

MODELAGEM GEOELÉTRICA, DISCUSSÕES E ANÁLISES DE ENGENHARIA SOBRE O IMPACTO DA TERRAPLANAGEM NOS MODELOS DE SOLO ESTRATIFICADOS EM MÚLTIPLAS CAMADAS

Guilherme da Silva Lima (IFMG) E-mail: guilherme.silva@ifmg.edu.br
Alberto Luiz de Paula Junior (IFMG) E-mail: alberto.paula@ifmg.edu.br
Renato Ribeiro Aleixo (IFMG) E-mail: renato.aleixo@ifmg.edu.br
Ana Clara Fernandes Sousa (IFMG) E-mail: aninhafs59@gmail.com
Caio Saylon Pereira Lima (IFMG) E-mail: limacaoio102@gmail.com
Igor Caetano Tibério Figueiredo (IFMG) E-mail: igor.caetano2021@gmail.com
Julia da Cruz Souza (IFMG) E-mail: juliaifmg391@gmail.com
Laura Nascimento Silva (IFMG) E-mail: nascimentolaura664@gmail.com

Resumo: Sistemas de aterramento sofrem a influência de dois fatores principais: a geometria dos eletrodos de aterramentos e a resistividade elétrica aparente do solo. Este trabalho discute e analisa a modelagem da resistividade elétrica do solo, em baixas frequências, para aplicações em engenharia elétrica. Para isso o método de Wenner é utilizado para se obter experimentalmente valores de resistividade do solo para diversas profundidades. Em sequência, os dados amostrais são usados para se modelar o solo em homogêneos ou estratificados em duas ou três camadas horizontais. Na escolha do modelo mais adequado para representar as características elétricas do solo são utilizados os critérios da simplicidade e do desvio percentual. No critério da simplicidade é observado que se um modelo de solo mais simples consegue representar de forma satisfatória o solo, este modelo deve ser utilizado em detrimento de outros modelos mais complexos. No critério do desvio percentual, o modelo de solo é considerado como satisfatório, para aplicações de engenharia, quando o desvio percentual, entre os dados amostrais e o modelo do solo, é inferior à 10,0%. Mostra-se que, observando esses critérios, intervenções civis de terraplanagem que são realizadas nos terrenos, como cortes e aterros, podem ser sentidas pelos modelos de solos. Assim, a realização de uma terraplanagem pode modificar de forma significativa a expectativa dos valores de resistividade do solo de um terreno e os modelos de solos podem ser capazes de identificar isso.

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

ELECTRICAL MODELING, DISCUSSIONS AND ENGINEERING ANALYSIS ON THE IMPACT OF EARTHWORKS IN HORIZONTAL MULTILAYER EARTH MODELS

Abstract: Grounding systems are influenced by two main factors: the geometry of the grounding electrodes and the electrical resistivity of the soil. This paper discusses and analyzes the modeling of soil electrical resistivity, at low frequencies, for applications in electrical engineering. For this purpose, the Wenner method is used to experimentally obtain soil resistivity values for different depths. Right away, the sample data is used to model the soil as homogeneous or stratified into two or three horizontal layers. When choosing the most appropriate model to represent the electrical characteristics of the soil, the criteria of simplicity and percentage deviation are used. In the simplicity criterion, it is observed that if a simpler soil model can satisfactorily represent the soil, this model should be used to the detriment of other more complex models. In the percentage deviation criterion, the soil model is considered satisfactory for engineering applications when the percentage deviation between the sample data and the soil model is less than 10.0%. It is shown that, observing these criteria, civil earthwork interventions that are carried out on the ground, such as cuts and embankments, can be sensed by the soil models. Thus, carrying out earthworks can significantly modify the expected soil resistivity values of a site and soil models may be able to identify this.

Keywords: Grounding. Stratification of the Earth. Wenner's method.

1. Introdução

A proteção de equipamentos e pessoas, conectados ou próximos, ao Sistema Elétrico de Potência (SEP) muitas vezes depende intrinsecamente dos sistemas de aterramentos utilizados nas instalações elétricas (VISACRO, 2002). Posto que, esses sistemas promovem a sensibilização de equipamentos de proteção, bem como criam um caminho facilitado para as correntes de fuga e de falha que podem ocorrer no SEP (ABNT 5410, 2008). Além disso, outra função dos sistemas de aterramento é proporcionar que o solo se torne um meio condutor para o retorno das correntes de descargas atmosféricas, evitando que essas correntes danifiquem equipamentos ou vitime pessoas (PIANTINI, 2020).

Os sistemas de aterramento podem ser construídos seguindo diferentes filosofias de aterramentos (VISACRO, 2002), sendo que elas dizem respeito ao comportamento esperado do aterramento quando ele é submetido a algum tipo de solicitação. A maioria das filosofias de aterramento consideram em seus desenvolvimentos que a impedância do sistema de aterramento é baixa, sendo que, para a maioria das aplicações de engenharia, quanto mais próximo de zero for essa impedância melhor é o sistema de aterramento em questão (SALAM e RAHMAN, 2016). Como uma impedância nula é fisicamente impossível em aplicações práticas, as concessionárias brasileiras de energia elétrica recomendam a utilização de um valor de 10Ω para a impedância de um sistema de aterramento, quando possível (CEMIG, 2002; COPEL, 2002).

Assim, os projetistas de sistemas de aterramento precisam, na hora da elaboração de projetos de novos empreendimentos que serão conectados ao SEP, determinar de forma analítica um valor para impedância de aterramento seguindo recomendações técnicas (ABNT 15749, 2009; ABNT 7117, 2020). Fisicamente, o valor da impedância de aterramento está relacionado às características geoeletricas do solo e às configurações geométricas dos eletrodos de aterramentos. Por um lado, as características geoeletricas do solo, resistividade e permissividade, dependem de certos fatores, como por exemplo: tempo geológico da formação do terreno, condições climáticas às quais está submetido em cada período sazonal do ano (KINDERMANN e CAMPAGNOLO, 1995), intervenções civis de terraplanagem que são realizadas nos terrenos (ABNT 7117, 2020) e frequência dos sinais elétricos impostos ao solo (ALÍPIO e VISACRO, 2014). Por outro lado, a geometria dos eletrodos impacta diretamente na forma com que a densidade de corrente elétrica irá se dissipar pelo solo, bem como na intensidade do acoplamento resistivo existente entre eletrodos de aterramento próximos (SUNDE, 1968, VISACRO, 2002).

