

Práticas de Eletricidade e Eletrônica - 2023
Experiência 6 – Medidas de resistência de terra

1 - Objetivo

A presente experiência objetiva familiarização com medidas da resistência elétrica de tomadas de terra e de resistividade elétrica do solo, e a comparação entre resistências medidas e as calculadas com base em modelos simplificados.

2 - Introdução

A realização de ligações à terra, comumente chamadas “aterramentos” ou “terras”, constitui um problema muito comum na engenharia elétrica. Aterramentos são essenciais em qualquer instalação elétrica como elemento de proteção à vida humana e aos equipamentos. Tanto em usinas geradoras, linhas de transmissão, subestações transformadoras, instalações retificadoras para tração elétrica ou proteção catódica, instalações de equipamentos eletrônicos em geral, centrais telefônicas, equipamentos de rádio, conexões de pára-raios instalados em edifícios, torres ou antenas, como num simples chuveiro elétrico ou num microcomputador, um bom aterramento é indispensável.

Tanto é assim que as instalações industriais e domésticas usam no mínimo 3 fios: a fase, o neutro e a terra (veja a tomada dos aparelhos usados neste laboratório).

A finalidade do aterramento é, de modo geral, oferecer um caminho fácil para o escoamento à terra de cargas e correntes elétricas eventualmente induzidas nos circuitos, limitando desse modo as correspondentes tensões, que devem ser mantidas abaixo de valores pré-determinados para permitir o bom funcionamento dos equipamentos, protegê-los contra danos, e prover segurança à vida humana. É portanto necessário que o aterramento possua baixa “resistência elétrica à terra”.

Em corrente contínua ou em frequências baixas, a “resistência à terra” ou resistência de terra R é definida como

$$R = \frac{V}{I} ,$$

onde I é a corrente que penetra no solo através do aterramento e V é a consequente diferença de potencial entre os condutores que compõem o aterramento e um ponto do solo situado no infinito.

No tratamento aqui feito admite-se que o solo seja um meio linear, isto é, que a condutividade σ seja uma constante em cada ponto, independente da intensidade do campo elétrico.

Na realidade, em regiões de campo elétrico muito intenso (tipicamente acima de 250 ou 300 kV/m), ocorrem arcos entre as partículas do solo, de maneira similar ao que acontece nos materiais de que são feitos os pára-raios, efetivamente curto-circuitando uma parte do solo que envolve os eletrodos. O efeito global é que a resistência de terra durante um grande pico de corrente como o que acontece na incidência de raios – pode ser 20 a 30% menor do que a resistência medida com pequenas correntes.

As medidas de resistência de terra não devem ser efetuadas em corrente contínua, pois seriam afetadas pelos potenciais eletroquímicos que aparecem nas interfaces eletrodo metálico-solo. A frequência da rede ou suas harmônicas também podem ser inconvenientes devido a correntes de fuga geralmente presentes no solo a essas frequências e eventuais tensões induzidas no circuito de medida.

Por essas razões os aparelhos comerciais de medida de resistência de terra operam geralmente em frequência em torno de 130 Hz, que em alguns casos pode ser variada pelo operador.

A referência [1], reeditada periodicamente pelo IEEE, constitui excelente introdução aos problemas de aterramento, incluindo farta bibliografia comentada.

3 - Modelo simples de tomada de terra

O modelo mais simples de uma tomada de terra é aquele constituído por uma semi-esfera condutora com centro O na superfície de solo homogêneo, conforme mostra a Figura 1.

