

APLICAÇÃO DE DADOS EXPERIMENTAIS PARA A OBTENÇÃO DE MODELOS DE SOLOS ESTRATIFICADOS EM MÚLTIPLAS CAMADAS¹

Guilherme da Silva Lima²
Alberto Luiz de Paula Júnior
Heberton Luis da Silva Corrêa

RESUMO

Sistemas de aterramento são influenciados por dois fatores principais: a geometria dos eletrodos de aterramentos e a resistividade elétrica do solo. Diante disso, o presente trabalho discute e analisa a modelagem da resistividade elétrica do solo em baixas frequências para aplicações em engenharia elétrica. Para isso, emprega-se o método de Wenner para obter experimentalmente valores de resistividade do solo em diversas profundidades. Em sequência, os dados amostrais são usados para modelar o solo em homogêneos ou estratificados em duas ou três camadas horizontais. Na escolha do modelo adequado para representar as características elétricas do solo, implementam-se estes critérios: simplicidade no qual, se um modelo de solo simples consegue representar o solo de modo satisfatório, ele deve ser utilizado em detrimento de outros modelos complexos; e desvio percentual, em que o modelo de solo é considerado satisfatório para aplicações de engenharia, quando o desvio percentual é inferior a 10% entre os dados amostrais e o modelo do solo. Em observância a tais critérios, intervenções civis de terraplanagem realizadas nos terrenos, como cortes e aterros, podem impactar nos modelos de solos. Assim, a terraplanagem modifica significativamente a expectativa dos valores de resistividade do solo de um terreno e os modelos de solos podem ser capazes de identificar tal situação.

Palavras-chave: Aterramentos. Modelagem de Solos Estratificados. Método de Wenner.

APPLICATION OF EXPERIMENTAL DATA TO OBTAIN MULTI-LAYER STRATIFIED SOIL MODELS

ABSTRACT

Grounding systems are influenced by two main factors: the geometry of the grounding electrodes and the electrical resistivity of the soil. In view of this, this paper discusses and analyzes the modeling of the electrical resistivity of the soil at low frequencies for applications in electrical engineering. For this purpose, the Wenner method is used to experimentally obtain soil resistivity values at various depths. Then, the sample data are used to model the soil as homogeneous or stratified in two or three horizontal layers. In choosing

¹**Como citar este trabalho:** LIMA, Guilherme da Silva; PAULA JÚNIOR, Alberto Luiz de; CORRÊA, Heberton Luis da Silva. Aplicação de dados experimentais para a obtenção de modelos de solos estratificados em múltiplas camadas. ForScience, **Formiga**, v. 13, n. 1, e01314, jan./jun. 2025. DOI: [10.29069/forscience.2025v13n1.e1314](https://doi.org/10.29069/forscience.2025v13n1.e1314).

²**Autor correspondente:** Guilherme da Silva Lima, e-mail: guilherme.silva@ifmg.edu.br.

the appropriate model to represent the electrical characteristics of the soil, the following Grounding systems are influenced by two main factors: the geometry of the grounding electrodes and the electrical resistivity of the soil. In view of this, this paper discusses and analyzes the modeling of the electrical resistivity of the soil at low frequencies for applications in electrical engineering. For this purpose, the Wenner method is used to experimentally obtain soil resistivity values at various depths. Then, the sample data are used to model the soil as homogeneous or stratified in two or three horizontal layers. In choosing the appropriate model to represent the electrical characteristics of the soil, the following criteria are implemented: simplicity, in which, if a simple soil model can represent the soil satisfactorily, it should be used in preference to other complex models; and percentage deviation, in which the soil model is considered satisfactory for engineering applications, when the percentage deviation is less than 10% between the sample data and the soil model. In compliance with these criteria, civil earthwork interventions carried out on the land, such as cuts and fills, can impact soil models. Thus, earthworks significantly modify the expected soil resistivity values of a site and soil models may be able to identify such a situation.

Keywords: Grounding. Modeling of Stratified Soils. Wenner Method.

1 INTRODUÇÃO

A proteção de equipamentos e pessoas conectadas ou próximas ao Sistema Elétrico de Potência (SEP) muitas vezes depende intrinsecamente dos sistemas de aterramentos utilizados nas instalações elétricas (VISACRO, 2002), uma vez que tais sistemas promovem a sensibilização de equipamentos de proteção e facilitam as correntes de fuga e falha que podem ocorrer no SEP (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2008). Além disso, outra função dos sistemas de aterramento proporciona um meio condutor para o retorno das correntes de descargas atmosféricas, ao evitar a danificação de equipamentos ou a vitimização de pessoas pelas correntes (PIANTINI, 2020).

Sistemas de aterramento podem ser construídos com base em diferentes filosofias de aterramentos (VISACRO, 2002), as quais dizem respeito ao comportamento esperado do aterramento quando ele é submetido a algum tipo de solicitação. A maioria das filosofias de aterramento considera que a impedância do sistema é baixa – quanto mais próxima de zero, melhor é o sistema de aterramento em questão (SALAM; RAHMAN, 2016). Como uma impedância nula é fisicamente impossível em aplicações práticas, as concessionárias brasileiras de energia elétrica recomendam o valor de 10 Ω para a impedância de um sistema de aterramento, quando possível (COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GERAIS, 2002; COMPANHIA PARANAENSE DE ENERGIA, 2002).

No momento da elaboração de projetos de novos empreendimentos a serem conectados ao SEP, os projetistas de sistemas de aterramento precisam determinar, de forma analítica, um valor para impedância de aterramento com base em recomendações técnicas

(ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2012). Fisicamente, o valor da impedância de aterramento está relacionado às características elétricas do solo e às configurações geométricas dos eletrodos de aterramentos. Por um lado, as características elétricas do solo, resistividade e permissividade dependem de certos fatores, como tempo geológico da formação do terreno, condições climáticas às quais está submetido em cada período sazonal do ano (KINDERMANN; CAMPAGNOLO, 1995), intervenções civis de terraplanagem realizadas nos terrenos e frequência dos sinais elétricos impostos ao solo (ALÍPIO; VISACRO, 2014); por outro, a geometria dos eletrodos impacta diretamente na forma de dissipação da densidade de corrente elétrica pelo solo, bem como na intensidade do acoplamento resistivo existente entre eletrodos de aterramento próximos (SUNDE, 1968).

De fato, os solos são meios heterogêneos e possuem características geológicas diferentes, ao se compararem amostras de solos não distantes fisicamente (EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA, 2004). Para a realização de projetos de aterramento, é necessária a modelagem elétrica do solo, para o modelo utilizado representar as características heterogêneas de forma satisfatória. Normalmente, a modelagem do solo é descrita como homogênea ou estratificada em camadas horizontais com parâmetros elétricos diferentes para cada uma (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2012).