Os solos são meios heterogêneos e que têm características geológicas bem diferentes quando se comparam amostras de solos não tão distantes fisicamente (EMBRAPA, 2004). Desse modo, para a realização de projetos de aterramentos é necessário realizar a modelagem geoeletrica do solo, de tal forma que o modelo considerado consiga representar de forma satisfatória as características heterogêneas do solo. Normalmente a modelagem do solo é realizada considerando que ele pode ser descrito como sendo homogêneo ou estratificado em camadas horizontais com parâmetros elétricos diferentes para cada camada (ABNT 7117, 2020).

Além disso, quando é injetado no solo sinais elétricos de baixa frequência, como quando ocorre um curto-circuito no SEP, o parâmetro elétrico do solo, permissividade, não sofre variações significativas quando se considera camadas diferentes do solo (ALÍPIO, 2013), não sendo este parâmetro avaliado em modelos de estratificação do solo em baixas

frequências (ABNT 7117, 2020). A permissividade relativa do solo, para baixa frequências, pode ser considerada como tendo um valor constante igual à 12 (doze) para a maioria das aplicações (ALÍPIO e VISACRO, 2014; LIMA e DE CONTI, 2021). Por outro lado, ainda considerando sinais de baixas frequências, o parâmetro resistividade elétrica aparente do solo, varia significativamente dependendo da composição do solo, de sua umidade e de sua temperatura (VISACRO, 2002). Assim, o solo pode ser caracterizado através de medições padronizadas para se obter o valor de sua resistividade em baixas frequências em um modelo de solo homogêneo ou estratificado em múltiplas camadas horizontais (ABNT 7117, 2020). Não obstante a isso, quando o solo é submetido a sinais de altas frequências, como quando o sistema é atingido por uma descarga atmosférica, a permissividade e principalmente a resistividade do solo passam a ter comportamentos variáveis com a frequência do sinal (ALÍPIO e VISACRO, 2014), e assim a modelagem realizada em baixas frequências passa a não descrever mais o comportamento geológico do solo de forma satisfatória.

Este trabalho tem como objetivo obter modelos de solo que consigam representar de forma satisfatória os solos presentes no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais Campus Ribeirão das Neves (IFMG-RN). Realizando uma modelagem que descreve esses solos como homogêneo, estratificado em duas camadas ou estratificado em três camadas. Além disso, pretende-se discutir de forma objetiva como se escolher o melhor modelo para a representação geológica do solo em aplicações envolvendo sinais de baixas frequências dentro do sistema elétrico de potência. Isso é fundamental para balizar os projetos que determinam analiticamente o valor da impedância de aterramento através do conhecimento da geometria dos eletrodos e das características geológicas do solo (COELHO, 2019). E por fim, discute-se como intervenções civis de terraplanagem, que são realizadas em terrenos, podem ser identificadas através dos modelos elétricos que buscam representar os solos.

2. Abordagem experimental para a obtenção da resistividade do solo em baixas frequências

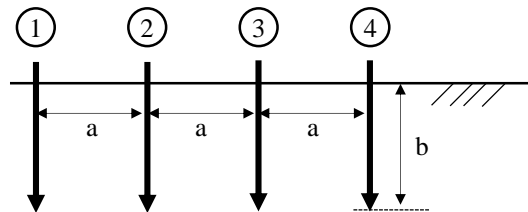
Para obtenção do parâmetro resistividade elétrica do solo, em baixas frequências, existem diversos métodos padronizados, comumente utilizados (ABNT 7117, 2020). O método das quatro hastes segundo o arranjo de Wenner, ou simplesmente método de Wenner (WENNER, 1916), é o método mais utilizado em aplicações de engenharia elétrica para se determinar empiricamente o valor da resistividade do solo em baixas frequências (VISACRO, 2002). Esse método, inicialmente proposto para possibilitar a modelagem eletricamente de solos homogêneos (WENNER, 1916), foi expandido para ser utilizado em modelagens de solos estratificados em múltiplas camadas horizontais (ABNT 7117, 2020).

A Figura 1 é apresentada para se descrever o método de Wenner (WENNER, 1916). Esse método reside em se cravar no solo, em uma profundidade b , quatro hastes de medição (eletrodos) espaçadas em linha reta por uma mesma distância a . Assim, aplicando-se uma corrente I_{apl} nas hastes de medição mais externas, enumeradas na Figura 1 como 1 e 4, é possível medir a diferença de potencial V_{med} que se manifesta nas hastes de medição internas, enumeradas como 2 e 3.

Wenner (1916) mostrou que a resistividade do solo poderia ser determinada através do produto entre um fator geométrico, que relaciona a profundidade b em que as hastes são enterradas e o espaçamento a existente entre elas, e a resistência de aterramento medida,

que é a razão entre V_{med} e I_{apl} , conforme apresentado na equação (1) (ABNT 7117, 2020). Com o auxílio da Figura 1, pode-se inferir que quanto maior for o espaçamento a entre as hastes de medição mais profundo será o caminho que a corrente percorre entre os eletrodos de numeração 1 e 4 (LIMA, 2024). Dessa forma, o espaçamento entre as hastes de medição está relacionado com a profundidade que a corrente pode alcançar e assim quanto maior for o espaçamento entre as hastes mais informações sobre as camadas de solo mais profundas as medições computarão.

Figura 1 – Método das quatro hastes, arranjo de Wenner.



Fonte: Autores.