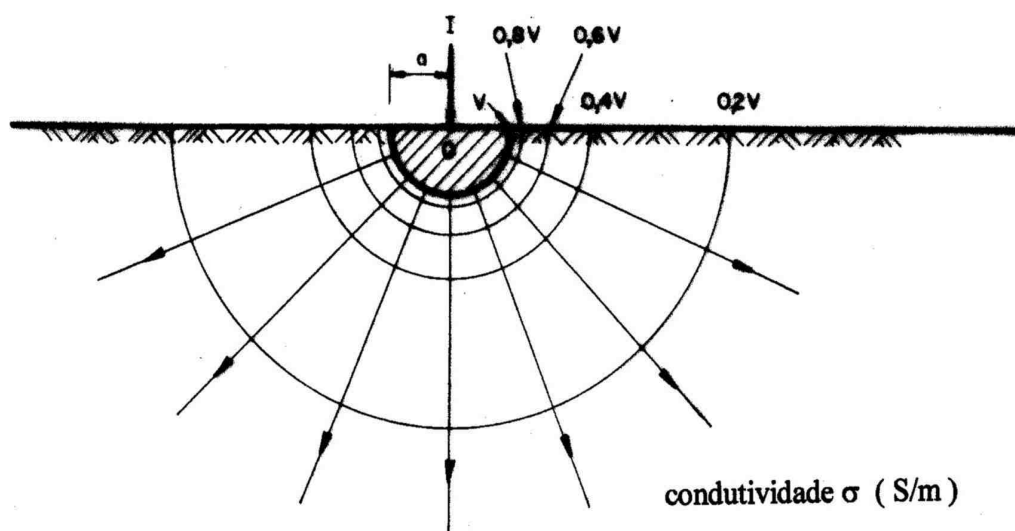


Figura 1 - Aterramento constituído por uma semi-esfera condutora

Devido à simetria, as linhas de corrente são radiais e a uma distância r de O , a densidade de corrente, o campo elétrico e o potencial com relação ao infinito são dados respectivamente por :

$$(1) \quad J_r = \frac{I}{2\pi r^2}$$

$$(2) \quad E_r = \frac{I}{2\pi\sigma r^2}$$

$$(3) \quad \Phi = \frac{I}{2\pi\sigma r}$$

Portanto o potencial V da esfera em relação ao infinito é

$$(4) \quad V = \frac{I}{2\pi\sigma a},$$

ou seja, a correspondente resistência de terra R da semi-esfera é

$$(5) \quad R = \frac{V}{I} = \frac{1}{2\pi\sigma a} = \frac{\rho}{2\pi a} \quad (\text{Ohm})$$

onde ρ é a resistividade do solo (Ohm.m).

Algumas características desse campo de correntes são notáveis. Em primeiro lugar, as expressões (3) e (4) mostram que para um determinado valor de σ , à medida que se afasta da esfera, o potencial cai rapidamente de início e depois muito lentamente. Assim, à distância $r = 5.a$, o potencial já caiu a 0,2 V , enquanto à distância $r = 20.a$ o potencial é ainda 5% de V . Dito de outra maneira, 95 % da resistência de terra correspondem à resistência entre as semi-esferas concêntricas de raios $r = a$ e $r = 20.a$, e o solo contido entre $20.a$ e o infinito contribui com somente 5% de R . Por essa razão a região “próxima” ao eletrodo, até $20.a$ por exemplo, é chamada sua “zona de influência”: é a região em que o potencial varia do seu valor máximo a “essencialmente zero”.

Em segundo lugar, a “grandes distâncias” de um aterramento constituído de uma configuração qualquer de eletrodos, espera-se que o campo de correntes se apresente com simetria esférica. (Essa expectativa é confirmada, e corresponde ao primeiro termo de uma expansão do potencial em harmônicas esféricas - ver [2] ou [3]).

“Grandes distâncias” significa aqui distâncias maiores que cerca de 3 vezes a maior dimensão do aterramento (Figura 2).

Finalmente, dada a simplicidade deste campo, ele é usado como referência para outros mais complicados. Assim, a resistência de terra de um aterramento qualquer é às vezes especificada em termos do raio da esfera equivalente que teria a mesma resistência de terra (ver exemplos 1 e 2).

