

CONCEITOS BÁSICOS E PROCEDIMENTOS PRÁTICOS APLICADOS A ATERRAMENTOS ELÉTRICOS Uma abordagem Elaborada para Cursos Técnicos

Guilherme da Silva Lima (IFMG) E-mail: guilherme.silva@ifmg.edu.br

Resumo: Com a implementação do novo ensino médio no Brasil e com a expansão da Rede Federal de Educação Tecnológica, conteúdos de disciplinas de nível superior pertencentes ao eixo das engenharias estão sendo apresentados e discutidos para discentes em disciplinas de cursos técnicos de nível básico. Esse processo, muitas vezes, tem feito com que discentes sejam submetidos a materiais didáticos inapropriados para seu nível de ensino devido à carência de materiais adequados. Buscando mitigar esse fenômeno, faz-se necessário um diálogo estreito entre os profissionais da área de física, que comumente apresentam expertise no ensino de conteúdos para discentes de nível básico, e os profissionais das áreas de engenharia. Somente assim será possível disponibilizar materiais profundos e adequados para o estudo de conceitos físicos aplicados de forma prática em engenharia. Dessa forma, este trabalho propõe uma abordagem teórico-prática sobre os principais conceitos envolvidos com aterramentos elétricos discutidos de forma acessível aos discentes de cursos técnicos integrados ao ensino médio.

Palavras-chave: Aterramentos Elétricos, Resistividade Elétrica, Resistividade do Solo, Resistência Elétrica, Resistência de Aterramento.

BASIC CONCEPTS AND PRACTICAL PROCEDURES APPLIED TO ELECTRICAL EARTHINGS An Elaborate Approach to Technical Courses

Abstract: With the implementation of the new high school in Brazil and with the expansion of the Federal Technological Education Network, contents of university discipline belonging to the engineering axis are being presented and discussed for students in technical course discipline. This process has often resulted in students being subjected to teaching materials that are inappropriate for their level of education due to a lack of suitable materials. Seeking to mitigate this phenomenon, a close dialogue is necessary between professionals in the area of physics, who commonly have expertise in teaching content to basic level students, and professionals in the areas of engineering. Only in this way will it be possible to provide in-depth and suitable materials for the study of physical concepts applied in a practical way in engineering. Therefore, this paper proposes a theoretical-practical approach to the main concepts involved with electrical grounding, discussed in an accessible way for students of technical courses integrated into high school.

Keywords: Electrical Grounding, Electrical Resistivity, Soil Resistivity, Electrical Resistance, Grounding Resistance.

1. Introdução

Sistemas de aterramentos elétricos são construídos, basicamente para: (i) criar-se um ponto de referência no Sistema Elétrico de Potência (SEP), em que o potencial elétrico é considerado nulo; (ii) criar-se um caminho de baixa resistência para o escoamento das correntes de falha do SEP, que são correntes elétricas de baixa frequência, tipicamente 60 Hz; e (iii) criar-se um caminho de baixa impedância para o escoamento das correntes associadas a fenômenos naturais de origem atmosférica, que são correntes elétricas de alta frequência [1-3].

No processo de desenvolvimento dos sistemas de aterramentos, os técnicos formados, principalmente, nas áreas de eletrotécnica e eletroeletrônica são muitas vezes responsáveis pela interpretação e execução de projetos de aterramento. Dentro dessa perspectiva, na formação educacional destes técnicos, conceitos de aterramento elétricos são discutidos, muitas vezes de forma superficial e/ou com um formato de nível superior

de ensino, em diversas disciplinas de cursos técnicos [4-7]. Por vezes, esse tipo de abordagem educacional é realizado por falta de um material didático-técnico que dialogue com a formação de nível básica dos discentes, visto que as principais referências da área de aterramentos elétricos são desenvolvidas para a utilização na educação de nível superior [1-2].

Este trabalho se dedica a discutir e analisar conceitos de aterramentos elétricos e procedimentos práticos de medições de grandezas elétricas com uma abordagem de nível básico. Para tal, serão apresentados exemplos práticos e discussões relacionadas, visando introduzir de forma consistente e aprofundada, conceitos fundamentais da área.

2. Entendendo o Conceito de Resistência de Aterramento

Na modelagem eletromagnética de materiais, equipamentos e componentes conectados ao Sistema Elétrico de Potência, a resistência elétrica, a capacitância e a indutância são grandezas físicas sempre se manifestam neles em algum nível de intensidade. Entretanto, dependendo da frequência do sinal (corrente) que circula por eles, uma grandeza pode sobressair-se ou simplesmente pode ser insignificante em relação à outra [8]. Assim, na modelagem eletromagnética de materiais, equipamentos e componentes inicialmente é fundamental se delimitar o nível de frequência do sinal em estudo, isso para que não se trabalhe com modelos complexos em situações práticas simples.

Em sistemas de aterramentos elétricos quando se estuda fenômenos como descargas atmosféricas, que produzem correntes com altas frequências, as grandezas elétricas, resistência, capacitância e indutância, devem estar presentes na modelagem do sistema, dessa forma, o sistema apresenta uma impedância de aterramento. Por outro lado, quando se estuda fenômenos de falhas no Sistema Elétrico de Potência que conduzem uma corrente de curto-circuito ou uma corrente de fuga para o aterramento, as correntes envolvidas apresentam baixas frequências. Assim, as grandezas elétricas, capacitância e indutância, deixam de ser significativas e podem ser desconsideradas durante a modelagem eletromagnética, fazendo com que o sistema apresente somente uma resistência de aterramento.

Comumente as distribuidoras brasileiras de energia elétrica estão mais preocupadas com os fenômenos elétricos de baixas frequências, pois são aqueles que ocorrem mais comumente no Sistema Elétrico de Potência. Assim, as distribuidoras utilizam em suas normas técnicas o conceito de resistência de aterramento em detrimento do conceito impedância de aterramento [9-11]. Dessa forma, este trabalho irá se ater no conceito de resistência de aterramento por ser aquele de maior aplicação prática.