A resistividade elétrica aparente do solo em função da profundidade a é obtida experimentalmente após aplicação da equação (1) nos dados medidos (ABNT 7117, 2020).

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

Por dedução (WENNER, 1916), a equação (1) é válida para $b \ll a$, sendo que em aplicação práticas de engenharia elétrica, esta condição pode ser considerado como satisfeita quando $b < a/10$. Assim, observando essa premissa, para se obter um comportamento geoeletrico mais completo do solo, com suas possíveis estratificações, é necessário variar a distância a entre as hastes de medição e obter o valor da resistividade do solo para diversas profundidades.

A depender dos valores de resistividade do solo obtidos para diferentes profundidades, os solos podem ser caracterizados como homogêneo, estratificado em duas camadas de solos homogêneos, estratificado 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 (LIMA, 2024): solo homogêneo, Figura 2(a), solo estratificado em duas camadas, Figura 2(b) e solo estratificado em três camadas, Figura 2(c). Observe que para um solo homogêneo a resistividade aparente pode ser considerada como única independente da profundidade, e que para os solos estratificados, as camadas superficiais do solo têm espessuras finitas, h_1 e, quando aplicável, h_2 , ao passo que a camada mais profunda de solo tem espessura considerada infinita. Em cada camada de solo é considerado 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.

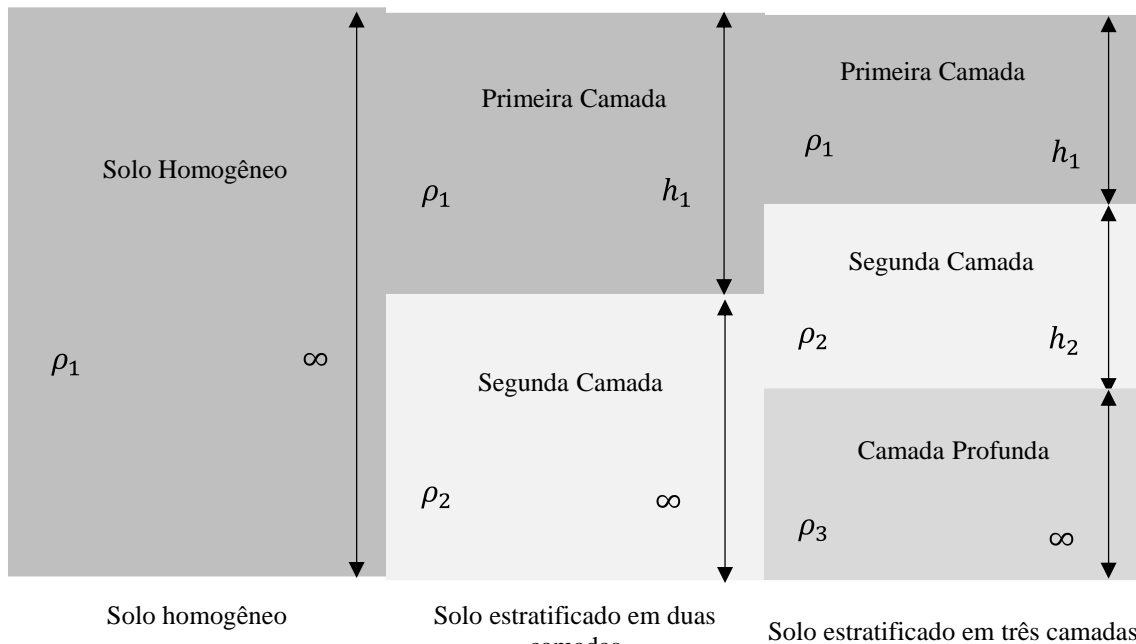
3. Método de inversão para a determinação matemática dos modelos de solos

Para solos homogêneos, que podem ser geoeletricamente modelado com um único valor de resistividade aparente independentemente da profundidade do solo, o valor de sua resistividade pode ser obtida através da média aritmética dos dados amostrais (IEEE, 2013). Para se avaliar o quanto esse valor médio é capaz de descrever o comportamento geoeletrico do solo, pode-se utilizar a equação (2) para avaliar o desvio percentual existente entre os dados amostrais, obtidos pelo método de Wenner, e o valor da

resistividade aparente, valor médio, que representa o solo homogêneo (TAKAHASHI e KAWASE, 1990). Na equação (2), q é a quantidade de amostras obtidas experimentalmente.

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

Figura 2 - Modelos de solos.



Fonte: (LIMA, 2024).

Por outro lado, a norma brasileira (ABNT 7117, 2020) apresenta como métrica para determinação da resistividade aparente de um solo considerado homogêneo, a utilização da média geométrica dos valores medidos. A modelagem do solo homogêneo, considerando a média geométrica, é realizada considerando que os dados podem ser descritos por uma distribuição normal e que os dados que são discrepantes em dois desvios padrões podem ser eliminados.

Muitas vezes o modelo de solo homogêneo conduz a grandes desvios percentuais, considerando o método da média (IEEE, 2013), o que traz um indicativo que esse modelo pode não representar satisfatoriamente os dados amostrais. Pode-se considerar como grande, desvios percentuais superiores à 10,0% (LIMA et al., 2023). Assim, caso o modelo de solo homogêneo retorne desvios percentuais superiores à 10,0%, deve-se buscar uma outra forma para se modelar o solo, sendo o modelo de solo estratificado em duas camadas homogêneas, conforme mostrado na Figura 2(b), um candidato. A equação (3) apresenta uma função amplamente utilizada pela literatura especializada (KINDERMANN e CAMPAGNOLO; 1995) e pelas normas nacionais (ABNT 7117, 2020) e internacionais (IEEE, 2013) para se modelar esse tipo de solo. Observe que a função apresentada na equação (3) tenta descrever o comportamento da resistividade aparente do solo em função da profundidade a .

