiste em pressupor que  $x$  é muito menor que 1, o que equivale a  $K_1 = 1$ . Este é o fator simplificado de Wenner, aplicado à equação 1.

Em seguida, o fator geométrico, proposto por Andrade *et. al* (2021) foi utilizado para o cálculo de resistividade aparente. Neste caso, o fator geométrico  $K_1(x)$  é dado pela equação (3):

$$K_1(x) = c_1 x + c_2 + \frac{c_3}{x + c_4} \quad (3)$$

em que os parâmetros  $c_1$  a  $c_4$  são constantes definidas em Andrade *et. al* (2021).

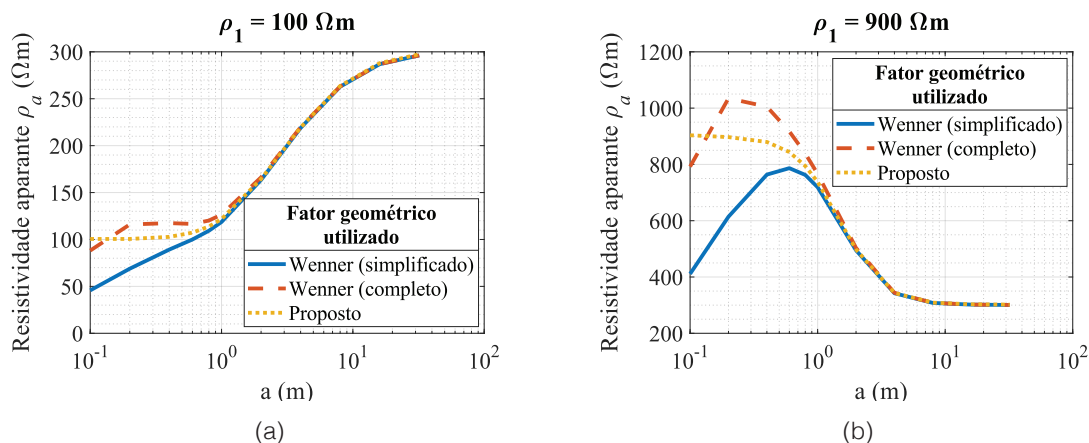
Após o cálculo da resistividade aparente utilizando ambos os métodos, foi realizado uma série de análises comparativas em relação à influência do fator geométrico utilizado sobre:

- Valor da resistividade aparente estimada;
- Parâmetros do solo estratificado. Para isso, foi utilizado o *software* XGSLab®, um programa de computador voltado a projetos de aterramentos elétricos;
- Resistências de aterramento calculadas para eletrodos verticais e horizontais utilizando as representações de solo obtidas com ambos os fatores geométricos. No caso do eletrodo vertical, em forma de haste, considerou-se um raio 8 mm e três diferentes valores de comprimento:  $b = 0,5$  m; 1,5 m e 2,4 m. No caso dos cabos horizontais, o raio considerado para o condutor também foi 8 mm e o eletrodo de aterramento foi um cabo composto por dois trechos: um vertical, com 0,5 m, e um horizontal, enterrado a uma profundidade de 0,5 m e com comprimento (aqui designado por  $l$ ) assumindo os valores 0,5 m, 2,0 m e 10,0 m.

## Resultados e discussões

Na figura 2, são apresentadas as curvas de resistividade aparente obtidas a partir da aplicação de ambos os fatores geométricos aos dados obtidos da simulação do arranjo a quatro eletrodos. Nela, pode-se notar que as resistividades aparentes calculadas são equivalentes para  $a > 1,5$  m, aproximadamente, e convergem para o valor de resistividade da segunda camada com o aumento do espaçamento. Para valores de espaçamento menores que 1,0 m, entretanto, apenas a resistividade calculada com o novo fator geométrico proposto converge para o valor correto da resistividade da primeira camada.

