



## MODELAGEM GEOELÉTRICA DE SOLOS PARA A INVESTIGAÇÃO DO IMPACTO DA TERRAPLANAGEM NO VALOR DE SUA RESISTIVIDADE

Ana Clara Fernandes de Souza<sup>1</sup>; Caio Saylon Pereira Lima<sup>2</sup>; Igor Caetano Tibério Figueiredo<sup>3</sup>; Julia da Cruz Souza<sup>4</sup>; Laura Nascimento Silva<sup>5</sup>; Gabryelle Bessa Vitor<sup>6</sup>; Francisco Souto Gomes<sup>7</sup>; Alberto Luiz de Paula Junior<sup>8</sup>; Renato Ribeiro Aleixo<sup>9</sup>; Guilherme da Silva Lima<sup>10</sup>

1 Ana Clara Fernandes de Souza, Bolsista IFMG, Técnico em Eletroeletrônica, IFMG Campus Ribeirão das Neves, Ribeirão das Neves - MG; [aninhafs59@gmail.com](mailto:aninhafs59@gmail.com)

2 Caio Saylon Pereira Lima, Bolsista IFMG, Técnico em Eletroeletrônica, IFMG Campus Ribeirão das Neves, Ribeirão das Neves - MG; [limacaio102@gmail.com](mailto:limacaio102@gmail.com)

3 Igor Caetano Tibério Figueiredo, Técnico em Eletroeletrônica, IFMG Campus Ribeirão das Neves, Ribeirão das Neves - MG

4 Julia da Cruz Souza, Técnico em Eletroeletrônica, IFMG Campus Ribeirão das Neves, Ribeirão das Neves - MG

5 Laura Nascimento Silva, Técnico em Eletroeletrônica, IFMG Campus Ribeirão das Neves, Ribeirão das Neves - MG

6 Gabryelle Bessa Vitor, Técnico em Eletroeletrônica, IFMG Campus Ribeirão das Neves, Ribeirão das Neves - MG

7 Francisco Souto Gomes, Técnico em Eletroeletrônica, IFMG Campus Ribeirão das Neves, Ribeirão das Neves - MG

8 Alberto Luiz de Paula Junior, Professor do IFMG, Pesquisador do IFMG, Campus Ribeirão das Neves;

9 Renato Ribeiro Aleixo, Professor do IFMG, Pesquisador do IFMG, Campus Ribeirão das Neves;

10 Guilherme da Silva Lima, Orientador do Projeto e Pesquisador do IFMG, Campus Ribeirão das Neves; [guilherme.silva@ifmg.edu.br](mailto:guilherme.silva@ifmg.edu.br)

### RESUMO

A modelagem geométrica do solo é fundamental para o desenvolvimento de projetos de aterramentos elétricos, em que, além da geometria dos eletrodos de aterramento, a resistividade do solo, influência de forma direta no valor da resistência desses sistemas. Não obstante a estes dois fatores fundamentais na etapa dos projetos, intervenções civis como cortes e aterros que são realizadas em um terreno podem modificar as características elétricas do solo natural e dessa forma modificar significativamente suas propriedades físicas. Para a realização da modelagem geométrica de um solo, o método de Wenner é o mais utilizado para se obter um conjunto de dados experimentais que representam o valor da resistência imposta pelo solo a passagem da corrente para diferentes profundidades. Através dos dados experimentais é possível realizar diferentes procedimentos para a inversão dos dados experimentais e consequente obtenção da resistividade do solo em baixas frequências. Com os valores de resistividade é possível modelar eletricamente o solo, permitindo a aplicação do modelo em projetos de aterramento dentro do Sistema Elétrico de Potência. Este resumo expandido irá discutir e avaliar como a terraplanagem pode impactar na modelagem geométrica do solo e para isso se considera na investigação três terrenos diferentes: (i) um terreno onde foi realizado um aterro, (ii) um terreno onde foi realizado um corte, e (iii) um terreno natural onde não ocorreu intervenção civil. Visando obter o cenário mais crítico que descreve o comportamento dos solos investigados, as medições foram realizadas em um período de seca em que foram registrados mais de cem dias de estiagem antes das medições, isso garante uma baixa umidade do solo e um pior cenário de condução de corrente por ele. Nas análises deste resumo, os solos foram modelados como sendo homogêneos, ou seja, considerando que um único valor de resistividade aparente é capaz de representar as características elétricas dele sem a necessidade de estratificação do solo. Percebeu-se que as intervenções civis modificam o valor da resistividade do solo, como era esperado, e que o modelo de solo homogêneo pode ser insuficiente para representar de forma significativa as características físicas de um solo real, sendo pois necessário a realização de uma modelagem mais rigorosa através de estratificações do solo.