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

Na equação (3), h_1 é a profundidade da primeira camada do solo, ρ_1 é a resistividade da primeira camada do solo, a é a profundidade em se deseja conhecer o valor da resistividade do solo e K é 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 se utilizar a expressão apresentada na equação (3) na modelagem de solos reais, inicialmente utiliza-se o método de Wenner, equação (1), para se obter q medidas de resistividades do solo em função do espaçamento entre as hastes de medição, em seguida, deve-se ajustar os dados experimentais à função apresentada na equação (3), através de algum procedimento de inversão (ABNT 7117, 2020). Esse ajuste pode ser realizado através do método dos mínimos quadrados (KINDERMANN e CAMPAGNOLO; 1995), que reside em minimizar o resíduo quadrático que existe entre os dados amostrais e os parâmetros da equação (3). Este ajuste pode ser determinado da seguinte forma,

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

Deve-se observar que os valores de h_1 , K e ρ_1 que minimizam os resíduos existentes entre a equação (3) e os dados amostrais não são conhecidos a priori, mas devem ser obtidos através de uma rotina computacional como o método de Newton, o método do Gradiente ou outro (KINDERMANN e CAMPAGNOLO; 1995). Neste trabalho, optou-se pelo método linear para obtenção dos parâmetros que minimizam os resíduos quadráticos.

Obtidos os parâmetros h_1 , K e ρ_1 que melhor ajustam a equação (3), gera-se um modelo de solo estratificado em duas camadas homogêneas válido para baixas frequências. Esse modelo deve ser testado através da equação (2) para se verificar se o desvio percentual é baixo o suficiente para representar satisfatoriamente os dados amostrais (LIMA et al., 2023).

Caso o solo apresente comportamento que não possa ser descrito como estratificado em duas camadas, condição avaliada pelo desvio percentual, e portanto, não possa ser descrito diretamente através da equação (3), deve-se modelar o solo como estratificado em três camadas ou mais, caso necessário. Para realizar a modelagem do solo em multicamadas, podem ser utilizadas abordagens gráficas (ABNT 7117, 2020) ou computacionais (TAKAHASHI e KAWASE, 1990; PERREIRA et al., 2018). Neste trabalho, quando necessário a realização da modelagem do solo em mais de duas camadas, será utilizada a modelagem computacional por essa ser mais precisa que a modelagem gráfica (TAKAHASHI e KAWASE, 1990).

Considerando um solo estratificado em N camadas horizontais é possível realizar a modelagem do solo observando os seguintes passos (TAKAHASHI e KAWASE, 1990; PERREIRA et al., 2018).

1º Passo: obtém-se a função de Kernel (ZHANG et al., 2005), $f(\lambda)$, recursivamente

conforme mostrado a seguir

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

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

2º Passo: de posse do resultado obtido através da equação (5), calcula-se a integral da equação (6) (PERREIRA et al., 2018).

$$F_N(a) = a \int_0^\infty f(\lambda)J_0(\lambda a) d\lambda \tag{6}$$

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

3º Passo: por fim, a resistividade em uma dada profundidade, a , será determinada conforme equação (7).

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

Nota-se que os valores de resistividade do solo e da profundidade das camadas não são conhecidos a priori no primeiro passo. Assim, é necessário a aplicação do método dos mínimos quadrados para minimização do erro de ajuste entre os dados amostrais e a função determinada através da equação (6), conforme descrito para um solo de duas camadas.

4. Investigação experimental da resistividade do solo

Os métodos descritos nas seções 2 e 3 serão utilizados para se determinar o modelo geoeétrico de três solos com características diferentes em relação à intervenção civil realizada neles e assim se 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

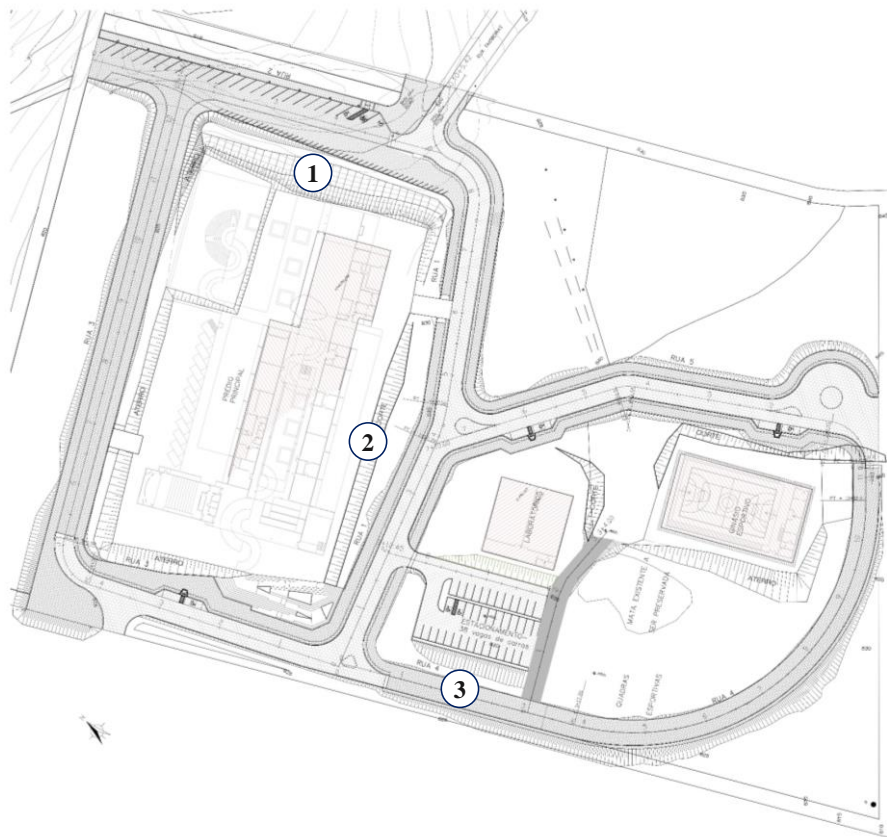
Os solos escolhidos para a realização das medições de resistividade aparente estão localizados no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais Campus Ribeirão das Neves (IFMG-RN). O IFMG-RN conta com uma área aproximada de quarenta e três mil metros quadrados, que passaram ao longo do tempo por diversas intervenções civis, o que possibilita a escolha de áreas com características diferentes para a obtenção dos dados amostrais. Foram escolhidas três áreas para a realização das medições, conforme apresentado na Figura 3. A área é fortemente acidentada e tem diversos prédios construídos o que limita a aplicação de procedimentos aplicáveis em áreas livres previstos em norma (ABNT 7117, 2020).