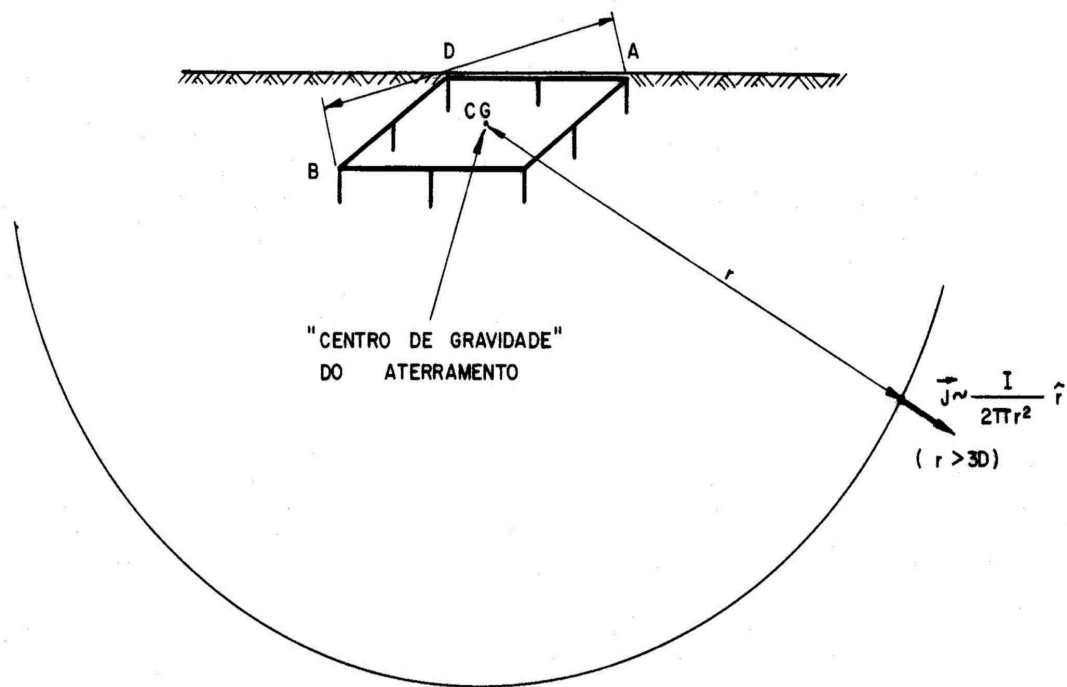


Figura 2 - Aterramento constituído de 8 hastes e malha de interligação

NOTA:

A esta altura deve estar claro que o cálculo das resistências de terra é um problema de Eletromagnetismo. Ao fazer esta experiência e resolver os exercícios propostos, o estudante deve aproveitar para esclarecer bem os conceitos básicos referentes a campos de correntes.

4 - Campo de um cilindro

Uma forma comum de fazer aterramento é cravar tubos metálicos no solo. A fim de obter uma aproximação para este campo, consideremos o campo de uma fonte linear uniforme que injeta em solo homogêneo indefinido uma quantidade de corrente constante por unidade de comprimento (Figura 3).

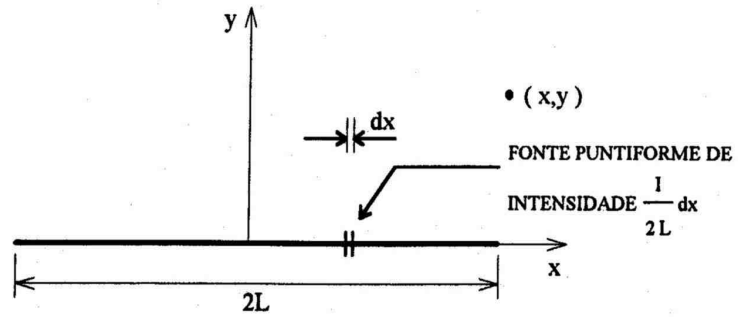


Figura 3 - Fonte linear uniforme

Este campo é analisado em [4] e [5] onde é mostrado que o potencial num ponto (x, y) (Figura 3) é dado por:

$$(6) \quad \Phi(x, y) = \frac{I}{8\pi\sigma L} \ln \left| \frac{x + L + \sqrt{(x + L)^2 + y^2}}{x - L + \sqrt{(x - L)^2 + y^2}} \right|,$$

que corresponde a equipotenciais na forma de elipsóides de revolução confocais com as extremidades da fonte linear (Figura 4).

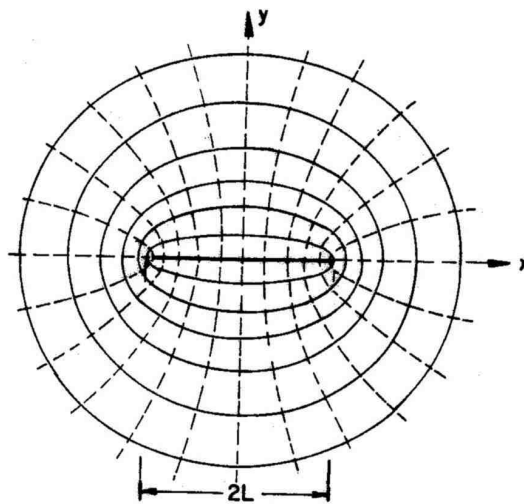


Figura 4 - Equipotenciais e linhas de corrente para a fonte linear uniforme

Considerando que a tomada de terra correspondente à medida do campo da figura 4, e aproximando um cano de comprimento L e raio r (com $L \gg r$) por um elipsóide delgado, resulta para sua resistência (Figura 5):

$$(7) \quad R = \frac{1}{2\pi\sigma L} \ln \frac{2L}{r}$$

(Aplique esta fórmula para resolver o exemplo 1.)