Como esperado, o fator geométrico associado à equação simplificada de Wenner ( $K = 1$ ) resulta nas maiores discrepâncias nesta região. Já em relação ao fator geométrico associado à equação completa de Wenner, ocorre um efeito de oscilação. O valor estimado para a resistividade aparente é maior que o real para valores abaixo de 1,0 m e quando a distância se aproxima de 0,1 m, passa-se a obter valores menores que a resistividade correspondente à primeira camada.



**Figura 2.** Resistividade aparente calculada para um modelo de solo com segunda camada tendo resistividade de  $300 \Omega\text{m}$  e primeira camada com 1,0 m de espessura e resistividade de: (a)  $100 \Omega\text{m}$ , (b)  $900 \Omega\text{m}$ .

Em seguida, um procedimento de estratificação foi realizado com base nos dados sintéticos ilustrados na figura 2, com o intuito de avaliar a influência do fator geométrico utilizado sobre a estratificação obtida. Como pode-se observar na figura 2, valores próximos de resistividade

aparente são obtidos com os fatores geométricos convencionais até cerca de 1,0 m. Assim, também foi avaliada a realização da estratificação a partir de  $a = 1,0$  m. Na tabela 1 são mostrados os erros relativos calculados para os parâmetros estimados com os diferentes métodos são mostrados. Aqui, o erro relativo associado ao parâmetro  $x$  é definido como:

$$\epsilon = \frac{x - x_{\text{ref}}}{x_{\text{ref}}} \quad (4)$$

Como evidenciado pelos dados da tabela 1, os erros provocados na estimação da resistividade e espessura da primeira camada pela utilização dos fatores geométricos convencionais a pequenos espaçamentos são consideráveis, atingindo a valores da ordem de 10% a 30% para os casos analisados, para o caso da resistividade, e valores maiores para o caso da espessura. A restrição da aplicação dos fatores geométricos convencionais a espaçamentos maiores ou iguais a 1,0 m reduz os erros. Entretanto, ainda assim uma discrepância é verificada. A parte menos crítica da estratificação é a determinação da resistividade da segunda camada de solo. O máximo erro percentual neste caso foi de apenas 3,3%, em módulo.

Em seguida, de modo a avaliar qual a influência dos erros associados à escolha do fator geométrico no projeto de eletrodos para sistemas de aterramento, dois grupos de simulações foram realizados. No primeiro, foi calculada a resistência de aterramento de um eletrodo vertical, em forma de haste, utilizando cada uma das representações de solo avaliadas na tabela 1. Os valores de resistência de aterramento calculados com os modelos de solo de referência, são apresentados na tabela 2.

**Tabela 1.** Erros nos parâmetros estimados com o arranjo a quatro eletrodos por meio de diferentes fatores geométricos.

Resistividade de referência $\rho_1$ ( $\Omega\text{m}$ )	Fator geométrico utilizado	Erro relativo dos parâmetros estimados (%)		
		Resistividade ( $\rho_1$ )	Resistividade ( $\rho_2$ )	Espessura da primeira camada (h)
100	Wenner (simplificado)	-29,7	-3,3	-49
	Wenner (completo)	14,7	0,5	22,3
	Wenner (simplificado), $a \geq 1,0$ m	-4,5	0,0	-5,1
	Wenner (completo), $a \geq 1,0$ m	8,8	0,0	9,3
	Fator proposto	0,4	0,3	-0,1
900	Wenner (simplificado)	-21,6	-1,3	31,5
	Wenner (completo)	13,9	0,8	-14,0
	Wenner (simplificado), $a \geq 1,0$ m	-4,7	0	1,2
	Wenner (completo), $a \geq 1,0$ m	4,4	0,1	-2,7
	Fator proposto	0,2	0,5	-2,0

**Tabela 2.** Valores de resistência de aterramento calculados com as representações de solo de referência.

Resistividade de referência $\rho_1$ ( $\Omega\text{m}$ )	Resistência de aterramento calculada ( $\Omega$ )		
	b = 0,5 m	b = 1,5 m	b = 2,5 m
100	152,6	86,6	71,8
900	1208,1	284,9	157,0

Na tabela 2, convém destacar a redução da resistência de aterramento para o caso em que  $\rho_1 = 900 \Omega\text{m}$ , ao se aumentar o comprimento do eletrodo de 0,5 m para 1,5 m. A razão para a redução expressiva na resistência de aterramento é o fato de, para este caso, o eletrodo ter alcançado uma camada de menor resistividade.