Além disso, quando são injetados sinais elétricos de baixa frequência no solo ou ocorre um curto-circuito no SEP, o parâmetro elétrico (permissividade) não sofre variações significativas em relação às camadas diferentes do solo (ALÍPIO, 2013), cujo parâmetro não é avaliado em modelos de estratificação do solo em baixas frequências (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2012). Por um lado, a permissividade relativa do solo, para baixa frequência, pode ser considerada com um valor constante igual a 12 para a maioria das aplicações (ALÍPIO; VISACRO, 2014; LIMA; CONTI, 2021); por outro, diante dos sinais de baixa frequência, o parâmetro de resistividade elétrica do solo varia significativamente, a depender da composição do solo, da umidade e da temperatura (VISACRO, 2002). Assim, o solo pode ser caracterizado por medições padronizadas para obter o valor da resistividade em baixas frequências, no que concerne a um modelo de solo homogêneo ou estratificado em múltiplas camadas horizontais (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2012). Não obstante, se o solo é submetido a sinais de alta frequência ou o sistema é atingido pela descarga atmosférica, a permissividade e a resistividade do solo passam a ter comportamentos variáveis com a frequência do sinal (ALÍPIO; VISACRO, 2014); logo, a modelagem realizada em baixas frequências passa a não descrever o comportamento elétrico do solo de modo satisfatório.

Diante disso, o trabalho visa obter um modelo de solo, homogêneo e estratificado em duas ou três camadas para representar os solos sob análise de forma satisfatória; discutir, de forma objetiva, a escolha do melhor modelo para a representação do solo em aplicações com o envolvimento de sinais de baixas frequências no sistema elétrico de potência, algo fundamental para balizar os projetos que determinam analiticamente o valor da impedância de aterramento pelo conhecimento da geometria de eletrodos e características do solo (COELHO, 2019); e verificar como as intervenções civis de terraplanagem, realizadas em terrenos, podem ser identificadas pelos modelos elétricos que buscam representar os solos.

2 ABORDAGEM EXPERIMENTAL PARA A OBTENÇÃO DA RESISTIVIDADE DO SOLO EM BAIXAS FREQUÊNCIAS

Para a obtenção do parâmetro de resistividade elétrica do solo em baixas frequências, existem diversos métodos padronizados e comumente utilizados (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2012). O método das quatro hastes segundo o arranjo de Wenner, ou simplesmente método de Wenner (WENNER, 1916), é o mais utilizado em aplicações de engenharia elétrica para determinar empiricamente o valor da resistividade do solo em baixas frequências (VISACRO, 2002). Inicialmente proposto para possibilitar a modelagem eletricamente de solos homogêneos (WENNER, 1916), tal metodologia foi expandida para ser utilizada em modelagens de solos estratificados em múltiplas camadas horizontais (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2012).

A Figura 1 é apresentada para descrever o método de Wenner (WENNER, 1916), no qual se cravam no solo, em uma profundidade b , quatro hastes de medição (eletrodos) espaçadas em linha reta pela mesma distância a . Ao aplicar uma corrente I_{apl} nas hastes de medição externas, enumeradas na Figura 1 como 1 e 4, é possível medir a diferença de potencial V_{med} manifestada nas hastes de medição internas, enumeradas como 2 e 3:

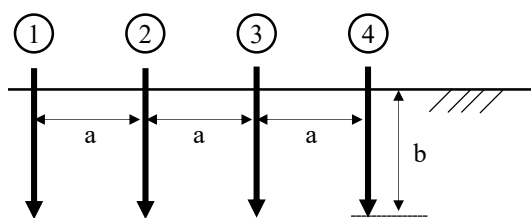


Figura 1- Método das quatro hastes/arranjo de Wenner
Fonte: Elaboração dos autores (2024).

Wenner (1916) sublinha que a resistividade do solo poderia ser determinada pelo produto entre um fator geométrico – que relaciona a profundidade *bem* que as hastes são enterradas e o espaçamento *a* existente entre elas – e a resistência de aterramento medida, com a razão entre V_{med} e I_{apl} , conforme apresentado na Equação (1) (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2012). Com o auxílio da Figura 1, pode-se inferir que, quanto maior o espaçamento *a* entre as hastes de medição, mais profundo será o caminho percorrido pela corrente entre os eletrodos de numeração 1 e 4; por conseguinte, o espaçamento entre as hastes de medição está relacionado à profundidade a ser alcançada pela corrente. Obtém-se a resistividade elétrica do solo em função da profundidade *a* experimentalmente após aplicar a Equação (1) (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2012):

$$\rho(a) = \left[\frac{4\pi a}{1 + (2a/\sqrt{a^2 + 4b^2}) - (a/\sqrt{a^2 + 4b^2})} \right] \left[\frac{V_{med}}{I_{apl}} \right] \quad (1)$$

Por dedução, a Equação (1) é válida para $b \ll a$, e, em aplicação prática de engenharia elétrica, se obtém a condição quando $b < a/10$. Nessa premissa, para obter um comportamento elétrico completo do solo com as estratificações, deve-se variar a distância *a* entre as hastes de medição e obter o valor da resistividade do solo às profundidades (WENNER, 1916).

A depender dos valores de resistividade dos solos obtidos para diferentes profundidades, podem ser caracterizados como homogêneos estratificados em duas camadas de solos homogêneos, estratificados em três camadas de solos homogêneos e assim por diante. A Figura 2 apresenta a situação dos três principais modelos de solos utilizados em engenharia elétrica (VISACRO, 2002): solo homogêneo (Figura 2a); solo estratificado em duas camadas (Figura 2b); e solo estratificado em três camadas (Figura 2c). Para um solo homogêneo, a resistividade é única e independente da profundidade; para os estratificados, as camadas superficiais possuem espessuras finitas, h_1 e, quando aplicável, h_2 ; ea camada mais profunda apresenta espessura considerada infinita. Postula-se que a resistividade é homogênea de valores ρ_1 , ρ_2 e ρ_3 , respectivamente para a primeira, segunda e terceira camada de solo, quando aplicável.