Inicialmente, antes de discutimos a resistência de aterramento propriamente dita, iremos discutir a resistência elétrica de um material qualquer, para isso, imaginemos um fio condutor cilíndrico perfeito, conforme mostrado na Figura 1. Para esse fio condutor, três grandezas físicas estão relacionadas a resistência elétrica dele, ou seja, o comprimento do cilindro, l , o raio da base do cilindro, r , e a resistividade elétrica do material condutor, ρ [12]. Observe que duas dessas grandezas, l e r , são características geométricas do fio condutor e uma grandeza, ρ , é uma característica intrínseca do material que independe da geometria do fio condutor. Assim, na determinação da resistência elétrica de qualquer material, ela vai depender de dois fatores, um fator geométrico e um fator intrínseco do material. Dessa forma, pode-se escrever de forma genérica que

$$R = k\rho \quad (1)$$

em que, R é a resistência elétrica do material, k é um fator geométrico relacionado ao material e ρ é o fator intrínseco do material, que é conhecido como resistividade elétrica do material.

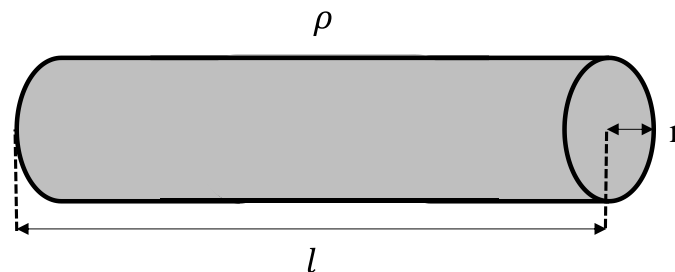
Considerando que uma corrente elétrica percorre internamente o fio condutor cilíndrico representado pela Figura 1, pode-se mostrar que o fator geométrico dessa configuração é representado por [8, 12]

$$k = l/(\pi r^2) \quad (2)$$

note através da equação (2) que as duas grandezas físicas, comprimento e raio do cilindro, se relacionam para formar o fator geométrico do material. Por fim, pode-se juntar as equações (1) e (2) para se obter a resistência do fio condutor cilíndrico, equação (3).

$$R = \left(\frac{l}{\pi r^2}\right)\rho \quad (3)$$

Figura 1 – Representação esquemática de um fio condutor cilíndrico.



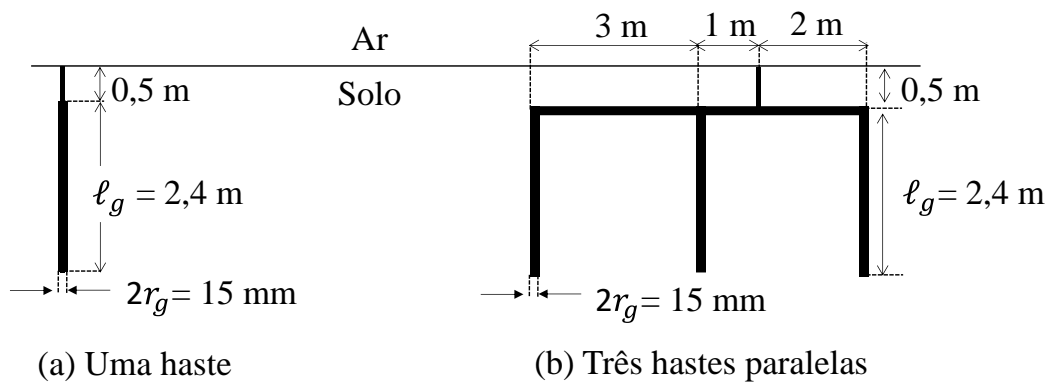
Fonte: Elaborada pelos autores.

Entendendo que a resistência elétrica de um material está associada basicamente a dois fatores, estamos preparados para discutir a resistência elétrica de um sistema de aterramentos.

O aterramento em redes de distribuição é realizado, basicamente, através de duas configurações geométricas diferentes, a primeira, é o aterramento através de uma haste cilíndrica cravada 0,5 m abaixo do nível do solo, conforme Figura 2(a), e a segunda, é o aterramento através de três hastes cilíndricas paralelas espaçadas entre si por 3,0 m e cravadas 0,5 m abaixo do nível do solo, conforme Figura 2(b) [13], sendo que nas duas situações as hastes têm comprimento l_g e raio r_g .

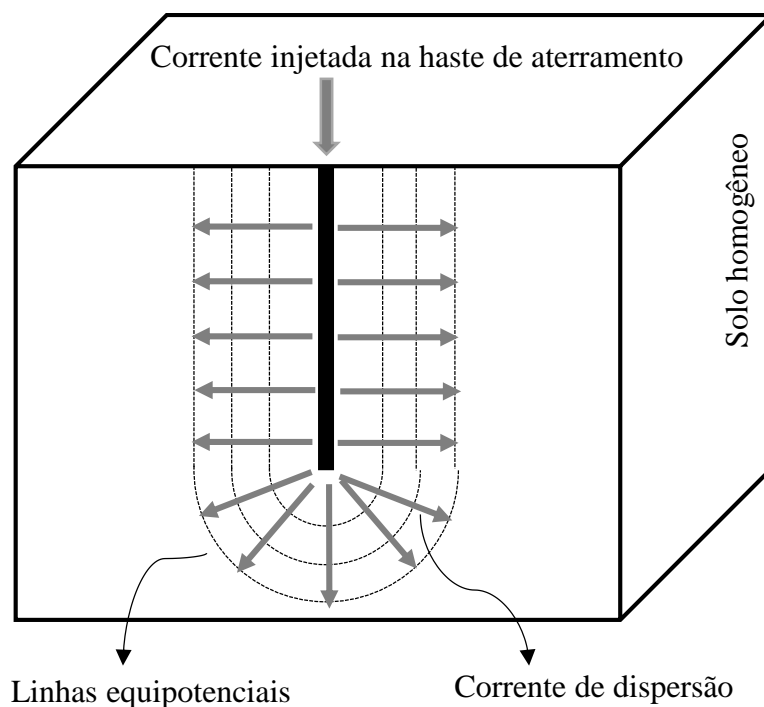
Quando uma corrente elétrica escoar através de uma haste de aterramento, um modelo [14] que pode representar a dissipação de corrente pelo solo ao redor da haste é apresentado na Figura 3. Assim, diferentemente de um fio condutor, onde a corrente circula internamente ao fio, em um sistema de aterramento a corrente injetada na haste de aterramento se dissipa através do solo ao redor das hastes. Dessa forma, para se determinar a resistência de um sistema de aterramento, deve-se conhecer a geometria do sistema de aterramento, apresentado na Figura 2, e a resistividade elétrica do solo, que será nosso objeto de estudo na seção 3. Observe que a resistividade elétrica considerada em problemas de aterramento é a do solo e não a resistividade do material da haste, isso porque como a resistividade do solo é muito maior que a resistividade do material da haste, pode-se desprezar a resistividade da haste e considerar somente a resistividade do solo.