Na tabela 3, são apresentadas as diferenças relativas entre as resistências de aterramento calculadas por meio dos modelos de solo estratificado avaliados na tabela 1 e os correspondentes valores de referência.

**Tabela 3.** Erros relativos na resistência de aterramento calculada para hastes de aterramento considerando diferentes representações de solo estratificado.

Resistividade de referência $\rho_1$ ( $\Omega\text{m}$ )	Fator geométrico utilizado	Erro relativo na resistência de aterramento calculada (%)		
		b = 0,5 m	b = 1,5 m	b = 2,5 m
100	Wenner (simplificado)	-17,5	7,9	5,2
	Wenner (completo)	12,1	0,3	0,6
	Wenner (simplificado), $a \geq 1,0$ m	-3,7	-0,7	-0,6
	Wenner (completo), $a \geq 1,0$ m	7,4	1,8	1,5
	Fator proposto	0,4	0,4	0,4
900	Wenner (simplificado)	-20,1	10,2	3,6
	Wenner (completo)	12,2	-4,9	-2,1
	Wenner (simplificado), $a \geq 1,0$ m	-4,5	-0,8	-0,4
	Wenner (completo), $a \geq 1,0$ m	4,1	-0,4	-0,1
	Fator proposto	-0,3	-1,0	-0,3

Fonte: Os autores.

Como evidenciado na tabela 3, os erros na resistência calculada diminuem com o aumento do comprimento do eletrodo para os casos com solo representado a partir dos fatores geométricos de Wenner. Isto ocorre porque a inexactidão destes casos está associada especificamente à primeira camada. Para eletrodos de maior comprimento, o efeito da primeira camada é



reduzido e, portanto, os erros são reduzidos. Constata-se, ainda, que o melhor desempenho geral corresponde aos solos estimados com o fator geométrico proposto neste trabalho. Erros menores ou iguais a 1,0% foram obtidos para a resistência calculada nestes casos.

A última análise foi a simulação e cálculo da resistência de aterramento de cabos enterrados. Os valores de resistência de aterramento obtidos com os modelos de referência são apresentados na tabela 4.

**Tabela 4.** Valores de resistência de aterramento calculados com as representações de solo de referência.

Resistividade de referência $\rho_1$ ( $\Omega\text{m}$ )	Resistência de aterramento calculada ( $\Omega$ )		
	$l = 0,5$ m	$l = 2,0$ m	$l = 10,0$ m
100	97,4	53,1	20,9
900	709,9	321,5	89,7

Na tabela 5 são apresentadas as diferenças relativas entre as resistências de aterramento calculadas por meio dos modelos de solo estratificado avaliados e os correspondentes valores de referência.

**Tabela 5.** Erros relativos na resistência de aterramento calculada para cabos de aterramento considerando diferentes representações de solo estratificado.

Resistividade de referência $\rho_1$ ( $\Omega\text{m}$ )	Fator geométrico utilizado	Erro relativo na resistência de aterramento calculada (%)		
		$l = 0,5$ m	$l = 2,0$ m	$l = 10,0$ m
100	Wenner (simplificado)	-4,3	2,7	4,4
	Wenner (completo)	10,4	7,6	4,6
	Wenner (simplificado), $a \geq 1,0$ m	-3,2	-2,4	-1,5
	Wenner (completo), $a \geq 1,0$ m	6,5	5,0	3,1
	Fator proposto	0,4	0,4	0,3
900	Wenner (simplificado)	-18,8	-16,5	-13,4
	Wenner (completo)	10,7	8,6	6,8
	Wenner (simplificado), $a \geq 1,0$ m	-4,3	-4,0	-3,4
	Wenner (completo), $a \geq 1,0$ m	3,8	3,3	2,7
	Fator proposto	-0,4	-0,6	-0,5