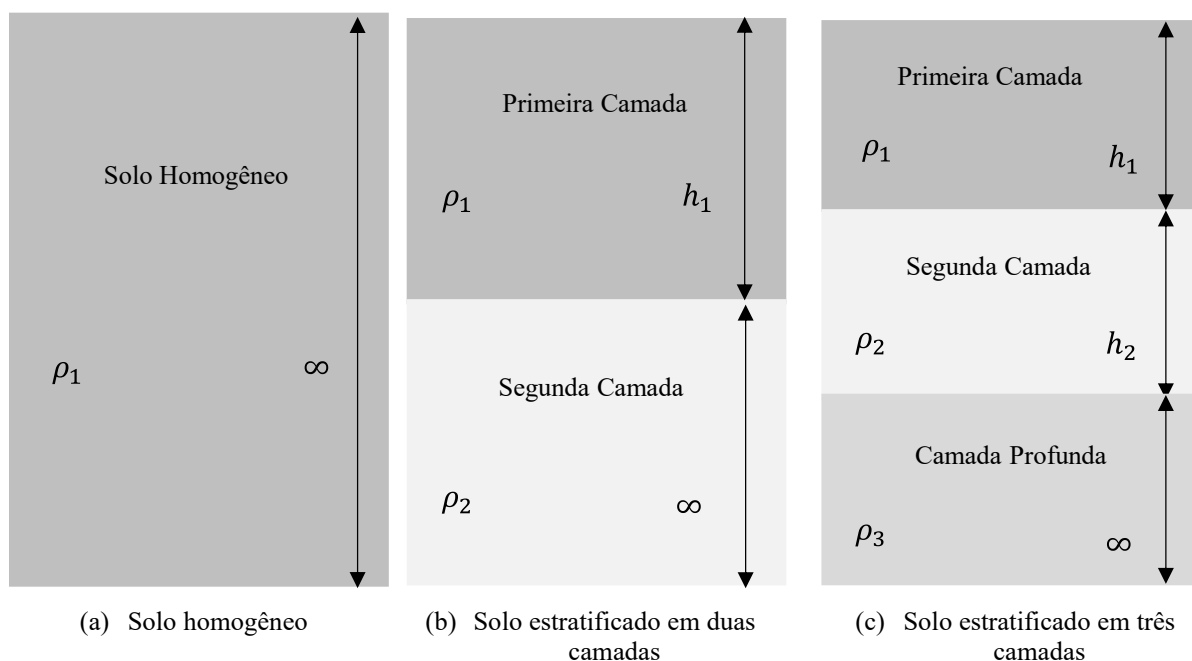


Figura 2 - Modelos de solo
Fonte: Elaboração dos autores (2024).

3 DETERMINAÇÃO MATEMÁTICA DOS MODELOS DE SOLOS

Para solos homogêneos que podem ser caracterizados com apenas um valor de resistividade independentemente da profundidade, o valor da resistividade aparente do solo é obtida pela média dos dados amostrais (INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS, 2013). Para avaliar a capacidade do valor médio para descrever o comportamento elétrico do solo, emprega-se a Equação (2) para avaliar o desvio percentual entre os dados amostrais obtidos pelo método de Wennere o valor da resistividade média que representa o solo homogêneo (TAKAHASHI; KAWASE, 1990). Na Equação (2), q é a quantidade de amostras obtidas experimentalmente:

$$Desvio(\%) = \left(\frac{1}{q} \sum_{i=1}^q \frac{|\rho(a_i)_{medido} - \rho(a_i)_{calculado}|}{\rho(a_i)_{medido}} \right) \times 100 \quad (2)$$

Muitas vezes, o modelo de solo homogêneo conduz a grandes desvios percentuais; logo, o modelo pode não representar satisfatoriamente os dados amostrais, em que são elevados os desvios superiores a 10% (LIMA; PAULA JUNIOR; CORRÊA, 2023). Caso o modelo de solo homogêneo retorne desvios percentuais superiores a esse índice, deve-se buscar outra forma para modelar o solo, cujo modelo de solo é estratificado em duas camadas homogêneas, conforme mostrado na Figura 2b, com um candidato. A Equação (3) apresenta uma função amplamente utilizada pela literatura especializada (KINDERMANN;

CAMPAGNOLO, 1995) e pelas normas nacionais (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2012) e internacionais (INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS, 2013), para modelar esse tipo de solo – aqui, a função apresentada na Equação (3) pretende descrever o comportamento da resistividade do solo em função da profundidade a :

$$\rho(a) = \rho_1 \left\{ 1 + 4 \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{K^n}{\sqrt{1 + \left(2nh_1/a\right)^2}} - \frac{K^n}{\sqrt{4 + \left(2nh_1/a\right)^2}} \right] \right\} \quad (3)$$

Na Equação (3), h_1 é a profundidade da primeira camada do solo; ρ_1 , a resistividade da primeira camada do solo; a , a profundidade em que se deseja conhecer o valor da resistividade do solo; e K , o índice de reflexão do solo entre as duas camadas. O índice de reflexão é determinado da seguinte forma:

$$K = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} \quad (4)$$

Em que ρ_2 é a resistividade da segunda camada do solo.

Para utilizar a expressão apresentada na Equação (3) para a modelagem de solos reais, inicialmente se utiliza o método de Wenner, Equação (1), para obter q medidas de resistividade do solo em função do espaçamento entre as hastes de medição. Em seguida, devem-se ajustar os dados experimentais à função apresentada na Equação (3), por meio do método dos mínimos quadrados (KINDERMANN; CAMPAGNOLO, 1995), ao minimizar o resíduo quadrático entre os dados amostrais e os parâmetros da Equação (3) da seguinte forma:

$$\text{mínimo} \sum_{i=1}^q \left(\rho(a_i)_{medido} - \rho_1 \left\{ 1 + 4 \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{K^n}{\sqrt{1 + \left(2nh_1/a\right)^2}} - \frac{K^n}{\sqrt{4 + \left(2nh_1/a\right)^2}} \right] \right\} \right)^2.$$

Convém salientar que os valores de h_1 , K e ρ_1 minimizaram resíduos existentes entre a Equação (3) e os dados amostrais não são conhecidos *a priori*, mas devem ser obtidos pela rotina computacional como os métodos de Newton, Gradiente etc. (KINDERMANN; CAMPAGNOLO, 1995). Neste trabalho, optou-se pelo método linear para obtenção dos parâmetros que minimizam os resíduos quadráticos e, depois de conseguir os parâmetros h_1 ,

K e ρ_1 que melhor se ajustam à Equação (3), gerou-se um modelo de solo estratificado em duas camadas homogêneas válido para baixas frequências e testado pela Equação (2), para corroborar se o desvio percentual é suficientemente baixo para representar os dados amostrais de modo satisfatório (LIMA; PAULA JUNIOR; CORRÊA, 2023).

Se o solo apresentar comportamento sem ser descrito como estratificado em duas camadas, condição avaliada pelo desvio percentual que, portanto, não pode ser descrita diretamente pela Equação (3), deve-se modelar o solo como tal em três camadas ou mais, caso haja necessidade. Para a modelagem do solo em multicamadas, podem ser utilizadas abordagens gráficas (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2012) ou computacionais (TAKAHASHI; KAWASE, 1990; PEREIRA; ALVES; MARINHO, 2018). Neste trabalho, quando foi solicitada a modelagem do solo em mais de duas camadas, emprega-se a modelagem computacional por ser mais precisa que a gráfica (TAKAHASHI; KAWASE, 1990).