Em relação as características gerais do terreno do IFMG-RN, vale destacar que ele está localizado em uma região acidentada e de cerrado, região classificada pela Embrapa (2004) como sendo de solo do tipo argissolo vermelho-amarelo distrófico. Solos distróficos apresentam uma baixa presença de cátions básicos trocáveis (EMBRAPA, 2006), o que implica em uma baixa quantidade de portadores de cargas elétricas disponíveis no solo, fato esse que tende a tornar o solo pouco condutivo, ou seja, com valores elevados de resistividade do solo.

Não obstante as características gerais do terreno, para que fosse possível a construção dos prédios, do ginásio e dos estacionamentos do IFMG-RN foram necessárias intervenções civis de terraplanagem no solo, ou seja, a realização de cortes e aterros no terreno. É esperado que essas intervenções civis modifiquem as características originais do solo (VISACRO, 2002), posto que para a realização da terraplanagem no terreno é necessário ou a retirada de terra, o que pode retirar uma camada do solo que tem alguma característica específica em relação ao restante do solo, ou a inclusão de terra, que pode adicionar no solo uma camada com características elétricas diferentes do solo original. As três áreas escolhidas no IFMG-RN têm as seguintes características geológicas e civis:

- Área 1 – Região localizada a uma altitude de 825 m, após aterro no terreno, área em que foi necessário a realização de aterro com a inclusão de aproximadamente dois metros de terra.
- Área 2 - Região localizada a uma altitude de 830 m, após o corte que foi realizado no terreno. Essa é a área em que estão concentradas as principais cargas.
- Área 3 – Região localizada a uma altitude de 825 m, nessa área não foi realizada nenhuma intervenção civil de aterro ou corte no terreno.

Figura 3 – Locais de realização das medições no IFMG-RN.



Fonte: Adaptado de (IFMG, 2013).

4.2. Resultados e discussões

Os valores de resistividades do solo obtidos experimentalmente para as áreas em estudo são apresentados na Tabela 1, onde se nota, conforme a expectativa, que os valores de resistividade variam com o espaçamento considerado entre as hastes de medição, ou seja, que a resistividade varia conforme a profundidade do solo. Além disso, percebe-se que a resistividade também varia significativamente conforme são consideradas áreas diferentes. Conforme discutido em (LIMA et al., 2023), posto que as medições foram realizadas em solos de cerrado que possibilitam um bom contato elétrico entre as hastes de medição e solo, o espaçamento mínimo considerado entre as hastes foi de 3,0 m.

Tabela 1 – Resistividades do solo obtidas experimentalmente.

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: Obtida pelos autores.

A partir dos valores medidos de resistividade do solo, a primeira hipótese que deve ser levantada é se as áreas podem ser caracterizadas como um solo homogêneo descrito como uma única camada com resistividade constante, posto que este é o modelo de solo mais simples. A Tabela 2 apresenta os valores de resistividades que representam as áreas como um solo homogêneo, bem como o desvio percentual obtido para esse tipo de modelagem. Observa-se na Tabela 2 que o desvio percentual obtido é de 14,42%, 8,82% e 22,61%, respectivamente para a Área 1, para a Área 2 e para a Área 3. Nota-se que para a Área 2 o desvio percentual tem valor inferior à 10,0%, ao passo que as outras áreas têm desvios percentuais acima de 14%, isso traz um indicativo que o modelo de solo homogêneo é uma boa opção para representar o solo da Área 2, por outro lado, para as áreas 1 e 3 o modelo de solo estratificado em duas camadas deve ser avaliado para tentar descrever mais satisfatoriamente estas áreas.

Aplicando o método dos mínimos quadrados para ajustar os parâmetros da equação (3) aos dados amostrais da Tabela 1 é possível obter ρ_1 , ρ_2 , h , k e o desvio percentual, conforme mostrado na Tabela 3. Com base nos parâmetros da Tabela 3 é possível obter as curvas de resistividade do solo em função da profundidade, Figura 4. Com base nos parâmetros da Tabela 3 é possível obter as curvas de resistividade do solo em função da profundidade através da equação (3), 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: Obtida pelos autores.

Observa-se comparando a Tabela 2 com a Tabela 3 que o desvio percentual diminuiu para todas as áreas quando se utiliza o modelo de solo estratificado em duas camadas em detrimento ao modelo de solo homogêneo. Esse resultado é bastante razoável considerando que quanto maior é a quantidade de camadas de solos horizontais

consideradas na modelagem, mais os dados experimentais conseguem ser descritos pelo modelo matemático (ZHANG et al., 2005). Por outro lado, quanto maior é a quantidade de camadas consideradas no modelo, mais complexo ele fica e mais difusa fica a interpretação física dos resultados. Nota-se pela Tabela 3 que para a estratificação do solo em duas camadas, as áreas 1 e 2 apresentaram desvios percentuais abaixo de 9,0%, ao passo que a área 3, desvio acima de 15,0%. Vale ressaltar que o desvio percentual obtido para o caso de solos estratificados é dado pela média da distância entre os dados experimentais e a curva analítica obtida via equação (3), ver Figura 4.