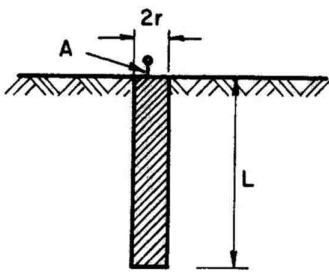


Figura 5 - Aterramento com uma haste

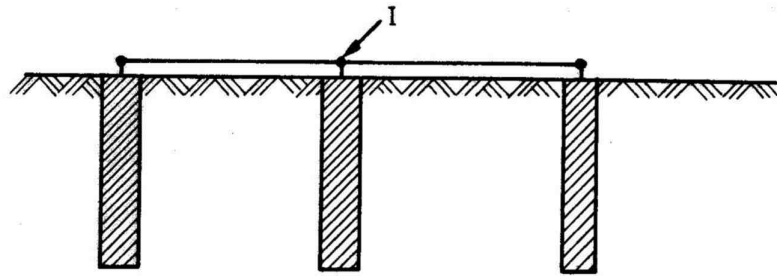


Figura 6 - Aterramento com 3 hastes interligadas

5 - Configurações mais complexas

A máxima resistência de terra tolerável depende da aplicação em que o aterramento é usado e é especificada em normas para cada caso, situando-se entre algumas dezenas de Ohms e uma fração de Ohm.

Tais valores não são atingidos com uma única haste, necessitando-se via de regra uma extensa rede de várias hastes interligadas, como ilustrado nas Figuras 2 e 6. Pode-se calcular aproximadamente a resistência desse aterramento usando as expressões (6) e (7). A aproximação consiste em admitir que o campo causado por uma corrente I_i injetada no solo através de apenas uma haste (i) seja essencialmente independente da presença das outras hastes, porque as hastes situam-se aproximadamente ao longo de equipotenciais e são de pequenas dimensões, de modo a não perturbar muito o campo original. Injetando corrente

pelas 3 hastes, aplica-se o princípio da superposição para determinar o campo resultante. (Como exercício, faça os cálculos do exemplo 2).

Uma configuração como a da Figura 2 é usada por exemplo para aterramento em estações transmissoras de microondas, a fim de se obter um terra de ~ 5 Ohms. Neste caso, as hastes são de aço, cobertas com cobre eletroliticamente depositado, e a interligação é por cabo de cobre nu, diretamente enterrado no solo. É usual ligar o pára-raios que protege a instalação contra raios à extremidade A e todas as carcaças do equipamento eletrônico, bastidores, antenas e a própria torre à extremidade B. (Figuras 2 e 9).

Aterramentos de menor responsabilidade onde o custo deve ser mantido muito baixo são às vezes feitos com perfis de aço galvanizado a fogo, no lugar das hastes cobreadas. Em qualquer caso, deve-se tomar o cuidado de manter apenas um metal em contacto com o solo, pois em caso contrário forma-se entre os metais distintos e o solo uma pilha, causando a corrosão de um deles.

Aterramentos usados em proteção catódica de canalizações metálicas operam sempre como anodo, isto é, injetam corrente positiva no solo. Não podem, portanto, ser metálicos, pois seriam rapidamente consumidos pelas reações químicas. Por isso tais eletrodos são feitos de um anodo de grafite imerso em um invólucro cilíndrico metálico (que será consumido) cheio de moinha de coque compactada, a qual efetivamente constitui o eletrodo. Com essa técnica conseguem-se também grandes dimensões e consequentemente baixas resistências de terra. (Faça os cálculos do exemplo 3).

Outra técnica comumente empregada para obter baixas resistências de terra consiste em tratar o solo que envolve os eletrodos com produtos químicos que o tornam bom condutor. Esse processo aumenta as dimensões efetivas dos eletrodos, mas tem a desvantagem de exigir uma manutenção mais trabalhosa do aterramento, uma vez que os produtos químicos acabam por ser removidos pelas chuvas. Constitui, entretanto, a solução mais viável em terrenos de alta resistividade, especialmente se existir camada rochosa a baixa profundidade.

Em geral, os aterramentos devem limitar sobretensões causadas por raios, as quais são de natureza impulsiva apresentando taxas de subida de até 10 ou 20 kV/ μ s. Desse modo,

importa não só o comportamento do terra em c.c. ou em regime permanente, mas também em regime impulsivo. A fim de diminuir sua indutância, o aterramento deve ter dimensões reduzidas: prefere-se neste caso uma configuração com hastes profundas interligadas a um ponto central por meio de cabos dispostos radialmente.

Em algumas situações, aterramentos são ainda feitos com chapas de cobre enterradas.

6. Medidas de resistência de terra

Para medir a resistência da tomada de terra da Figura 7, injeta-se uma corrente I entre esse terra e uma estaca auxiliar $C2$ e mede-se a diferença de potencial entre esse terra e outra estaca auxiliar $P2$, conforme indicado na Figura 7. A resistência de terra R será dada por:

$$(8) \quad R = \frac{V}{I},$$

se os seguintes cuidados forem tomados:

- 1º): o potencial em $P2$ causado pela corrente I que penetra no solo através da tomada de terra já seja essencialmente o potencial de uma fonte puntiforme em T . (Tomando-se $d_1 > 4.L$ essa aproximação é válida, dentro de 1% - faça os cálculos do exemplo 4).