Diante de um solo estratificado em N camadas horizontais, a modelagem do solo ocorre com base em etapas (TAKAHASHI; KAWASE, 1990; PEREIRA; ALVES; MARINHO, 2018). Na primeira delas, obtém-se, recursivamente a função de Kernel (ZHANG *et al.*, 2005) $f(\lambda)$, conforme mostrado na sequência:

$$\begin{aligned} K_{N-1}(\lambda) &= \frac{\rho_N - \rho_{N-1}}{\rho_N + \rho_{N-1}} & \alpha_{N-1}(\lambda) &= 1 + \frac{2K_{N-1}(\lambda)e^{-2\lambda h_{N-1}}}{1 - K_{N-1}(\lambda)e^{-2\lambda h_{N-1}}} \\ &\dots\dots\dots & &\dots\dots\dots \\ K_2(\lambda) &= \frac{\rho_3 \alpha_3(\lambda) - \rho_2}{\rho_3 \alpha_3(\lambda) + \rho_2} & \alpha_2(\lambda) &= 1 + \frac{2K_2(\lambda)e^{-2\lambda h_2}}{1 - K_2(\lambda)e^{-2\lambda h_2}} \\ K_1(\lambda) &= \frac{\rho_2 \alpha_2(\lambda) - \rho_1}{\rho_2 \alpha_2(\lambda) + \rho_1} & \alpha_1(\lambda) &= 1 + \frac{2K_1(\lambda)e^{-2\lambda h_1}}{1 - K_1(\lambda)e^{-2\lambda h_1}} \\ f(\lambda) &= \alpha_1(\lambda) - 1 \end{aligned} \quad (5)$$

Em que: λ é uma variável auxiliar de integração; $\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_N$, as resistividades das camadas 1, 2, ..., N do solo, respectivamente; e $h_1, h_2, \dots, h_{N-1}$, as profundidades das camadas 1, 2, ..., N-1 do solo, respectivamente.

Na segunda fase e com o resultado obtido por meio da Equação (5), calcula-se a integral da Equação (6) (PEREIRA; ALVES; MARINHO, 2018):

$$F_N(a) = a \int_0^\infty f(\lambda) J_0(\lambda a) d\lambda \quad (6)$$

Em que $J_0(\lambda a)$ é a função de Bessel de primeiro tipo e de primeira ordem.

Por fim, a resistividade em uma dada profundidade, a , será determinada conforme a Equação (7):

$$\rho(a) = \rho_1[1 + 2F_N(a) - F_N(2a)] \quad (7)$$

Nota-se que os valores de resistividade do solo e da profundidade das camadas não são conhecidos *a priori* no primeiro passo. Isso indica a necessidade de aplicar o método dos mínimos quadrados para minimização do erro de ajuste entre os dados amostrais e a função determinada pela Equação (6), conforme descrito para um solo de duas camadas.

4 AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DA RESISTIVIDADE DO SOLO

Os métodos descritos nas seções 2 e 3 são utilizados para determinar o modelo elétrico de três solos com características diferentes, no que concerne à intervenção civil realizada neles e, assim, avaliar de forma prática a aplicação dos métodos e a influência da intervenção civil no modelo de solo.

4.1 Locais de realização das medições de resistividade do solo

Os solos escolhidos para a realização das medições de resistividade estão localizados no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais– *Campus* Ribeirão das Neves (IFMG-RN). Tal instituição possui área aproximada de 43 mil metros quadrados que passaram, ao longo do tempo, por diversas intervenções civis, o que possibilita a escolha de áreas com características diferentes para a obtenção dos dados amostrais. Nesse sentido, escolheram-se três áreas para as medições, conforme apresentado na Figura 3.

Em relação às características gerais do terreno do IFMG-RN, vale destacar a localização em uma região acidentada e de cerrado, classificada como solo do tipo argissolo vermelho-amarelo distrófico. Solos distróficos apresentam baixa presença de cátions básicos trocáveis (EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA, 2004, 2006), o que implica em uma quantidade menor de portadores de cargas elétricas disponíveis no solo, cuja

tendência transforma o solo em pouco condutivo, ou seja, com valores elevados de resistividade.

Não obstante as características gerais do terreno, para construir os prédios, o ginásio e os estacionamentos do IFMG-RN foram necessárias intervenções civis de terraplanagem no solo, ou seja, a realização de cortes e aterros no terreno, com a respectiva modificação das características originais (VISACRO, 2002). Afinal, para a terraplanagem é necessário retirar a terra, com a exclusão de alguma camada com característica específica em relação ao restante do solo, ou incluí-la de fato, com a adição de uma camada com características elétricas diferentes das originais. Vale ressaltar que as três áreas escolhidas no IFMG-RN apresentam as seguintes características geológicas e civis:

- Área 1: região localizada a uma altitude de 825 m, após aterro no terreno, onde foi necessário o aterro com a inclusão de aproximadamente dois metros de terra.
- Área 2: região localizada a uma altitude de 830 m após o corte realizado no terreno. Nela estão concentradas as principais cargas do IFMG-RN.
- Área 3: região localizada a uma altitude de 825 m, onde não ocorreu nenhuma intervenção civil de aterro ou corte no terreno.