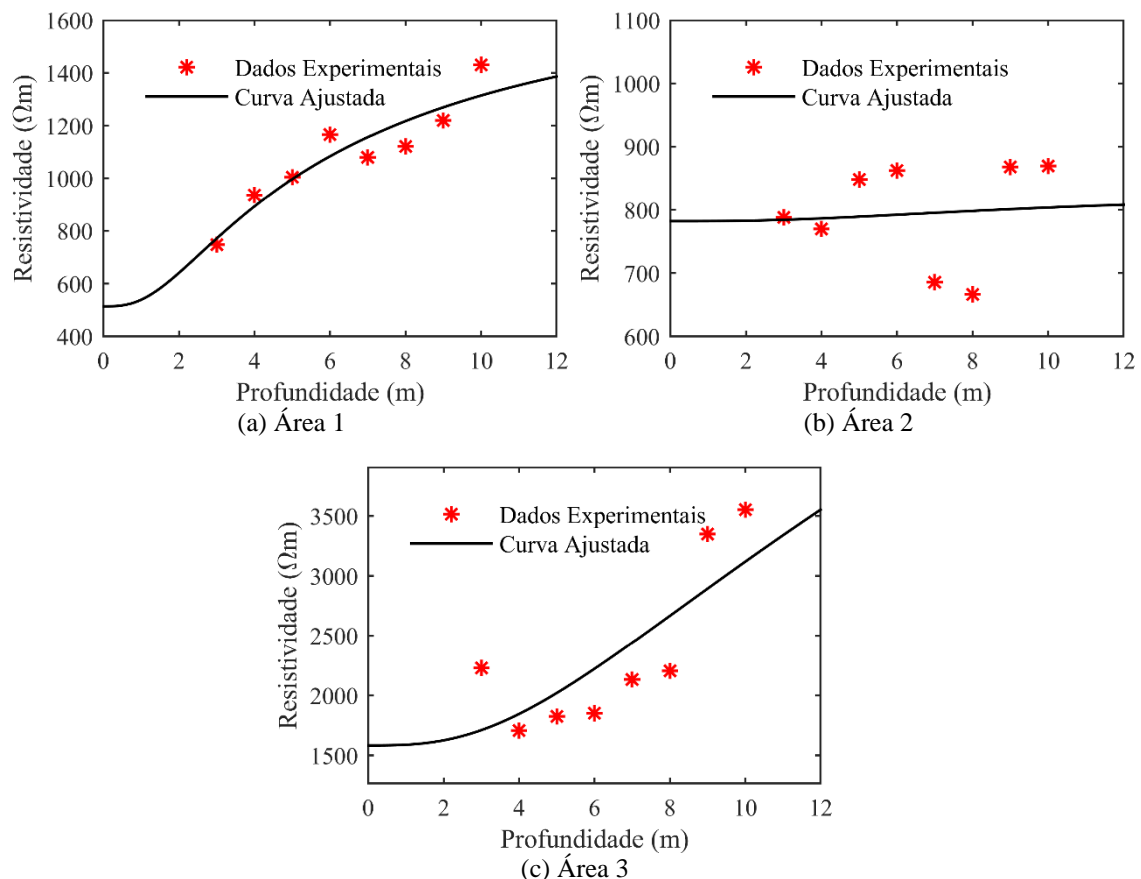
Tabela 3 – Parâmetros de ajuste do solo estratificado em duas camadas

	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: Obtida pelos autores.

Nota-se através da Figura 4(a) e da Figura 4(b) que o comportamento dos dados experimentais é bem descrito pelos parâmetros da Tabela 3 para as áreas 1 e 2. Assim, os solos presentes nessas áreas podem ser representados de forma satisfatória como estratificados em duas camadas e assim podem ser modelados pela equação (3). Observa-se, conforme previsto (LIMA et al., 2023), que um erro percentual abaixo de 10% possibilitou um ótimo ajuste dos dados experimentais as curvas geradas pela equação (3).

Figura 4 – Curvas ajustadas de um solo estratificado em duas camadas.



Fonte: Elaborada pelos autores.

Note que para a Área 2, obteve-se um desvio percentual de 8,82% quando se modelou o solo como homogêneo, e um desvio percentual de 8,61% quando ele foi modelado como estratificado em duas camadas. Assim, percebe-se que o acréscimo de complexidade no modelo de solo não conduziu a uma diminuição significativa no desvio percentual. Dessa

forma, não é vantajoso se utilizar um modelo mais complexo para a Área 2 em detrimento do modelo mais simples, sendo uma melhor opção modelá-lo como homogêneo.

Por seu turno, o desvio percentual obtido para a área 3 está acima de 15,0%, Tabela 3, trazendo um indicativo que a equação (3) não consegue representar satisfatoriamente os dados amostrais. Assim, o solo da área 3 não é caracterizado com uma fidelidade adequada por um modelo de solo estratificado em duas camadas. Isso é corroborado com a observação da Figura 3(c) que mostra os dados experimentais em conjunto com a curva ajustada. Observa-se que os dados amostrais não são muito bem descritos pela curva, o que traz um indicativo que um modelo de solo estratificado em duas camadas não é adequado para a representação da Área 3 e o próximo candidato que pode representar melhor os dados amostrais é modelo de solo estratificado em três camadas.

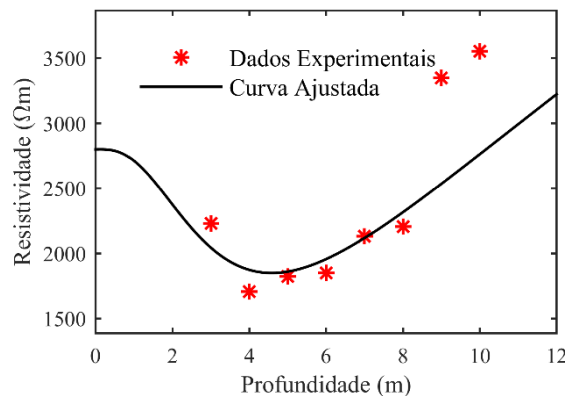
A partir da modelagem da Área 3 como um solo estratificado em três camadas é possível obter os resultados apresentados na Tabela 4. Nota-se com esses resultados que o desvio percentual obtido nesta aproximação é menor que 10,0%, além de ser a metade do valor obtido quando esta área foi estratificada em duas camadas, Tabela 3. Com os resultados da Tabela 4 é possível obter uma curva da resistividade do solo em função da profundidade para a Área 3, via equação (7), Figura 5. Observe que a curva ajustada da Figura 5 consegue representar melhor os dados amostrais que a curva ajustada da Figura 4(c). Como o desvio percentual ficou abaixo de 10,0% e a curva da Figura 5 conseguiu descrever de forma satisfatória o comportamento dos dados amostrais, pode-se considerar que a Área 3 consegue ser representada através de um modelo de solo estratificado em três camadas.