De forma semelhante à característica observada na tabela 3 para os desvios nos valores de resistência de aterramento calculados para o eletrodo em forma de haste, constata-se que, para o aterramento em forma de cabo enterrado, há uma tendência de diminuição do erro associado à estratificação com o aumento do comprimento do eletrodo, ainda que ele não entre em contato direto com a segunda camada de solo. Isto ocorre pois, à medida que o tamanho de um sistema de aterramento aumenta, sua resposta passa a ser mais afetada pelas camadas



mais profundas de solo. Novamente para este caso, os menores erros foram obtidos com o solo representado mediante o fator geométrico proposto, com erros menores ou iguais a 0,6% para todos os comprimentos de cabo simulados.

## Conclusões

A partir dos estudos de caso realizados, é possível concluir que a aplicação do fator geométrico proposto em Andrade, Costa e Lira para o cálculo da resistividade aparente e representação do solo permite aumentar a exatidão do projeto de aterramentos de grandes ou pequenas dimensões. O incremento de exatidão resultante é tanto maior quanto menores forem as dimensões do aterramento projetado, dado que aterramentos de menores dimensões, tais como aqueles empregados sistemas de distribuições, apresentam uma porção expressiva da queda de potencial na região mais superficial do solo, a qual é melhor representada ao se utilizar pequenos espaçamentos no arranjo a quatro eletrodos.

O novo método proposto fornece resultados mais precisos, ao possibilitar a utilização de pequenos espaçamentos entre eletrodos, permite modelar com maior exatidão a resistividade da camada superficial do solo. O método convencional de Wenner, ao ser aplicado com espaçamentos menores que 1,0 m, resultou em maiores que 20% para alguns dos casos analisados. Com o fator geométrico proposto, o erro máximo foi de 2,0%, o que indica que, a partir do seu uso, pode-se tornar mais exata a estratificação do solo e, conseqüentemente, aumentar a confiabilidade dos projetos de sistemas de aterramento, tornando os resultados obtidos por meio deles mais próximos da resposta real.

## 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.

## Referências

- [1] *IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding*, IEEE Standard 80. 4 ed. New York: IEEE, 2015. 226 p.
- [2] *IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Grounding System*. IEEE Standard 81. New York: IEEE, 2012. 86 p.
- [3] F. Wenner, "A method of measuring earth resistivity,". *National Bureau of Standards, Scientific Bulletin*, 12, p. 478–496, 1915. Disponível em: [https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/bulletin/12/nbsbulletinv12n4p469\\_A2b.pdf](https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/bulletin/12/nbsbulletinv12n4p469_A2b.pdf). Acesso em: 01 jul. 2018.
- [4] K. Sheshyekani, M. Akbari, B. Tabei, e R. Kazemi, "Wideband Modeling of Large Grounding Systems to Interface With Electromagnetic Transient Solvers", *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 29, nº 4. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), p. 1868–1876, ago. 2014. doi: 10.1109/tpwr.2014.2310631.
- [5] L. D. Grcev, A. Kuhar, V. Arnavovski-Toseva, e B. Markovski, "Evaluation of High-Frequency Circuit Models for Horizontal and Vertical Grounding Electrodes *IEEE Trans. Power Del.*", vol. 33, nº 6. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), p. 3065–3074, dez. 2018. doi: 10.1109/tpwr.2018.2840960.
- [6] J. G. Safar, R. Shariatinasab, e J. He, "Comprehensive Modeling of Grounding Electrodes Buried in Ionized Soil Based on MoM-HBM Approach", *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 35, nº 3. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), p. 1390–1398, jun. 2020. doi: 10.1109/tpwr.2019.2943909.
- [7] M. Nazari, R. Moini, S. Fortin, F. P. Dawalibi, e F. Rachidi, "Impact of Frequency-Dependent Soil Models on Grounding System Performance for Direct and Indirect Lightning Strikes", *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 63, nº 1. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), p. 134–144, fev. 2021. doi: 10.1109/temc.2020.2986646.