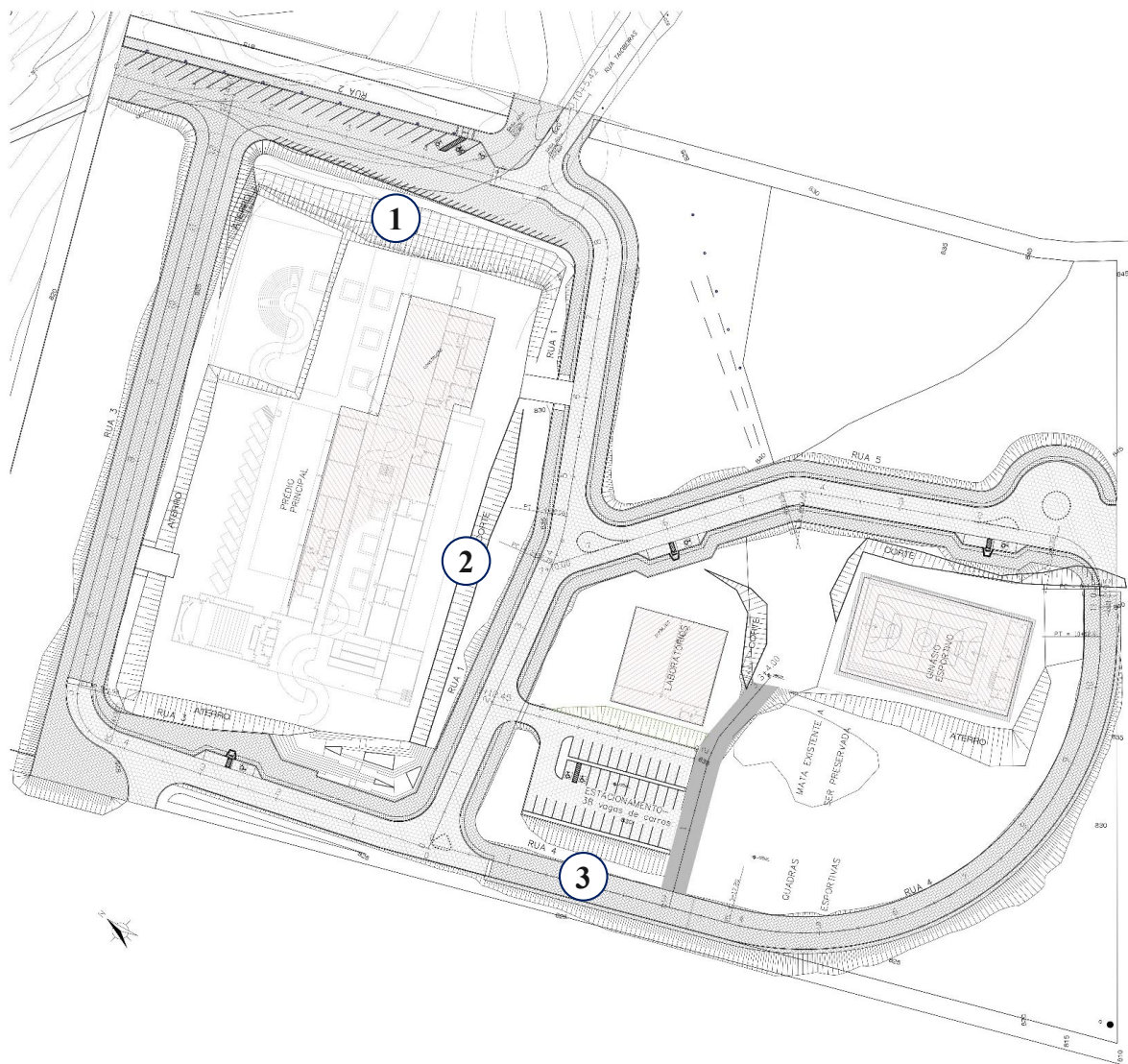


Figura 3 - Locais de realização das medições no IFMG-RN
Fonte: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais (2013).

3.2 Resultados e discussões

Valores de resistividades do solo obtidos experimentalmente para as áreas em estudo são apresentados na Tabela 1. Como esperado, os valores de resistividade se diferenciam com o espaçamento considerado entre as hastes de medição, ou seja, de acordo com a profundidade do solo ou significativamente conforme as áreas diferentes. Isso coaduna os achados de Lima, Paula Junior e Corrêa (2023), posto que as medições foram realizadas em solos de cerrado que possibilitam um contato elétrico adequado entre as hastes de medição e solo – aqui, o espaçamento mínimo considerado entre as hastes foi de 3,0 m.

Tabela 1 - Resistividades do solo obtidas de modo experimental

Espaçamento entre hastes (m)	Resistividade do solo (Ωm)		
	Área 1	Área 2	Área 3
3,0	747,8	788,1	2230,0
4,0	935,7	769,5	1707,8
5,0	1003,8	848,1	1823,3
6,0	1166,3	862,4	1850,1
7,0	1079,3	685,6	2132,0
8,0	1120,8	666,4	2206,2
9,0	1220,0	868,2	3347,9
10,0	1430,3	869,5	3553,6

Fonte: Elaboração dos autores (2024).

A partir dos valores medidos de resistividade do solo, a primeira hipótese indica que as áreas podem ser caracterizadas como um solo homogêneo descrito com apenas uma camada com resistividade constante, por ser um modelo de solo mais simples. A Tabela 2 apresenta os valores de resistividade que representam as áreas como um solo homogêneo, bem como o desvio percentual obtido para esse tipo de modelagem, de 14,42%, 8,82% e 22,61%, respectivamente, para as três áreas analisadas na 2, o valor é inferior a 10%, ao passo que as outras áreas apresentaram índices acima de 14%. Isso demonstra que o modelo de solo homogêneo é uma opção apropriada para representar o solo da área 2, e, para as áreas 1 e 3, o solo estratificado em duas camadas precisa ser avaliado para haver uma tentativa de descrição satisfatória das áreas.

Ao aplicar o método dos mínimos quadrados para ajustar os parâmetros da Equação (3) aos dados amostrais da Tabela 1, obtêm-se ρ_1 , ρ_2 , h , k e o desvio percentual (Tabela 3). Com base nos parâmetros da Tabela, 3 conseguem-se as curvas de resistividade do solo em função da profundidade (Figura 4) e, diante dos parâmetros da Tabela 3, são atingidas as curvas de resistividade do solo em função da profundidade pela Equação (3) e a Figura 4.

Tabela 2 - Parâmetros de ajuste para o solo homogêneo

	ρ (Ωm)	Desvio (%)
Área 1	1088,0	14,42
Área 2	794,7	8,82
Área 3	2356,4	22,61

Fonte: Elaboração dos autores (2024).

Tabela 3 - Parâmetros de ajuste do solo estratificado em duas camadas

	ρ_1 (Ωm)	ρ_2 (Ωm)	h (m)	K	Desvio (%)
Área 1	513,6	1723,2	1,925	0,5408	5,43
Área 2	782,0	829,0	5,500	0,0292	8,61
Área 3	1582,5	11848,0	5,575	0,7643	15,43

Fonte: Elaboração dos autores (2024).

Na comparação das Tabelas 2 e 3, o desvio percentual diminuiu para todas as áreas quando se utiliza o modelo de solo estratificado em duas camadas em detrimento ao de solo homogêneo. Esse resultado é bastante razoável, pois, quanto maior a quantidade de camadas de solos horizontais consideradas na modelagem, mais os dados experimentais conseguem ser descritos pelo modelo matemático (ZHANG *et al.*, 2005); e, quanto maior a quantidade de camadas consideradas no modelo, mais complexo ele fica e mais difusa se torna a interpretação física dos resultados. Para a estratificação do solo em duas camadas, as áreas 1 e 2 apresentaram desvios percentuais abaixo de 9%, e a área 3, acima de 15% (Tabela 3). Vale ressaltar que o desvio percentual obtido para os solos estratificados é dado pela média da distância entre os dados experimentais e a curva analítica obtida via Equação (3) e Figura 4.

Nas Figuras 4a e 4b, o comportamento dos dados experimentais é descrito adequadamente pelos parâmetros da Tabela 3 para as áreas 1 e 2, cujos solos podem ser representados como estratificados em duas camadas e modelados pela Equação (3). Como previsto por Lima, Paula Junior e Corrêa (2023), um erro percentual abaixo de 10% possibilitou o ótimo ajuste dos dados experimentais as curvas geradas pela Equação (3). Para a Área 2, o desvio percentual foi de 8,82%, ao se modelar o solo como homogêneo, com desvio percentual de 8,61%, quando foi modelado como estratificado em duas camadas. Percebe-se que o acréscimo de complexidade no modelo de solo não conduziu a uma diminuição significativa no desvio percentual; logo, não é vantajoso utilizar um modelo complexo para a Área 2 em vez de um modelo simples, cuja melhor opção é modelá-lo como homogêneo.