- 2º): estando os pontos T , $P2$ e $C2$ alinhados como na Figura 7, tivermos $d_1 \cong 0,62 d$.

Note-se que, em (8), V deve ser o potencial de T em relação ao infinito quando a única corrente fonte de campo é I injetada em T . Na montagem da figura 7, a presença da corrente $-I$ em $C2$ abaixa esse potencial de um valor $\Delta V'$. Posicionando $P2$ à distância d_1 indicada, o potencial de $P2$, devido a $+I$ e $-I$ é exatamente $-\Delta V'$, corrigindo portanto a leitura. (Fazer os cálculos do exemplo 5).

Note-se ainda que não colocamos limitação na distância d_2 uma vez que a estaca $C2$ é pequena e essencialmente puntiforme.

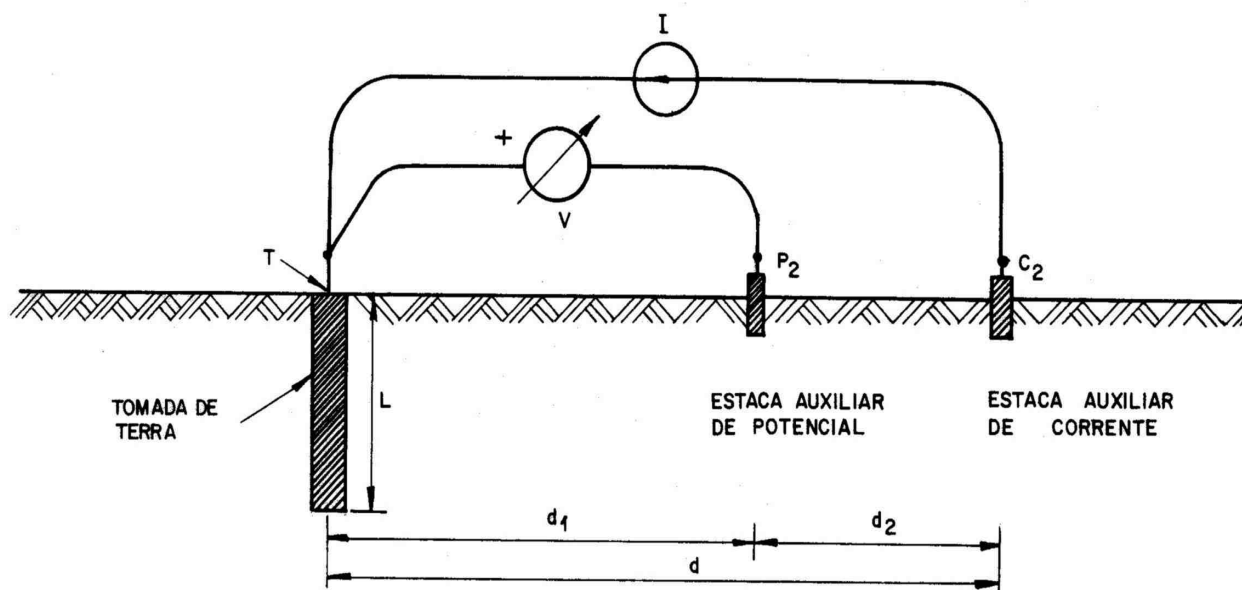


Figura 7 - Ligações para medida de resistência de terra

As estacas T, P2 e C2 não necessitam estar alinhadas; neste caso sua posição relativa é ilustrada na Figura 8. Como a distância da estaca P2 a T deve ser bem maior que a maior dimensão do sistema de aterramento, a posição P2'' da estaca de potencial é especialmente conveniente quando as medidas forem feitas em espaços reduzidos (Faça os cálculos do exemplo 5).

No caso (mais comum) de ser o aterramento constituído por uma malha com várias estacas (ver Figuras 2 e 9) a medida é feita de maneira semelhante à indicada nas Figuras 7 e 8, havendo entretanto uma limitação a mais: d_1 deve ser muito maior que D' , conforme ilustrado nas ligações da Figura 10. (Faça os cálculos dos exemplos 6 e 7).