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

	ρ_1 (Ωm)	ρ_2 (Ωm)	ρ_3 (Ωm)	h_1 (m)	h_2 (m)	Desvio (%)
Área 3	2800,0	900,0	22000,0	2,0	3,5	6,9719

Fonte: Obtida pelos autores.

Figura 5 – Curva ajustada de um solo estratificado em três camadas para a Área 3.



Fonte: Elaborada pelos autores.

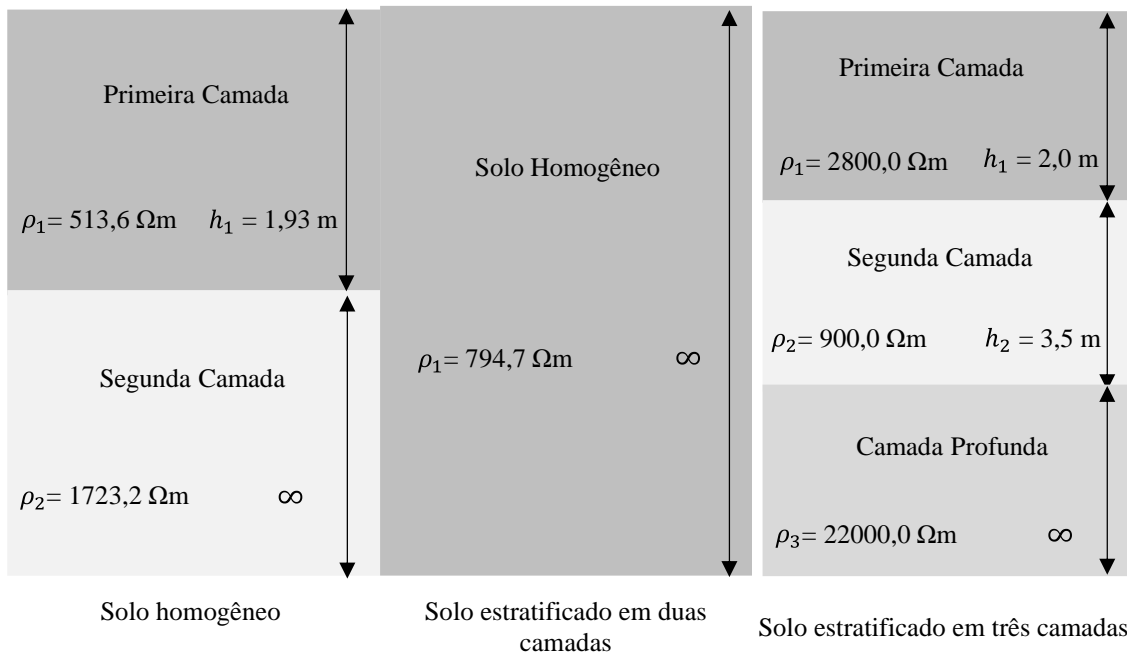
Obtidos os modelos de solo que consegue representar as áreas avaliadas neste trabalho, considerando o critério da simplicidade e do desvio percentual, é possível esquematizar os perfis de estratificação do solo conforme apresentado na Figura 6. Esses perfis são comumente utilizados em aplicações de engenharia elétrica para descrever de forma visual o comportamento elétrico dos solos (ABNT 7117, 2020) e auxiliar os projetistas na determinação da impedância de um sistema de aterramento.

Com o auxílio da Figura 6 e da descrição dos terrenos, seção 4.1, é possível inferir que para a Área 1, o aterro adicionou no terreno uma camada superficial, aproximadamente de 2 m, de terra com um valor de baixa resistividade. Observe que ao realizar a

modelagem elétrica do solo, o modelo estratificado em duas camadas, Figura 6(a), conseguiu computar, com uma excelente precisão, essa camada de terra adicionada pelo aterro na Área 1. Esse resultado é de grande relevância, mostrando que o método de Wenner em conjunto com o modelo de solo estratificado é robusto o suficiente a ponto de conseguir trazer informações sobre camadas de solos as quais não foram realizadas medidas diretas. Basta observar que, em tese, os dados obtidos na Tabela 1 são para profundidade maiores do que 3 m, entretanto devido a propagação de corrente pelas hastes de medições cada dado medido traz informações sobre todas as camadas de solos até a profundidade referida na Tabela 1.

Por outro lado, enquanto o solo da Área 2 pôde ser modelado através de um solo homogêneo, o solo da Área 3 teve que ser modelado através de um solo estratificado em três camadas. Nota-se que a segunda camada do solo da Área 3, Figura 6(c), tem um valor de resistividade parecido com o valor de resistividade do solo da Área 2, Figura 6(b). A diferença entre esses valores é inferior a 12,0%. Uma interpretação possível para este resultado é que o terreno da Área 2 poderia ser um solo estratificado em duas camadas sendo que o corte realizado retirou a camada superficial de terra. Fazendo com que a Área 2 não conte mais com a camada superficial de terra original, podendo ser representada por um solo homogêneo.

Figura 6 – Perfis de estratificação dos solos investigados.



Fonte: Autores.