Por seu turno, o desvio percentual obtido para a área 3 está acima de 15% na Tabela 3, o que sugere o fato de a Equação (3) não conseguir representar satisfatoriamente os dados amostrais. Assim, o solo da área 3 não é caracterizado com fidelidade adequada por um modelo de solo estratificado em duas camadas, algo corroborado pela Figura 4c, que ilustra os dados experimentais em conjunto com a curva ajustada. Postula-se, ainda, que os dados amostrais não são descritos apropriadamente pela curva; logo, um modelo de solo estratificado em duas camadas pode não ser adequado para a representação da Área 3, e o próximo candidato para representar os dados amostrais é o modelo de solo estratificado em três camadas.

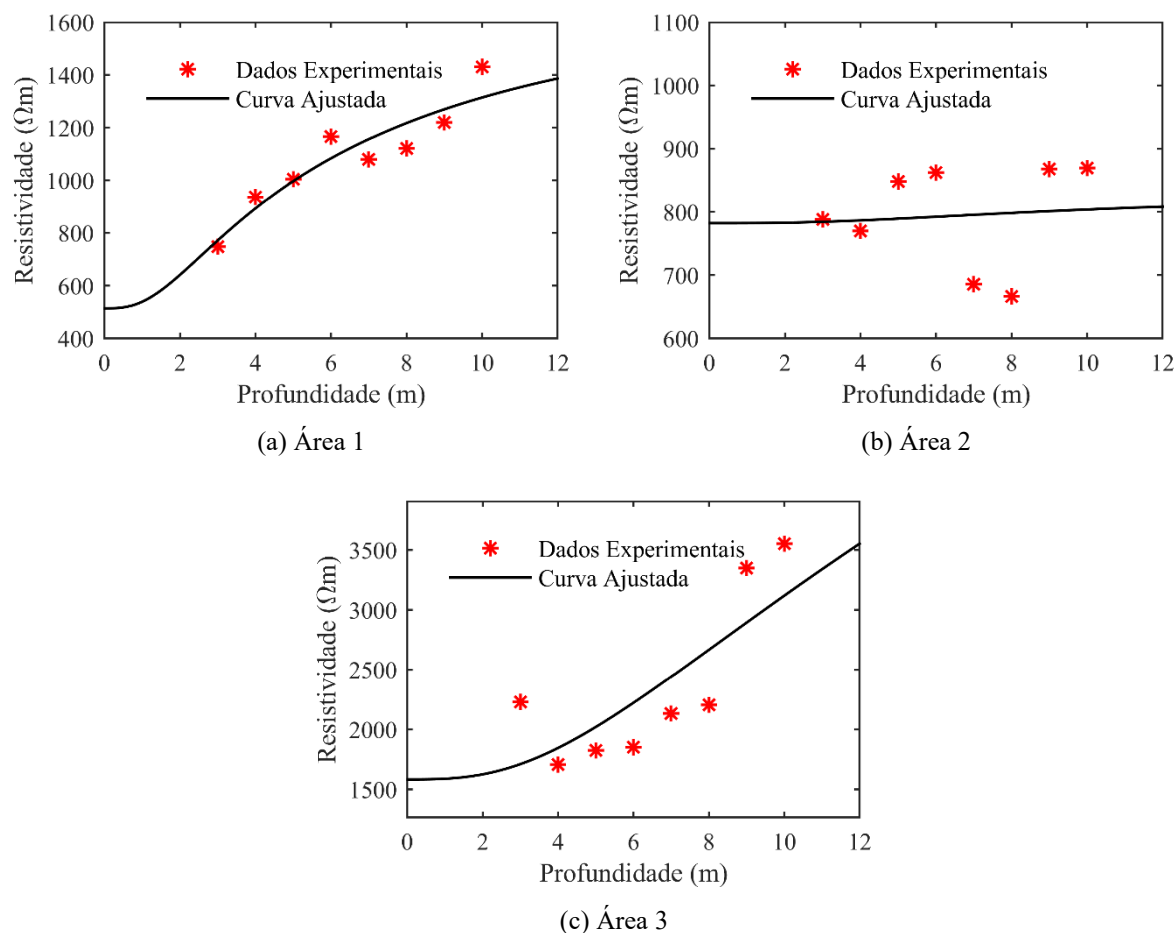


Figura 4 - Curvas ajustadas de um solo estratificado em duas camadas
Fonte: Elaboração dos autores (2024).

Segundo a modelagem da Área 3 como um solo estratificado em três camadas, são obtidos os resultados apresentados na Tabela 4, nos quais o desvio percentual obtido na aproximação é menor que 10%, além de ser a metade do valor obtido quando a área foi estratificada em duas camadas (Tabela 3). Com os resultados da Tabela 4, obtém-se uma curva da resistividade do solo em função da profundidade para a Área 3, via Equação (7), Figura 5. A curva ajustada da Figura 5 indica os dados amostrais da curva ajustada da Figura 4c e, como o desvio percentual ficou abaixo de 10% e a curva da Figura 5 pontua o comportamento dos dados amostrais, a Área 3 é representada pelo modelo de solo estratificado em três camadas.

Tabela 4- Parâmetros de ajuste do solo estratificado em três camadas

	$\rho_1 (\Omega m)$	$\rho_2 (\Omega m)$	$\rho_3 (\Omega m)$	$h_1 (m)$	$h_2 (m)$	Desvio (%)
Área 3	2800,0	900,0	22000,0	2,0	3,5	6,9719

Fonte: Elaboração dos autores (2024).

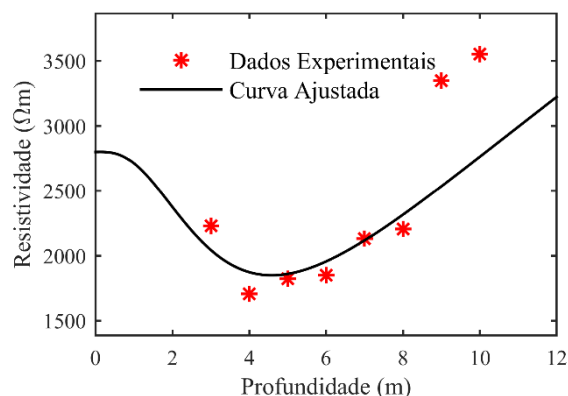


Figura 5 - Curva ajustada de um solo estratificado em três camadas para a Área 3
Fonte: Elaboração dos autores (2024).

Diante dos modelos de solo que representam as áreas avaliadas neste trabalho e do critério da simplicidade e do desvio percentual, se esquematizam os perfis de estratificação do solo (Figura 6), os quais são comumente utilizados em aplicações de engenharia elétrica para descrever visualmente o comportamento elétrico dos solos (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2012) e auxiliar os projetistas na determinação da impedância de um sistema de aterramento.