Figura 2 – Configurações básicas de aterramentos utilizadas em redes de distribuição.



Fonte: Adaptada de [13].

Figura 3 – Dissipação de corrente através de uma haste de aterramento.



Fonte: Elaborada pelos autores.

Para a situação apresentada na Figura 2, o fator geométrico de uma haste de aterramento, Figura 2(a), corresponde à 346 mm, ao passo que o fator geométrico para três hastes de aterramento paralelas, Figura 2(b), corresponde à 119 mm [15]. Este resultado foi estimado através de software de simulação de aterramentos elétricos.

Em uma situação mais teórica, em que as hastes de aterramentos não estão cravadas a uma profundidade de 0,5 m abaixo do nível do solo, pode-se mostrar [1, 14, 16] que o fator geométrico de uma haste de aterramento cilíndrica, k_{1haste} , é determinado através da equação (4)

$$k_{1haste} = \frac{1}{2\pi\ell_g} \ln\left(\frac{2\ell_g}{r_g}\right) \tag{4}$$

Mostra-se também [1, 16] que o fator geométrico para uma configuração de três hastes de aterramento paralelas, k_{3haste} , pode ser determinado através da equação (5),

$$\begin{aligned}
 k_{11} &= \frac{1}{2\pi\ell_g} \ln\left(\frac{2\ell_g}{r_g}\right) + \frac{1}{4\pi\ell_g} \left\{ \ln\left[\frac{(d_{1,2} + \ell_g)^2 - (D_{1,2})^2}{(D_{1,2})^2 - (d_{1,2} - \ell_g)^2}\right] + \ln\left[\frac{(d_{1,3} + \ell_g)^2 - (D_{1,3})^2}{(D_{1,3})^2 - (d_{1,3} - \ell_g)^2}\right] \right\} \\
 k_{22} &= \frac{1}{2\pi\ell_g} \ln\left(\frac{2\ell_g}{r_g}\right) + \frac{1}{4\pi\ell_g} \left\{ \ln\left[\frac{(d_{1,2} + \ell_g)^2 - (D_{1,2})^2}{(D_{1,2})^2 - (d_{1,2} - \ell_g)^2}\right] + \ln\left[\frac{(d_{2,3} + \ell_g)^2 - (D_{2,3})^2}{(D_{2,3})^2 - (d_{2,3} - \ell_g)^2}\right] \right\} \\
 k_{33} &= \frac{1}{2\pi\ell_g} \ln\left(\frac{2\ell_g}{r_g}\right) + \frac{1}{4\pi\ell_g} \left\{ \ln\left[\frac{(d_{1,3} + \ell_g)^2 - (D_{1,3})^2}{(D_{1,3})^2 - (d_{1,3} - \ell_g)^2}\right] + \ln\left[\frac{(d_{2,3} + \ell_g)^2 - (D_{2,3})^2}{(D_{2,3})^2 - (d_{2,3} - \ell_g)^2}\right] \right\} \\
 k_{3haste} &= \frac{1}{\left(\frac{1}{k_{11}} + \frac{1}{k_{22}} + \frac{1}{k_{33}}\right)} \tag{5}
 \end{aligned}$$

em que $D_{1,2}$ é a distância horizontal entre a haste mais à esquerda da Figura 2 e a haste central, $D_{2,3}$ é a distância horizontal entre a haste mais à direita da Figura 2 e a haste central, $D_{1,3}$ é a distância horizontal entre a haste mais à esquerda e a haste mais à direita da Figura 2, $d_{1,2} = \sqrt{(\ell_g)^2 + (D_{1,2})^2}$, $d_{2,3} = \sqrt{(\ell_g)^2 + (D_{2,3})^2}$ e $d_{1,3} = \sqrt{(\ell_g)^2 + (D_{1,3})^2}$.

Para a situação apresentada na Figura 2, considerando que as hastes de aterramento não estão cravadas a uma profundidade de 0,5m, o fator geométrico de uma haste de aterramento corresponde à 428 mm, ao passo que o fator geométrico para três hastes de aterramento paralelas corresponde à 170 mm.

3. Entendendo o Conceito de Resistividade do Solo

As deduções realizadas, na seção anterior, para se obter os fatores geométricos associados a configurações básicas de sistemas de aterramento, consideraram que a corrente se dissipa de forma homogênea pelo solo. Isso é possível quando se considera que a resistividade do solo é homogênea, ou seja, que um único valor consegue representar o comportamento elétrico do solo em qualquer ponto do espaço. Essa abordagem é comum quando se avalia materiais condutores, isolantes ou semicondutores, como exemplo, o fio condutor cilindro apresentado na Figura 1. A Tabela 1 apresenta valores típicos para a resistividade elétrica de alguns materiais.