**PALAVRAS CHAVES:** Aterramento Elétrico, Resistividade do Solo, Modelagem Geométrica

### INTRODUÇÃO:



O sistema de aterramento é essencial para a proteção de equipamentos e pessoas próximas a sistemas elétricos de qualquer nível de tensão, cumprindo como função principal o escoamento de correntes elétricas advindas de falhas de isolamento, curto circuitos e descargas atmosféricas (Visacro, 2002). Idealmente, na maioria das filosofias de aterramentos elétricos utilizadas, para se garantir maior eficácia no processo de escoamento das correntes pelo sistema de aterramento, o valor da impedância deve ser próximo de zero (Kindermann e Campagnolo, 1995). Contudo, alcançar esse valor é fisicamente inviável, dado que isso só seria possível em uma situação ideal onde os solos não impõem resistência a passagem da corrente. Como o valor de impedância nula é inalcançável, em dimensionamentos de projetos de aterramento as distribuidoras de energia elétrica estipulam para cada nível de tensão qual é o valor esperado para essa impedância (CEMIG, 2022).

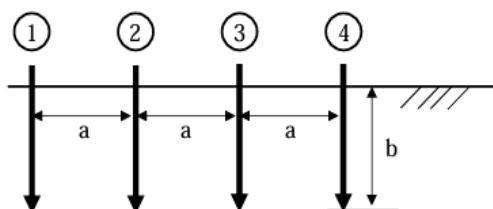
A resistividade e a permissividade do solo são fatores críticos para modelagem geolétrica e, portanto, investigados em diversos trabalhos sobre aterramentos elétricos (Alípio e Visacro, 2014). Diversos fatores influenciam essas propriedades, incluindo a idade geológica do terreno, características de formação (tipo de solo), variações sazonais (como chuva, temperatura e umidade), e as alterações resultantes de atividades humanas, como construções e terraplanagem. Tais variáveis são amplamente estudadas na literatura, dado seu impacto na precisão dos modelos de solo empregados em sistemas de aterramento (Kindermann e Campagnolo, 1995; Visacro, 2022). Um modelo adequado de sistema de aterramento exige, portanto, que se reflita com precisão suas características, sendo utilizado para isso modelos de solos homogêneos e heterogêneos que irão ser escolhido conforme a necessidade de cada tipo de solo (Lima, 2024).

Este resumo expandido tem como objetivo apresentar modelos geolétricos que representem a resistividade dos solos que sofrem intervenção civil e estão localizados no Instituto Federal de Minas Gerais campus Ribeirão das Neves (IFMG-RN). Além disso, em complemento aos resultados apresentados neste resumo, o projeto de pesquisa do qual originou este trabalho, irá buscar definir os modelos geolétricos para diversos campi do IFMG, bem como analisar o impacto da sazonalidade nos valores de resistividade do solo e da resistência de aterramento de algumas configurações de eletrodos. Com esse intuito, será abordado o método de Wenner (1916), amplamente utilizado e reconhecido na literatura para a medição de resistividade de um solo.

## METODOLOGIA:

Para obtenção da resistividade aparente do solo, existem diversos métodos padronizados (ABNT 7117, 2020). O método de Wenner (1916), Figura 1, é o mais utilizado em aplicações de engenharia elétrica para se obter empiricamente o valor da resistividade em baixas frequências (Visacro, 2002). Esse método reside em se cravar no solo, em uma profundidade  $b$ , quatro hastes de medição espaçadas em linha reta por uma mesma distância  $a$ . Assim, aplicando-se uma corrente  $I_{apl}$  nas hastes 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  $I_{apl}$ . 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 a 4 (Lima, 2024).

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



Fonte: (Lima et al., 2024).

A resistividade aparente do solo em função da profundidade  $a$  pode ser obtida após aplicação da equação (1) nos dados medidos (ABNT 7117, 2020). Este é um dos possíveis métodos de inversão de dados na modelagem geolétrica e será utilizado neste resumo expandido.

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

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  $b < a/10$ .

Concluído o processo de inversão dos dados e obtenção dos valores de resistividade do solo para diferentes profundidades, para solos considerados como homogêneos, a resistividade aparente é obtida através da média aritmética ou geométrica dos dados amostrais, enquanto para solos estratificados, é necessário utilizar modelos matemáticos mais complexos, como o modelo de solo estratificado em duas ou três camadas. Considerando um solo homogêneo, após determinada o valor de resistividade aparente, o desvio percentual é utilizado para avaliar a precisão do modelo, sendo que em trabalhos anteriores foi mostrado que desvios inferiores à 10% podem ser considerados como satisfatórios (Lima et al., 2024). Para desvios maiores que 10%, é necessário considerar modelos mais complexos para representar o solo. Esses métodos devem permitir a obtenção de modelos geolétricos mais precisos para aplicações práticas de engenharia elétrica, considerando solos homogêneos ou estratificados em múltiplas camadas.