Com o auxílio da Figura 6 e da descrição dos terrenos na seção 4.1, infere-se que, para a Área 1, o aterro adicionou no terreno uma camada superficial de aproximadamente 2 m de terra, com um valor de baixa resistividade. Na modelagem elétrica do solo, o modelo estratificado em duas camadas (Figura 6a) computa, com excelente precisão, a camada de terra adicionada pelo aterro na Área 1. Esse resultado denota que o método de Wenner, em conjunto com o modelo de solo estratificado, é suficientemente robusto para abarcar informações sobre camadas de solos nas quais não foram realizadas as medidas diretas – em tese, os dados obtidos na Tabela 1 são para profundidades maiores do que 3 m; entretanto, devido à propagação de corrente pelas hastes de medições, cada dado medido informa sobre todas as camadas de solos até a profundidade referida na Tabela 1.

Enquanto o solo da Área 2 pôde ser modelado pelo solo homogêneo, o da Área 3 precisou ser modelado por um solo estratificado em três camadas. Nota-se que a segunda camada do solo da Área 3 (Figura 6c) indica um valor de resistividade parecido com o do solo da Área 2 (Figura 6b) – aqui, a diferença é inferior a 12,0%. Uma interpretação possível para o resultado considera que o terreno da Área 2 poderia ser um solo estratificado em duas camadas, cujo corte retirou a camada superficial de terra para não haver a camada original, com representatividade em um solo homogêneo.

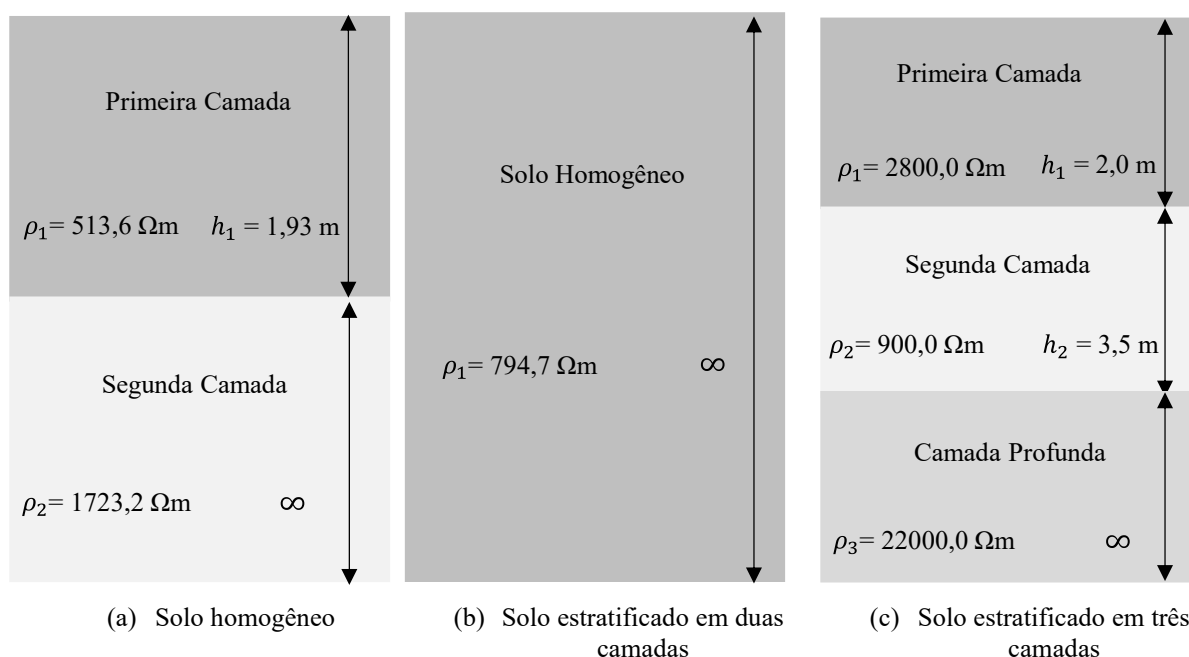


Figura 6 - Perfis de estratificação dos solos investigados

Fonte: Elaboração dos autores (2024).

Por fim, observa-se que as resistividades para as camadas profundas das três áreas compreendem valores significativamente diferentes. Ao ser retomada a Tabela 1, verifica-se que, na aplicação do método de Wenner, há a expectativa de determinar a resistividade do solo até uma profundidade de 10m com as medições; entretanto, os valores medidos foram extrapolados até o infinito (ZHANG *et al.*, 2005). Além disso, as áreas avaliadas estão distantes entre si a aproximadamente 120 m, ou seja, a medição da resistividade de uma área é incapaz de trazer informações precisas sobre a resistividade de outras áreas, com apenas um comportamento geral sobre a resistividade do solo. Dessa forma, para haver maior convergência nos valores de resistividade das camadas profundas, precisam-se mensurar as resistividades com base em um espaçamento maior entre as hastes de medição no método de Wenner. Entretanto, como grande parte da dissipação de corrente no sistema de aterramento ocorre nas camadas superficiais de solo, as mais profundas influenciam a dissipação de corrente em menor grau, em comparação com as camadas superficiais.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O conhecimento das características elétricas dos solos é fundamental para entender a dissipação de corrente pelo solo e, por consequência, os impactos no valor da impedância de um sistema de aterramento. Comumente, os solos podem ser modelados como homogêneos, estratificados em duas camadas ou estratificados em três camadas; logo, este trabalho buscou

modelar solos que passaram por alguma intervenção civil, aterro ou corte; e verificar como eles são sensibilizados pelas intervenções.

Para o terreno aterrado (Área 1), percebeu-se que o modelo de solo conseguiu identificar, de forma consistente, os impactos da inclusão de terra na resistividade. Nesse caso, o modelo de solo estratificado em duas camadas representou satisfatoriamente o terreno, e a espessura da primeira camada é praticamente a mesma do aterro realizado na área; e o terreno que passou pelo processo de corte (Área 2) foi modelado como um solo homogêneo.

Sendo assim, com base nos resultados deste trabalho e nas expectativas atinentes à estratificação de solos naturais, a retirada de terra nessa área foi proporcional àquela realizada na camada superficial do solo.

REFERÊNCIAS

ALÍPIO, R. S. **Dependência da frequência dos parâmetros do solo: efeito no comportamento impulsivo de aterramentos elétricos.** 2013. 89f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013. Disponível em: https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/BUOS-9AKHKJ/1/tese_rafael_alipio.pdf. Acesso em: 19 dez. 2024.

ALÍPIO, R.; VISACRO, S. Modeling the frequency dependence of electrical parameters of soil. **IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility**, [s.l.], v. 56, n. 5, p. 1163-1171 out. 2014. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6813640>. Acesso em: 19 dez. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1109/TEM.2014.2313977>

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5410: Instalações Elétricas de Baixa Tensão.** Rio de Janeiro, 2008. Disponível em: <https://docente.ifrn.edu.br/jeangaldino/disciplinas/2015.1/instalacoes-eletricas/nbr-5410>. Acesso em: 19 dez. 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7117: Medição da Resistividade e Determinação da Estratificação do Solo.** Rio de Janeiro, 2012. Disponível em: <https://pdfcoffee.com/nbr-7117pdf-pdf-free.html>. Acesso em: 19 dez. 2024.