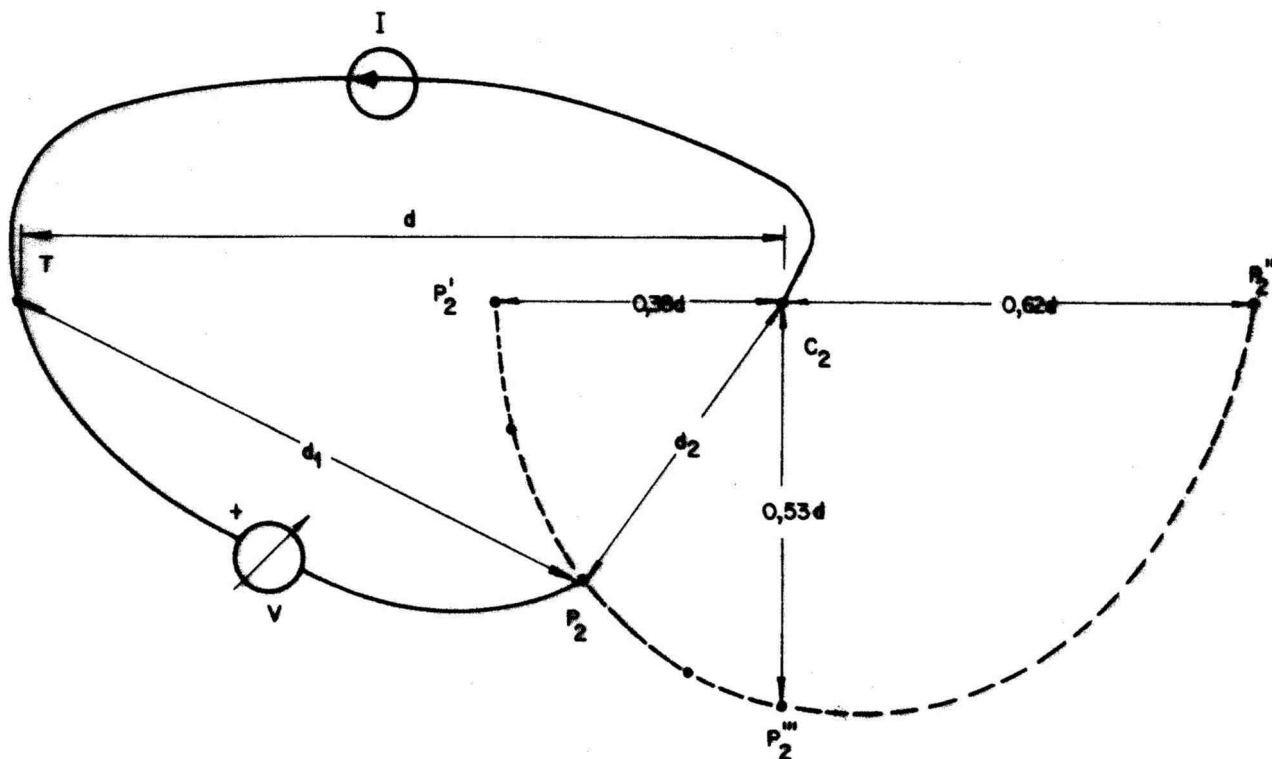


Figura 8 - Planta da localização relativa das estacas auxiliares de corrente (C2) e de potencial (P2) para medida da resistência do aterramento T (em escala).
Notar que o lugar geométrico da estaca de potencial **não** é uma semi-circunferência.

A corrente I deverá ser fornecida por um gerador isolado da terra, com saída balanceada, e se possível de frequência entre 130 e 140 Hz a fim de minimizar os efeitos de correntes de fugas porventura presentes no solo à frequência da rede ou suas harmônicas; as medidas de I e V devem ser seletivas em frequência e o voltímetro de alta impedância. Não sendo disponível tal gerador, poderá ser usada alimentação da rede, porém através de transformador com secundário isolado do primário, a fim de desacoplar o circuito do aterramento já existente na rede.

O método mais cômodo e preciso de efetuar as medidas ilustradas nas Figuras 7, 8 e 10 é com um medidor de resistência de terra, que dispõe de um gerador que fornece I e indica diretamente a relação $R = \frac{V}{I}$.