Por fim, observa-se que as resistividades para as camadas profundas das três áreas apresentam valores significativamente diferentes. Retornando a Tabela 1, verifica-se que na aplicação do método de Wenner a expectativa com as medições é determinar a resistividade do solo até uma profundidade de 10,0 m, entretanto os valores medidos foram extrapolados até o infinito (ZHANG et al., 2005). Além disso, as áreas avaliadas estão distantes entre si a aproximadamente 120,0 m, ou seja, a medição da resistividade de uma área não é capaz de trazer informações precisas sobre a resistividade de outras áreas, conseguindo mostrar somente um comportamento mais geral sobre a resistividade do solo. Dessa forma, para se ter uma maior convergência nos valores de resistividade das camadas profundas é necessário realizar medições de resistividades considerando um espaçamento maior entre as hastes de medição no método de Wenner. Entretanto, como

grande parte da dissipação de corrente em um sistema de aterramento ocorre nas camadas superficiais de solo, as camadas mais profundas têm menor influência na dissipação de corrente quando comparado com as camadas superficiais.

5. Considerações finais

O conhecimento das características elétricas dos solos é fundamental para se entender o processo de dissipação de corrente pelo solo e por consequência de como ele impacta no valor da impedância de um sistema de aterramento. Os solos, comumente, podem ser modelados como homogêneos, estratificados em duas camadas ou estratificados em três camadas. Assim, este trabalho buscou modelar solos que passaram por alguma intervenção civil, aterro ou corte, e verificar como os modelos de solos são sensibilizados por essas intervenções.

Para o terreno que passou pelo processo de aterro, Área 1, percebeu-se que o modelo de solo conseguiu identificar de forma consistente como a inclusão de terra impactou na resistividade do solo. Notou-se que para a Área 1, o modelo de solo estratificado em duas camadas representou satisfatoriamente o terreno, e que a espessura da primeira camada no modelo de solo é praticamente a mesma espessura do aterro realizado na área.

Para o terreno que passou pelo processo de corte, Área 2, observou-se que essa área pôde ser modelada como um solo homogêneo. Assim, é possível inferir, a partir dos resultados deste trabalho e das expectativas em relação à estratificação de solos naturais, que a retirada de terra nesta área, proporcional a retirada da camada superficial de solo.

Referências

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Instalações Elétricas de Baixa Tensão**. ABNT NBR 5410, Rio de Janeiro, 2008.

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Medição de Resistência de Aterramento e de potenciais na superfície do solo em sistema de aterramento**. ABNT NBR 5410, Rio de Janeiro, 2009.

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Medição da Resistividade e Determinação da Estratificação do Solo**. ABNT NBR 7117, Rio de Janeiro, 2020.

ALIPIO, Rafael S., **Dependência da Frequência dos Parâmetros do Solo: Efeito no Comportamento Impulsivo de Aterramentos Elétricos**, Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. 2013.

ALIPIO, Rafael. VISACRO, Silvério, Modeling the Frequency Dependence of Electrical Parameters of Soil, **IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility**, vol. 56, no. 5, pag. 1163-1171, Outubro, 2014.

CEMIG, COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GERAIS. *Fornecimento de Energia Elétrica em Média Tensão Rede de Distribuição Aérea ou Subterrânea*. Norma de Distribuição, ND-5.3, Belo Horizonte, 2022.

COELHO, Rafael S., Uma Contribuição à Análise de Sistemas de Aterramento em Meios Horizontalmente Estratificados, Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia. 2019.

COPEL, COMPANHIA PARANAENSE DE ENERGIA. *Fornecimento de Tensão Primária de Distribuição*. Normas técnicas da COPEL, NTC 903100, Curitiba, 2002.

EMBRAPA, EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Mapeamento de Solos e Aptidão Agrícola das Terras do Estado de Minas Gerais**. ISSN 1678-0892. Rio de Janeiro. Dezembro de 2004.

EMBRAPA, EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 2. ed. Rio de Janeiro. 2006.

IEEE, INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. *IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding*, Std 80™, 2013.

IFMG, INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MINAS GERAIS. **Projeto Executivo Geométrico - Planta Geral**. Ribeirão das Neves. 2013.

KINDERMANN, Geraldo; CAMPAGNOLO, José Mário. **ATERRAMENTO ELÉTRICO**. 3ª Edição. Porto Alegre: Sagra DC-Luzzatto, 1995.

LIMA, G. S., DE CONTI, A., Narrowband PLC Channel Attenuation Due to a Multi-Grounded Neutral, **IEEE Transactions on Power Delivery**, Vol. 36, No. 2, April, pp. 639-650, 2021.

LIMA, G. S., JUNIOR, A. L. P., 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**, Vol. 15, No. 1, 2023.

LIMA, G. S., Conceitos Básicos e Procedimentos Práticos Aplicados a Aterramentos Elétricos: Uma abordagem Elaborada para Cursos Técnicos, **Revista de Engenharia e Tecnologia**, Vol. 16, No. 1, 2024.

PERREIRA, 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**, vol. 10, no. 1, pp. 229-247, 2018.

PIANTINI, A. **Lightning Interaction with Power Systems: Fundamentals and Modelling: Volume 1**, Institution of Engineering & Technology. 2020.

SALAM, A., RAHMAN, Q. **Power Systems Grouding**. 1ª Edição. Springer, 2016.

SUNDE, E., **Earth Conduction Effects in Transmission Systems**, 2 edição, New York: Dover, 1968.

TAKAHASHI T., KAWASE T., Analysis of apparent resistivity in a multi-layer structure, **IEEE Trans. on Power Delivery**, vol. 5, no. 2, pp. 604- 612, 1990.

VISACRO, Silvério. **ATERRAMENTOS ELÉTRICOS: Conceitos Básicos, Técnicas de Medição e Instrumentação e Filosofias de Aterramento**, Artliber Editora Ltda, São Paulo, SP. 2002.

WENNER, F., Method of measuring earth resistivity, Bulletin of the national bureau of standards, Washington D. C., vol. 12, 1916.

ZHANG B., CUI X., LI L., HE J., Parameter estimation of horizontal multilayer earth by complex image method, **IEEE Trans. on Power Delivery**, vol. 20, no. 42, pp. 1394-1401, 2005.