COELHO, R. S. **Uma contribuição à análise de sistemas de aterramento em meios horizontalmente estratificados.** 2019. 158f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2019. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/26116/4/ContribuicaoAnaliseSistemas.pdf>. Acesso em: 19 dez. 2024.

COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GERAIS. **Norma de Distribuição (ND) 5.3: Fornecimento de Energia Elétrica em Média Tensão Rede de Distribuição Aérea ou Subterrânea.** Belo Horizonte: Cemig, 2022. Disponível em: https://www.cemig.com.br/wp-content/uploads/2020/07/nd5_3_000001p.pdf. Acesso em: 19 dez. 2024.

COMPANHIA PARANAENSE DE ENERGIA. **Norma Técnica da Copel (NTC)903100:** Fornecimento de Tensão Primária de Distribuição. Curitiba: Copel, 2002. Disponível em: https://www.moretti.agrarias.ufpr.br/eletrificacao_rural/livro_copel_ntc_903100.pdf. Acesso em: 19 dez. 2024.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Mapeamento de Solos e Aptidão Agrícola das Terras do Estado de Minas Gerais.** Rio de Janeiro: Embrapa, dez. 2004. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/handle/doc/965988?locale=en>. Acesso em: 19 dez. 2024.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos.** 2. ed. Rio de Janeiro: Embrapa, 2006. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1094003>. Acesso em: 19 dez. 2024.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding.** [s.l.]: IEEE, 2013. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7109078>. Acesso em: 19 dez. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2015.7109078>

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MINAS GERAIS. **Projeto executivo geométrico:** planta geral. Ribeirão das Neves: IFMG, 2013. Disponível em: <https://www.ifmg.edu.br/ribeiraodasneves>. Acesso em: 19 dez. 2024.

KINDERMANN, G.; CAMPAGNOLO, J. M. **Aterramento elétrico.** 3. ed. Porto Alegre: Sagra DC; Luzzatto, 1995.

LIMA, G. S.; CONTI, A. Narrowband PLC Channel Attenuation Due to a Multi-Grounded Neutral. **IEEE Transactions on Power Delivery**, [s.l.], v. 36, n. 2, p. 639-650, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S037877961830258X?via%3Dihub>. Acesso em: 19 dez. 2024. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.epsr.2018.08.015>

LIMA, G. S.; PAULA JUNIOR, A. L. CORRÊA, H. L. S. Análise da Aplicação do Método de Wenner para a Obtenção de Modelos que Descrevam os Solos Homogêneos ou Estratificados em Duas Camadas. **Revista de Engenharia e Tecnologia**, Ponta Grossa, v. 15, n. 1, p. 1-11, 2023. Disponível em: <https://revistas.uepg.br/index.php/ret/article/view/22617>. Acesso em: 19 dez. 2024.

PEREIRA, A. M. ALVES, A. C. B. MARINHO, R. P. Estratificação de Solo Multicamada através da função Kernel e do algoritmo genético, **Revista de Engenharia e Tecnologia**, Ponta Grossa, v. 10, n. 1, p. 229-247, 2018. Disponível em: <https://revistas.uepg.br/index.php/ret/article/view/11999>. Acesso em: 19 dez. 2024.

PIANTINI, A. **Lightning interaction with power systems:** fundamentals and modelling.[s.l.]:Institution of Engineering & Technology,2020. v. 1.

SALAM, A.; RAHMAN, Q. **Power systems grounding.** 1. ed. Singapore: Springer, 2016.

SUNDE, E. **Earth conduction effects in transmission systems.** 2 ed. New York: Dover, 1968.

TAKAHASHI T.; KAWASE, T. Analysis of apparent resistivity in a multi-layer structure, **IEEE Transactionson Power Delivery**, [s.l.], v. 5, n. 2, p. 604-612, 1990. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/53062/>. Acesso em: 19 dez. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1109/61.53062>

VISACRO, S. **Aterramentos elétricos**: conceitos básicos, técnicas de medição e instrumentação e filosofias de aterramento. São Paulo: Artliber, 2002.

WENNER, F. Method of measuring Earth resistivity. **Bulletin of the National Bureau of Standards**, Washington, v. 12, p. 469-478, 1916. Disponível em: https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/bulletin/12/nbsbulletinv12n4p469_a2b.pdf. Acesso em: 19 dez. 2024.

ZHANG, B.; CUI, X.; LI, L.; HE, J. Parameter estimation of horizontal multilayer earth by complex image method. **IEEE Transactionson Power Delivery**, [s.l.], v. 20, n. 42, p. 1394-1401, 2005. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1413405>. Acesso em: 19 dez. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2004.834673>

DADOS DOS AUTORES:

Guilherme da Silva Lima

E-mail: guilherme.silva@ifmg.edu.br

Curriculum Lattes: <http://lattes.cnpq.br/1265413459106186>

Possui graduação em Engenharia Elétrica pelo Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (2011), mestrado em Engenharia Elétrica pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Minas Gerais (2015) e doutorado em Engenharia Elétrica pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Minas Gerais (2020). Tem experiência na área de gestão de contratos e projetos de Instalações Elétricas Residenciais e Industriais. Desenvolve trabalhos na área de suportabilidade dielétrica frente à sobre tensões de origem atmosféricas. Realiza pesquisa na área de transmissão de sinais através de linhas de energia. Realiza pesquisas na área de evasão, permanência e êxito escolar.

Alberto Luiz de Paula Júnior

E-mail: alberto.paula@ifmg.edu.br

Curriculum Lattes: <http://lattes.cnpq.br/5470874234439185>

Possui graduação em Física - Bacharelado e Licenciatura - pela Universidade Federal de Viçosa (2012), mestrado e doutorado em Física pela Universidade Federal de Minas Gerais. Atualmente é professor efetivo no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais (IFMG). Tem experiência em simulação de sistemas de muitos corpos, mais especificamente em dinâmica de não-equilíbrio em sistemas fortemente correlacionados.

Heberton Luis da Silva Corrêa

E-mail: heberton.correa@ifmg.edu.br

Curriculum Lattes: <http://lattes.cnpq.br/8488988727349537>

Mestre na área de Educação, Conhecimento e Inclusão Social pela Faculdade de Educação (FAE) da Universidade Federal de Minas (UFMG). Licenciado em Química também na UFMG. Atualmente trabalho no Instituto Federal de Minas Gerais no campus Ribeirão das Neves, onde leciono as disciplinas Química I, II e III para as turmas dos cursos técnicos integrados ao ensino médio de Administração, Eletroeletrônica e Informática. Durante a graduação fui bolsista do Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN) onde estudei Nanoestruturas Magnéticas e tive contanto com técnicas como Sputerring, Mossbauer e Espectroscopia de Força Atômica (AFM). Também sou técnico em Eletrônica, formado na Escola Técnica Municipal de Sete Lagoas.