Tabela 1 – Resistividades típicas de alguns materiais.

| Material | Resistividade Elétrica (Ω.m) | Tipo de Classificação |
|----------|------------------------------|-----------------------|
| Cobre | 1,72 x 10-8 | Condutor |
| Alumínio | 2,80 x 10-8 | Condutor |
| Ouro | 2,45 x 10-8 | Condutor |
| Carbono | 4,00 x 10-5 | Semicondutor |
| Germânio | 47,00 x 10-2 | Semicondutor |
| Silício | 6,40 x 10-2 | Semicondutor |
| Papel | 1,00 x 1010 | Isolante |
| Mica | 5,00 x 1011 | Isolante |
| Vidro | 1,00 x 1012 | Isolante |

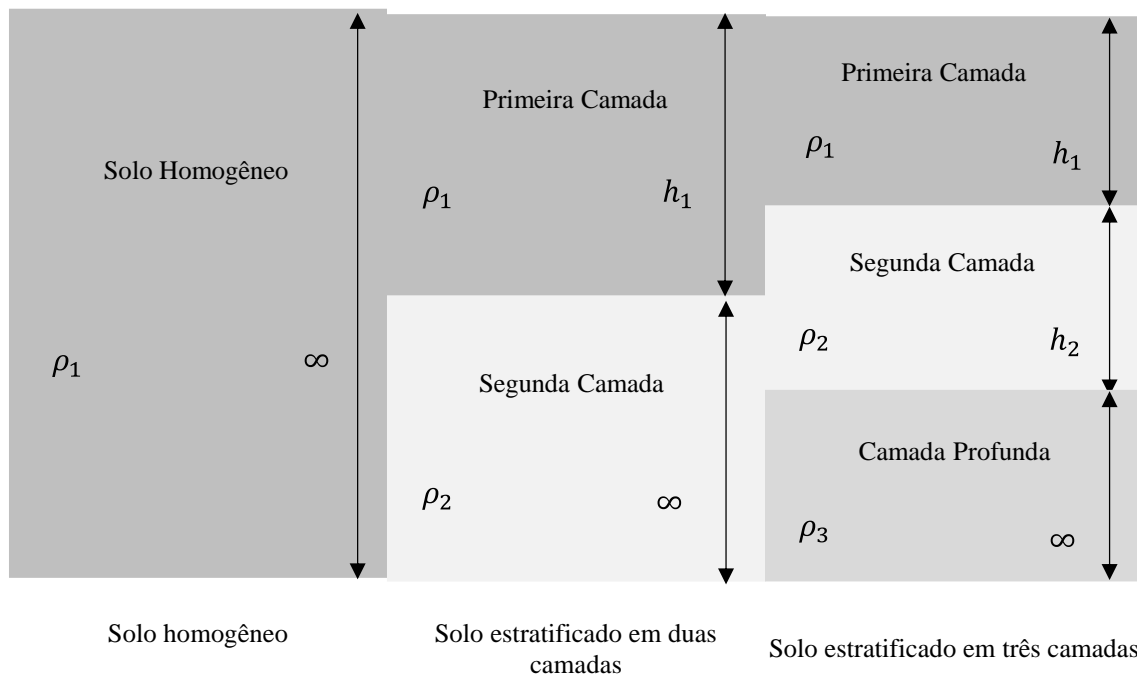
Fonte: Adaptada de [12].

Diferentemente dos materiais apresentados na Tabela 1, o solo é um meio material que apresenta, tipicamente, comportamento heterogêneo, posto que ele é composto por

materiais geológicos diversos [17-18] e dependendo da profundidade do solo, ele pode apresenta valores de temperatura, de humidade e de concentração de sais diferentes [2, 19]. Esses fatores fazem com que o solo, muitas vezes, não possa ser considerado como tendo um comportamento homogêneo, mas sim como um meio material heterogêneo que pode ser modelado como estratificado em múltiplas camadas horizontais com valores de resistividade diferentes [19-20].

A Figura 4 mostra três formas utilizadas para se modelar um solo estratificado em camadas horizontais: solo homogêneo, Figura 4(a), solo estratificado em duas camadas, Figura 4(b) e solo estratificado em três camadas, Figura 4(c). Observe que para um solo homogêneo a resistividade é 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. Vale destacar que em ambientes naturais, o mais comum é encontrar solos que podem ser modelados em estratificados em até três camadas [2].

Figura 4 – Modelos de Estratificação do Solo.



Fonte: Elaborada pelos autores.

Tal qual é realizado para os materiais descritos na Tabela 1, quando se trabalha com resistividade do solo também busca-se determinar valores típicos para diferentes tipos de solo. Na Tabela 2 são sumarizados resultados apresentados pela literatura [1-2, 14]. Nela é possível observar diferenças significativas entre os resultados obtidos nos países do Norte Global descrito em [14] e os resultados obtidos no Brasil descrito em [2]. Essas diferenças trazem um sinal de alerta quando se deseja utiliza resultados de resistividade de solo que foram obtidos em outros países para se tentar descrever o comportamento elétrico de solos de outros lugares do globo. Posto que, mesmo tendo a mesma nomenclatura, um tipo de solo nomeado como solo de jardim nos países do Norte Global apresenta características de formação geológicas diferentes de um solo de jardim no Brasil. Além disso, é importante observar que um solo natural é uma mistura de diversos tipos de solos [17-18] e somente medições locais podem ser assertivas na determinação

de um valor mais preciso para a resistividade do solo em que se tenha interesse.

Por fim, a resistividade elétrica de um solo é função de fatores como a umidade presente, a concentração de sais, a compactação, a granulometria e a temperatura [1-2, 14]. Pode-se verificar que quanto mais se aumenta a umidade, a concentração de sais e a compactação de um solo menor é a resistividade dele, e por outro lado, quanto mais se aumenta a granulometria e a temperatura de um solo maior fica a resistividade dele [2]. Assim, os dados apresentados na Tabela 2 sofrem influência desses cinco fatores principais, sendo que nenhum desses é desprezível na determinação da resistividade de um solo natural.