- [8] J. Li, T. Yuan, Q. Yang, W. Sima, C. Sun, e M. Zahn, "Numerical and Experimental Investigation of Grounding Electrode Impulse-Current Dispersal Regularity Considering the Transient Ionization Phenomenon", *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 26, n° 4. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), p. 2647–2658, out. 2011. doi: 10.1109/tpwrd.2011.2158860.
- [9] R. M. S. de Oliveira, D. M. Fujiyoshi, R. C. F. Araújo, J. A. S. do Nascimento, e L. F. P. Carvalho, "Finite-difference modeling of dispersive soils validated via experimental evaluation of transient grounding signals", *J. Electrostat.*, vol. 87. Elsevier BV, p. 263–275, jun. 2017. doi: 10.1016/j.elstat.2017.06.001.
- [10] L. Qi, X. Cui, Z. Zhao, e H. Li, "Grounding Performance Analysis of the Substation Grounding Grids by Finite Element Method in Frequency Domain", *IEEE Trans. Magn.*, vol. 43, n° 4. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), p. 1181–1184, abr. 2007. doi: 10.1109/tmag.2007.892283.
- [11] M. Akbari, K. Sheshyekani, e M. R. Alemi, "The Effect of Frequency Dependence of Soil Electrical Parameters on the Lightning Performance of Grounding Systems", *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 55, n° 4. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), p. 739–746, ago. 2013. doi: 10.1109/temc.2012.2222416.
- [12] J. Trifunovic e M. Kostic, "Quick calculation of the grounding resistance of a typical 110kV transmission line tower grounding system", *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 131. Elsevier BV, p. 178–186, fev. 2016. doi: 10.1016/j.epsr.2015.10.014.
- [13] B. Salarieh, H. M. J. De Silva, e B. Kordi, "Electromagnetic transient modeling of grounding electrodes buried in frequency dependent soil with variable water content", *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 189. Elsevier BV, p. 106595, dez. 2020. doi: 10.1016/j.epsr.2020.106595.
- [14] S. L. Butler e G. Sinha, "Forward modeling of applied geophysics methods using Comsol and comparison with analytical and laboratory analog models", *Comput. Geosci.*, vol. 42. Elsevier BV, p. 168–176, maio 2012. doi: 10.1016/j.cageo.2011.08.022.
- [15] S. L. Butler e Z. Zhang, "Forward modeling of geophysical electromagnetic methods using Comsol", *Comput. Geosci.*, vol. 87. Elsevier BV, p. 1–10, fev. 2016. doi: 10.1016/j.cageo.2015.11.004.
- [16] M. S. Zhdanov, *Foundations of Geophysical Electromagnetic Theory and Methods*. Cambridge, MA: Elsevier, 2017. 770 p. ISBN: 978-0-444-63890-8.
- [17] E. Faleiro, G. Asensio, e J. Moreno, "Improved measurements of the apparent resistivity for small depths in Vertical Electrical Soundings", *J. Appl. Geophys.*, vol. 131. Elsevier BV, p. 117–122, ago. 2016. doi: 10.1016/j.jappgeo.2016.05.016.
- [18] A. F. Andrade, E. G. da Costa, e G. R. S. Lira, "Methods for field measurement of electrical parameters of soil as functions of frequency", *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 199. Elsevier BV, p. 107447, out. 2021. doi: 10.1016/j.epsr.2021.107447.
- [19] O. C. Zienkiewicz, C. Emson, e P. Bettess, "A novel boundary infinite element", *Int. J. Numer. Methods Eng.*, vol. 19, n° 3. Wiley, p. 393–404, mar. 1983. doi: 10.1002/nme.1620190307.