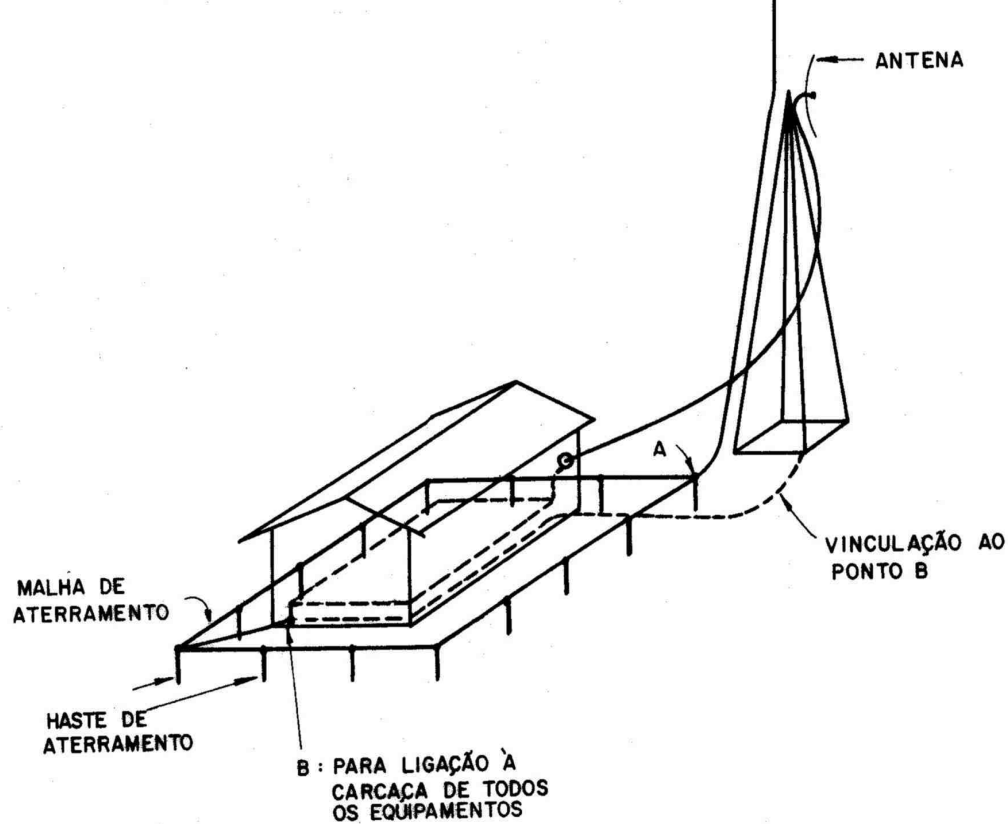


Figura 9 - Esquema de aterramento típico para instalação de rádio

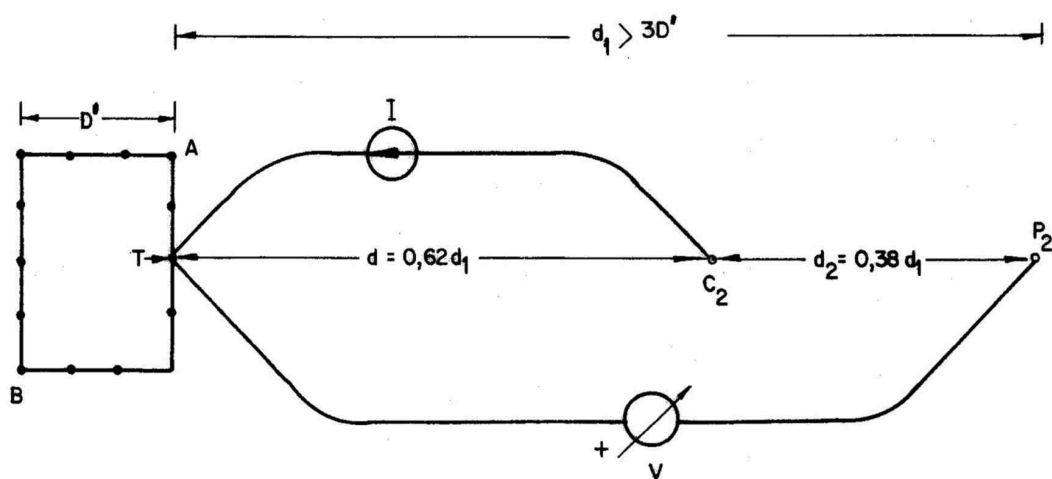


Figura 10 - Ligações para medida da resistência de terra da instalação da Figura 9

Tais medidores têm 2 terminais de corrente, C1 e C2, e 2 de potencial, P1 e P2 (Figura 11). Alguns têm gerador transistorizado, operando em frequência em torno de 130 Hz, outros funcionam com gerador com controle de frequência e intensidade da corrente I.