Tabela 2 – Resistividades típicas de alguns tipos de solo.

| Tipo de Solo | Resistividade Elétrica ($\Omega.m$) |
|-------------------------------|---------------------------------------|
| Lama | 5 a 100 |
| Solo de Jardim (Norte Global) | 5 a 50 |
| Solo de Jardim (Brasil) | 140 a 480 |
| Argila (Norte Global) | 2 a 12 |
| Argila (Brasil) | 80 a 330 |
| Areia Seca | 3.000 a 8.000 |
| Cascalho | 1.000 a 10.000 |
| Granito | 1.500 a 10.000 |

Fonte: Adaptada de [2, 14].

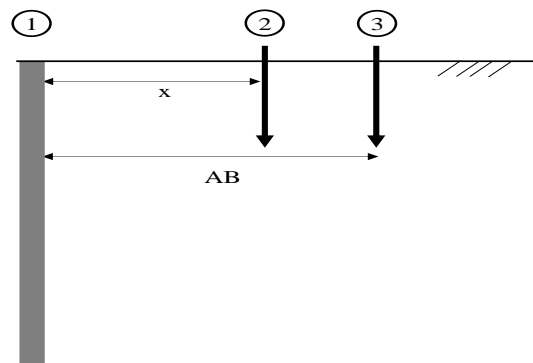
4. Procedimentos Práticos Aplicados a Aterramentos Elétricos

Quando se trabalha com aterramentos elétricos, devido às características heterogêneas dos solos, deve-se proceder medições padronizadas, tanto quando se deseja confirmar o valor da resistência de um aterramento projetado, quanto quando se deseja medir o valor da resistividade do solo para se realizar algum projeto. Nas seções seguintes serão descritos os procedimentos de medição mais utilizados para se determinar o valor da resistência de aterramento e o valor da resistividade do solo.

4.1 Método dos Três Terminais para a Obtenção da Resistência de um Sistema de Aterramento

O método mais utilizado para se obter empiricamente o valor da resistência de um sistema de aterramento é o método dos três terminais [1-2]. A Figura 4 apresenta um esquema para se entender o funcionamento deste método. Nessa figura, no ponto 1 está localizado o sistema de aterramento do qual se deseja conhecer o valor da resistência, este sistema pode ser uma malha de aterramento, hastes de aterramento conforme Figura 2 ou qualquer outra configuração. Nos pontos 2 e 3 estão localizadas as hastes de medição, que não fazem parte do sistema de aterramento e que tipicamente tem comprimentos de até 0,5 m.

Figura 4 – Método para a medição da resistência de aterramento: Método dos três terminais.



Fonte: Elaborada pelos autores.

No esquema da Figura 4, para se determinar experimentalmente o valor da resistência de um sistema de aterramento, R_T , deve-se aplicar uma corrente elétrica, I_{apl} , no ponto 1 e recebe-la no ponto 3, assim a corrente I_{apl} irá produzir linhas equipotenciais ao se propagar entre os pontos 1 e 3 [2]. O perfil das linhas equipotenciais, quando o sistema investigado é uma haste de aterramento, segue o comportamento apresentado na Figura 3. Sabe-se que quanto mais próximo do ponto 1 está a linha equipotencial maior é o potencial elétrico dela, ao passo que o potencial elétrico das linhas equipotenciais se reduz rapidamente quando elas se afastam do ponto 1 [1]. Assim, o potencial elétrico pode ser considerado nulo não muito distante da haste de aterramento, sendo que a este ponto, dá-se o nome em aplicações de engenharia de terra remoto.

Para se determinar R_T , primeiramente deve-se medir o valor da corrente aplicada, I_{apl} , e posteriormente a diferença de potencial, V_{med} , que se manifesta entre os pontos 1 e 2. Na obtenção de V_{med} , deve-se garantir que a haste de medição colocada no ponto 2 está no terra remoto, isso é necessário para se garantir que a medição de tensão conseguiu capturar toda a queda de tensão provocada pela corrente I_{apl} .

De posse dos valores da corrente aplicada e da diferença de potencial que se manifesta é possível utilizar a equação (6) para se determinar a resistência de aterramento. Equipamentos de medição conhecidos como terrômetros são capazes de aplicar e medir uma corrente entre os terminais 1 e 3 e medir a diferença de potencial entre os terminais 1 e 2 e internamente fazer a conta da equação (6) retornando diretamente o valor da resistência de aterramento do sistema.

$$R_T = \frac{V_{med}}{I_{apl}} \quad (6)$$

Como questão de ordem prática, não existe uma forma teórica para se determinar qual deve ser a distância horizontal utilizada, distância AB na Figura 4, entre o sistema de aterramento, ponto 1, e a haste de medição de corrente, ponto 3 [2]. Entretanto, como um bom chute inicial, pode-se estimar a distância AB como sendo um valor 4 (quatro) vezes maior que a maior dimensão do sistema de aterramento. Dessa forma, quando se deseja determinar o valor da resistência de uma haste de aterramento de 2,4 m, deve-se considerar a distância AB como sendo 9,6 m. Por outro lado, quando se deseja determinar o valor da resistência de três haste de aterramento paralelas que têm a maior dimensão entre elas de 6,0 m, deve-se considerar a distância AB igual à 24,0 m. Estimada a distância AB, a distância x que existe entre os pontos 1 e 2 da Figura 4 pode ser arbitrada como sendo 60,0% do valor da distância AB [2].