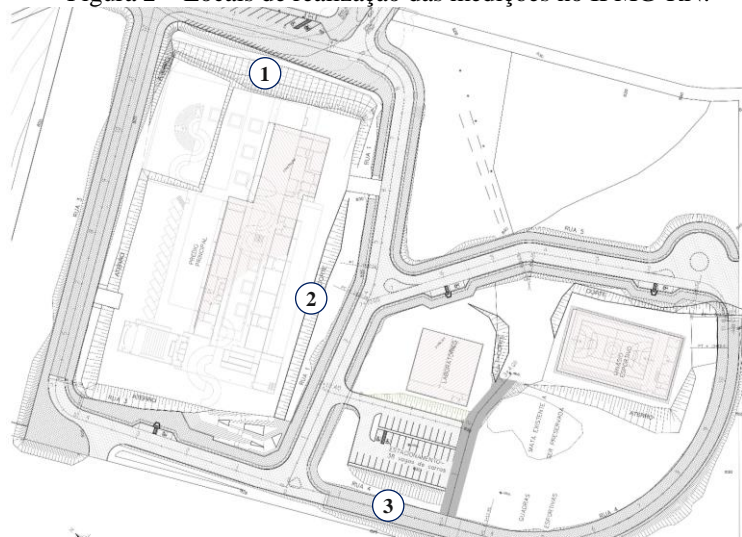
## RESULTADOS E DISCUSSÕES:

As três localidades em que foram realizadas as medições são apresentadas na Figura 2. Uma descrição detalhada das características geográficas de cada uma delas pode ser encontrada em (Lima et al., 2024). Os valores de resistividades do solo obtidos experimentalmente para as áreas em estudo são apresentados na Tabela 1, em que se nota, conforme a expectativa, que a resistividade varia conforme a profundidade do solo (Visacro, 2002). Além disso, percebe-se que a resistividade também varia conforme são consideradas áreas diferentes. As áreas de medição são relativamente próximas, 120 m de afastamento entre elas, sendo discutido em (Lima et al., 2024) como a terraplanagem realizada em duas dessas áreas impactou nos valores de resistividade do solo. Neste resumo uma análise mais focada será realizada.

Conforme visto na Tabela 2, a modelagem de solo homogêneo se mostrou adequada para uma das áreas estudadas (Área 2), com um desvio percentual de 8,82%, indicando que essa área pode ser representada por uma única camada com resistividade constante. Por outro lado, as outras duas áreas estudadas (Área 1 e 3) necessitaram de modelos mais complexos. Em uma análise detalhada dos resultados (Lima et al., 2024) revelou-se características específicas de cada área, em que a Área

1 apresentou uma camada superficial de baixa resistividade, provavelmente devido ao aterro realizado no terreno, enquanto a Área 3 necessitou de três camadas para ser representada com precisão, pois era a única área de solo natural.

Figura 2 – Locais de realização das medições no IFMG-RN.



Fonte: (Lima et al., 2024).

Tabela 1 – Resistividades do solo obtidas experimentalmente.

Espaçamento entre hastes (m)	Resistividade do Solo ( $\Omega\text{m}$ )		
	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: (Lima et al., 2024).

Tabela 2 – Parâmetros de ajuste para o solo homogêneo

	$\rho$ ( $\Omega\text{m}$ )	Desvio (%)
Área 1	1088,0	14,42
Área 2	794,7	8,82
Área 3	2356,4	22,61

Fonte: (Lima et al., 2024).

Por fim, observa-se que as resistividades para as camadas profundas das três áreas apresentam valores significativamente diferentes. Verifica-se que na aplicação do método de Wenner neste projeto foram realizadas medições para a resistividade do solo até uma profundidade de 10,0 m entretanto os valores medidos foram extrapolados até o infinito. 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 (Lima, 2024), as camadas mais profundas têm menor influência na dissipação de corrente quando comparado com as camadas superficiais.

## CONCLUSÕES:

O conhecimento das características elétricas dos solos é fundamental para se entender o processo de dissipação de corrente por ele e por consequência de como o solo 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. Como mostrado em (Lima et al., 2024), 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 impacta a 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. **Medição da Resistividade e Determinação da Estratificação do Solo**. ABNT NBR 7117, Rio de Janeiro, 2020.
- ALIPIO, R. VISACRO, S., Modeling the Frequency Dependence of Electrical Parameters of Soil, **IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility**, vol. 56, no. 5, pag. 1163-1171, Out., 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.
- KINDERMANN, Geraldo; CAMPAGNOLO, José Mário. **ATERRAMENTO ELÉTRICO**. 3ª Edição. Porto Alegre: Sagra DC-Luzzatto, 1995.
- LIMA, G. S., Conceitos Básicos e Procedimentos Práticos Aplicados a Aterramentos Elétricos: Uma abordagem Elaborada para Cursos Técnicos, **Revista de Engenharia e Tecnologia**, v. 16, n. 1, 2024.
- LIMA, G. S et al. Modelagem Geométrica, Discussões e Análises de Engenharia sobre o impacto da Terraplanagem nos Modelos de Solo Estratificados em Múltiplas Camadas. **REVISTA DE ENGENHARIA E TECNOLOGIA**, v. 16, n. 1, 2024.
- VISACRO, Silvério. **ATERRAMENTOS ELÉTRICOS: Conceitos Básicos, Técnicas de Medição e Instrumentação e Filosofias de Aterramento**, Artliber Editora Ltda, SP. 2002.
- WENNER, F., Method of measuring earth resistivity, Bulletin of the national bureau of standards, Washington D. C., vol. 12, 1916.