Observando que as distâncias AB e x são estimativas, para verificar se essas distâncias são suficientes para se encontrar o terra remoto, realiza-se o seguinte procedimento [2]: (i) obtém-se através de medições o valor de R_T considerando os valores estimados para as distâncias AB e x ; (ii) mantendo a distância AB fixa, aumenta-se o valor de x em 10,0% e guarda-se o valor encontrado para R_T ; (iii) mantendo a distância AB fixa, diminui-se o valor estimado para x em 10,0% e guarda-se o valor encontrado para R_T ; (iv) caso os valores encontrados para R_T que foram computados nos passos (ii) e (iii) não tenham uma diferença maior que 2,0% em relação ao valor de R_T obtido no passo (i), pode-se considerar que as distâncias estimadas para AB e para x foram suficientes para se encontrar o terra remoto e assim o valor de R_T do sistema de aterramento é a média dos valores de R_T encontrados nos passos (i), (ii) e (iii); (v) caso os valores encontrados para R_T e que foram computados nos passos (ii) e (iii) tenham uma diferença maior que 2,0% em relação ao valor de R_T obtido no passo (i), deve-se considerar que as distâncias AB e

x não foram suficientes para se encontrar o terra remoto, dessa forma, aumenta-se em pelo menos 10,0% as distâncias AB e x e começa-se o procedimento novamente pelo passo (i).4.2 Procedimentos Práticos Aplicados a Aterramentos Elétricos

Quando se trabalha com aterramentos elétricos, devido às características heterogêneas dos solos, deve-se proceder medições padronizadas, tanto quando se deseja confirmar o valor da resistência de um aterramento projetado, quanto quando se deseja medir o valor da resistividade do solo para se realizar algum projeto. Nas seções seguintes serão descritos os procedimentos de medição mais utilizados para se determinar o valor da resistência de aterramento e o valor da resistividade do solo.

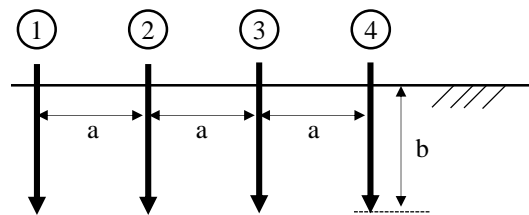
4.2 Método de Wenner para a Obtenção da Resistividade do Solo

A obtenção dos valores de resistividade para diferentes tipos de solo que foram apresentados na Tabela 2 são comumente obtidos em ensaios laboratoriais através de amostras de solos [1, 14]. Esses tipos de ensaios trazem poucas informações sobre os solos naturais, posto que eles são constituídos por camadas heterogêneas de tipos de solos diferentes [18]. Assim, procedimentos realizados em campo, diretamente nos solos naturais, são mais adequados para se obter informações sobre a resistividade de um solo [20]. Existem diversos métodos para se obter a resistividade elétrica de um solo natural em campo [2, 20], entretanto o método das quatro hastes segundo Wenner [22], ou simplesmente método de Wenner, pode ser considerado o método mais disseminado pela literatura [20, 23]. Assim, neste trabalho, o método de Wenner será apresentado e discutido como uma forma prática de se obter a resistividade elétrica do solo.

O primeiro passo para se aplicar o método de Wenner [22] consiste em se cravar no solo, em uma profundidade b , quatro hastes de medição espaçadas em linha reta por uma mesma distância a , conforme mostrado na Figura 5. Em seguida, deve-se aplicar e medir uma corrente I_{apl} nas hastes de medição mais externas, enumeradas na Figura 5 como 1 e 4. Posteriormente, deve-se medir a diferença de potencial V_{med} que se manifesta nas hastes de medição internas, enumeradas na Figura 5 como 2 e 3. Note que diferentemente do método dos três terminais, no método de Wenner, não é necessário encontrar o terra remoto na realização da medição da diferença de potencial.

Observe que nas medições realizadas com o método de Wenner são obtidos o valor da corrente que circula pelo solo entre as hastes externas da Figura 5 e o valor da diferença de potencial que se manifesta nas hastes internas da Figura 5. Sabe-se que a relação entre a diferença de potencial e a corrente elétrica retorna um valor de resistência, equação (6), e não um valor de resistividade. Entretanto, conhecendo o fator geométrico envolvido no processo de circulação da corrente, pode-se relacionar a resistência de aterramento com a resistividade do solo através de um equacionamento similar ao da equação (1). Wenner [22] mostrou para um solo homogêneo, em que a corrente que se dissipa pelas hastes de medição externas têm um comportamento ilustrado na Figura 3, a resistividade aparente do solo, $\rho(a)$, pode ser determinada através da equação (7). Mesmo sendo inicialmente proposta para um solo homogêneo, em aplicações prática de engenharia, o fator geométrico da equação (7) consegue representar o comportamento elétrico de solos heterogêneos com uma boa precisão [20].

Figura 5 – Método para a medição da resistividade do solo: Método de Wenner.

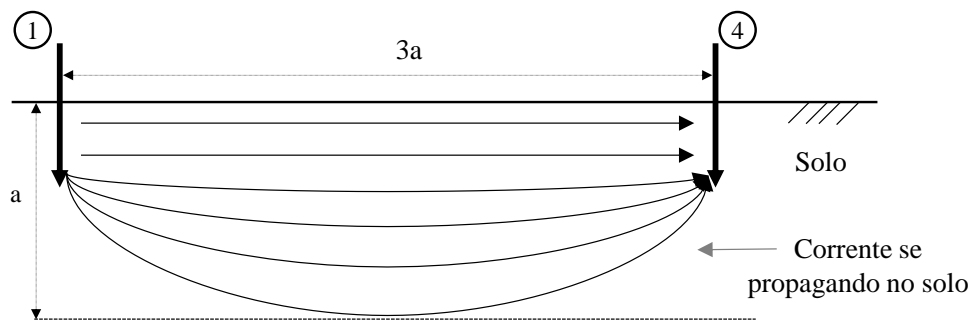


Fonte: Elaborada pelos autores.

$$\rho(a) = \left[\frac{4\pi a}{1 + (2a/\sqrt{a^2 + 4b^2}) - (a/\sqrt{a^2 + 4b^2})} \right] \left[\frac{V_{med}}{I_{apl}} \right] \quad (7)$$

Através da equação (7) é possível perceber que a resistividade aparente, $\rho(a)$, é uma função direta da distância considerada entre as hastes de medição, a . Isso é razoável, pois quanto mais distante estiverem as hastes mais externas 1 e 4, mais profunda será a propagação da corrente que circula entre elas, conforme pode ser representado através da Figura 6. Assim, o espaçamento, a , entre as hastes de medição traz informação sobre a resistividade aparente do solo percebida à profundidade a [20].

Figura 6 – Propagação da corrente entre os eletrodos mais externos no método de Wenner.



Fonte: Elaborada pelos autores.

Por dedução [22], a equação (7) é válida para $b \ll a$, sendo que em aplicação práticas de engenharia elétrica, esta condição é considerada como alcançada quando $b < a/10$. Considerando essa situação, é prática comum simplificar a equação (7) e obter a equação (8) [20]. Note através da equação (8) que o fator geométrico passa a depender somente da distância horizontal entre as hastes de medição e não mais da profundidade na qual elas são cravadas. Para efeito comparativo é apresentado a Tabela 3 onde são obtidos resultados para diversos fatores geométricos de interesse prático [19] considerando diferentes valores de profundidades das hastes e de distâncias entre elas. Observe que a maior diferença percentual existente entre a equação (7) e a equação (8) foi de 1,69%, além disso, quanto maior é a distância entre as hastes melhor é a aproximação da equação (8).

$$\rho(a) = [2\pi a] \left[\frac{V_{med}}{I_{apl}} \right] \quad (8)$$

Com o intuito de se obter um comportamento 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 aparente do solo para diversas profundidades [20]. De posse de um conjunto de dados experimentais que relacionem a resistividade elétrica com a profundidade do solo é possível modelar o solo como homogêneo, Figura 4(a), estratificado em duas camadas horizontais, Figura 4(b), estratificado em três camadas

horizontais, Figura 4(c), e assim por diante [19, 21].

Tabela 3 – Fator geométrico para o método de Wenner.

| Distância a (m) | Equação (7) | | | | | Equação (8) | Diferença Máxima (%) |
|--------------------|-----------------|----------|----------|----------|----------|-------------|----------------------------|
| | Distância b (m) | | | | | | |
| | 0,1 | 0,2 | 0,3 | 0,4 | 0,5 | | |
| 1,0 | 6,3914 | - | - | - | - | 6,2832 | 1,69 |
| 2,0 | 12,6211 | 12,7829 | - | - | - | 12,5664 | 1,69 |
| 3,0 | 18,8861 | 18,9951 | 19,1743 | - | - | 18,8496 | 1,69 |
| 4,0 | 25,1602 | 25,2423 | 25,3780 | 25,5658 | - | 25,1327 | 1,69 |
| 5,0 | 31,4379 | 31,5037 | 31,61,27 | 31,7643 | 31,9572 | 31,4159 | 1,69 |
| 6,0 | 37,7174 | 37,7723 | 37,8634 | 37,9903 | 38,1523 | 37,6991 | 1,19 |
| 7,0 | 43,9980 | 44,0450 | 44,1233 | 44,2323 | 44,3719 | 43,9823 | 0,88 |
| 8,0 | 50,2792 | 50,3204 | 50,3889 | 50,4845 | 50,6070 | 50,2655 | 0,67 |
| 9,0 | 56,5609 | 56,5975 | 56,6584 | 56,7435 | 56,8526 | 56,5487 | 0,53 |
| 10,0 | 62,8428 | 62,8758 | 62,9307 | 63,0073 | 63,1057 | 62,8319 | 0,43 |
| 11,0 | 69,1250 | 69,1550 | 69,2049 | 69,2746 | 69,3641 | 69,1150 | 0,36 |
| 12,0 | 75,4074 | 75,4349 | 75,4806 | 75,5446 | 75,6267 | 75,3982 | 0,30 |
| 13,0 | 81,6899 | 81,7152 | 81,7575 | 81,8165 | 81,8924 | 81,6814 | 0,26 |
| 14,0 | 87,9724 | 87,9960 | 88,0352 | 88,0901 | 88,1606 | 87,9646 | 0,22 |
| 15,0 | 94,2551 | 94,2771 | 94,3137 | 94,3649 | 94,4307 | 94,2478 | 0,19 |
| 16,0 | 100,5378 | 100,5584 | 100,5928 | 100,6408 | 100,7025 | 100,5310 | 0,17 |
| 17,0 | 106,8206 | 106,8400 | 106,8723 | 106,9175 | 106,9756 | 106,8142 | 0,15 |
| 18,0 | 113,1034 | 113,1218 | 113,1523 | 113,1950 | 113,2499 | 113,0973 | 0,13 |
| 19,0 | 119,3863 | 119,4037 | 119,4326 | 119,4731 | 119,5250 | 119,3805 | 0,12 |
| 20,0 | 125,6692 | 125,6857 | 125,7132 | 125,7516 | 125,8010 | 125,6637 | 0,11 |
| 21,0 | 131,9521 | 131,9678 | 131,9940 | 132,0306 | 132,0777 | 131,9469 | 0,10 |
| 22,0 | 138,2351 | 138,2501 | 138,2750 | 138,3100 | 138,3549 | 138,2301 | 0,09 |
| 23,0 | 144,5180 | 144,5324 | 144,5563 | 144,5897 | 144,6327 | 144,5133 | 0,08 |
| 24,0 | 150,8010 | 150,8148 | 150,8377 | 150,8697 | 150,9109 | 150,7964 | 0,08 |
| 25,0 | 157,0840 | 157,0972 | 157,1192 | 157,1500 | 157,1895 | 157,0796 | 0,07 |
| 26,0 | 163,3670 | 163,3797 | 163,4009 | 163,4305 | 163,4685 | 163,3628 | 0,06 |
| 27,0 | 169,6501 | 169,6623 | 169,6826 | 169,7111 | 169,7478 | 169,6460 | 0,06 |
| 28,0 | 175,9331 | 175,9449 | 175,9645 | 175,9920 | 176,0273 | 175,9292 | 0,06 |
| 29,0 | 182,2162 | 182,2275 | 182,2465 | 182,2730 | 182,3071 | 182,2124 | 0,05 |
| 30,0 | 188,4992 | 188,5102 | 188,5285 | 188,5542 | 188,5871 | 188,4956 | 0,05 |

Fonte: Obtida pelos autores.

Por fim, vale destacar que durante o procedimento de medição da resistividade do solo é necessário que a haste de medição tenha um bom contato elétrico com o solo. Para tentar garantir isso, em [2] é sugerido que a haste seja cravada no solo com uma profundidade mínima de 0,5 m. Por outro lado, em [19] é mostrado que dependendo do tipo de solo investigado esta profundidade pode ser menor, sendo que para o solo de cerrado a profundidade mínima de 0,3 m consegue produzir um contato elétrico suficiente entre o solo e a haste de medição. Assim, muitas vezes cravar a haste de medição em uma profundidade de somente 0,1 m pode gerar resultado equivocados, tornando inviável realizar medições com distâncias reduzidas entre as hastes de medição.

5. Considerações finais

Este trabalho sumarizou e apresentou conceitos e discussões fundamentais na área de aterramentos elétricos, bem como procedimentos experimentais utilizados para obter grandezas elétricas associadas a sistemas de aterramento. Em seu desenvolvimento, este trabalho buscou apresentar de forma completa, mas com linguagem e desenvolvimento adequados para técnicos de nível básico, todas as discussões necessárias para se compreender as grandezas envolvidas em um aterramento elétrico.

Além disso, observando que sempre pode ser considerado que existe um fator geométrico relacionando a resistência de aterramento com a resistividade do solo, ao longo deste trabalho mostrou-se: (i) os fatores geométricos associados as hastes de aterramentos tipicamente utilizadas nas redes brasileiras de distribuição de energia elétrica, isso considerando a situação em que as hastes de aterramento estão enterradas a uma profundidade de 0,5 m e a situação em que elas estão enterradas superficialmente ao solo; (ii) diversos fatores geométricos associados às hastes de medição quando se utiliza o método de Wenner para se obter a resistividade do solo.

Referências

- [1] G. KINDERMANN, J. M. CAMPAGNOLO, ATERRAMENTO ELÉTRICO. 3ª Edição. Porto Alegre: Sagra DC-Luzzatto, 1995.
- [2] S. VISACRO, ATERRAMENTOS ELÉTRICOS: Conceitos Básicos, Técnicas de Medição e Instrumentação e Filosofias de Aterramento, Artliber Editora Ltda, São Paulo, SP. 2002.
- [3] A. PIANTINI, Lightning Interaction with Power Systems: Fundamentals and Modelling: Volume 1, Institution of Engineering & Technology. 2020.
- [4] CEFET-MG. Projeto Pedagógico para a Reestruturação do Curso Técnico em Eletrotécnica. Leopoldina. 2016a. Disponível em: <<https://www.deelp.cefetmg.br/wp-content/uploads/sites/56/2017/03/PPC-2016.pdf>> Acesso em 20 de dezembro de 2023.
- [5] CEFET-MG. Projeto Pedagógico para a Reestruturação do Curso Técnico em Eletrotécnica. Curvelo. 2016b. Disponível em: <https://www.deecv.cefetmg.br/wp-content/uploads/sites/49/2020/02/PPC_ELEOTECNICA_CURVELO-2016.pdf> Acesso em 20 de dezembro de 2023.
- [6] CEFET-MG. Projeto Pedagógico do Curso Técnico em Eletrotécnica, Integrado. Belo Horizonte. 2022. Disponível em: <<https://www.dept.cefetmg.br/eletrotecnica/>> Acesso em 20 de dezembro de 2023.
- [7] IFMG. Projeto Pedagógico do Curso Técnico em Eletroeletrônica, Integrado. Ribeirão das Neves. 2020. Disponível em: <https://www2.ifmg.edu.br/ribeiraodasneves/arquivos/nossos-cursos-arquivos/tecnico-integrado-em-eletroeletronica/ppc_tecnico_eletroeletronica_turmas-a-partir-de-2020-aprovado.pdf> Acesso em 20 de dezembro de 2023.
- [8] W. HAYT e J. BUCK. ELETROMAGNETISMO, Mc Graw Hill, São Paulo, SP. 2013.
- [9] COPEL, COMPANHIA PARANAENSE DE ENERGIA. Fornecimento de Tensão Primária de Distribuição. Normas técnicas da COPEL, NTC 903100, Curitiba, 2002.
- [10] 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.
- [11] ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Instalações Elétricas de Baixa Tensão. ABNT NBR 5410, Rio de Janeiro, 2008.
- [12] C. ALEXANDER, e M. SADIKU. FUNDAMENTOS DE CIRCUITOS ELÉTRICOS, Mc Graw Hill, 5ª edição, São Paulo, SP. 2013.
- [13] G. S. LIMA, e A. DE CONTI, Narrowband PLC Channel Attenuation Due to a Multi-Grounded Neutral, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 36, No. 2, April, pp. 639-650, 2021.
- [14] A. SALAM e Q. RAHMAN, Power Systems Grounding. 1ª Edição. Springer, 2016.
- [15] A. DE CONTI, e S. VISACRO, A simplified model to represent typical grounding configurations applied in medium-voltage and low-voltage distribution lines, in Proc. Int. Symp. Lightning Prot., 2007.
- [16] E. SUNDE, Earth Conduction Effects in Transmission Systems, 2 edição, New York: Dover, 1968.
- [17] 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.

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

[19] G. S. LIMA, A. L. P. JUNIOR e H. L. S. CORRÊA, 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.

[20] ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Medição da Resistividade e Determinação da Estratificação do Solo. ABNT NBR 7117, Rio de Janeiro, 2012.

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

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

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