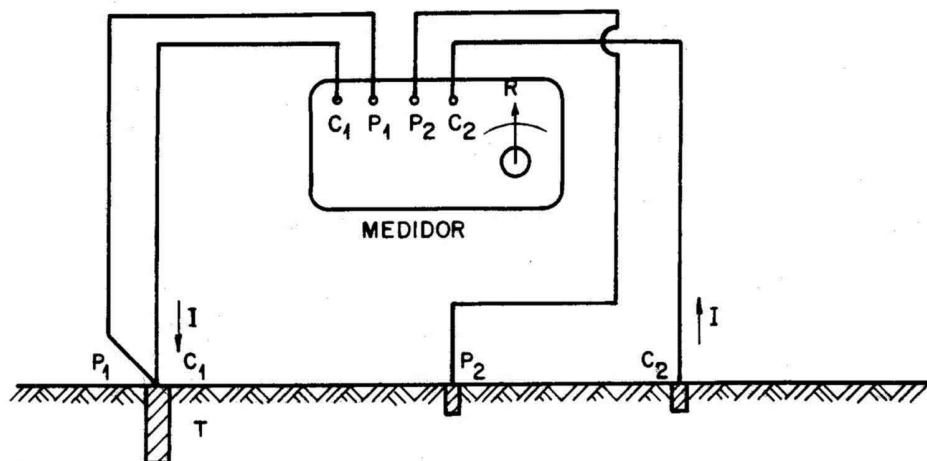


Figura 11 - Esquema das ligações para medida de resistência do aterramento T com um medidor de resistência de terra comercial

7 - Medida de resistividade do solo

Descreveremos a seguir o chamado “método das quatro pontas” para medida da resistividade de um material condutor qualquer, usado em várias aplicações, tais como:

- a) na medida da resistividade do solo, que deve preceder o projeto de um aterramento;
- b) na medida da resistividade de materiais semicondutores, importante elemento na caracterização do material;
- c) em prospecção geológica, usando-se uma extensão do método que permite determinar a variação da resistividade com a profundidade, cuja interpretação revela a constituição do terreno, como por exemplo presença de lençol de água, camada rochosa, etc..

Neste método quatro pequenos eletrodos ($L < a / 20$) são fincados no solo em linha reta, equidistantes dos vizinhos, conforme indicado na Figura 12: entre os eletrodos extremos aplica-se um gerador e medem-se a corrente I por ele fornecida e a tensão V entre os dois eletrodos centrais.

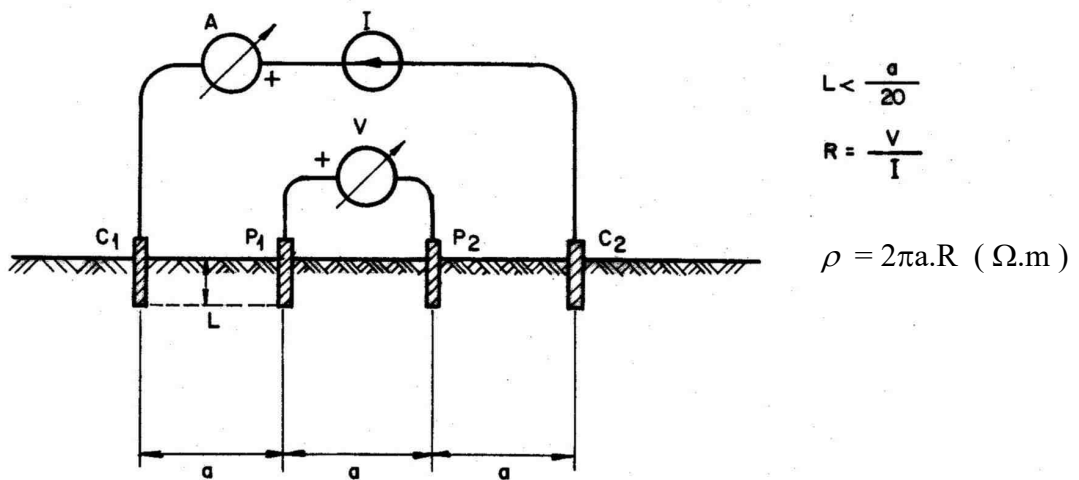


Figura 12 - Ligações para a medida da resistividade do solo pelo método das quatro pontas

Num solo homogêneo, admitindo-se que V seja medido por um voltímetro ideal (isto é, com resistência interna infinita), a relação $R \stackrel{\Delta}{=} \frac{V}{I}$ está relacionada com a resistividade do solo por (faça a demonstração do exemplo 8) :

$$(9) \quad R \stackrel{\Delta}{=} \frac{V}{I} = \frac{\rho}{2\pi a}$$

ou

$$(10) \quad \rho = 2\pi a.R$$

Pelas razões já discutidas no parágrafo 6, aplicam-se aqui as mesmas observações lá feitas quanto ao gerador e medidor, isto é:

a) o gerador que fornece I deve ser isolado de outras terras (da rede, por exemplo), e ter saída balanceada, operando numa frequência de 130 Hz;

b) o amperímetro e voltímetro devem ser seletivos na frequência utilizada, e o voltímetro deve ter alta impedância;

c) não sendo tal gerador disponível, poderá ser usada alimentação da rede, mas através de transformador com secundário isolado do primário;

d) é mais cômodo e mais preciso fazer a medida com um medidor de resistência de terra, que opera com gerador próprio em frequência em torno de 130 Hz e fornece diretamente o valor $R = \frac{V}{I}$ (Figura 13).

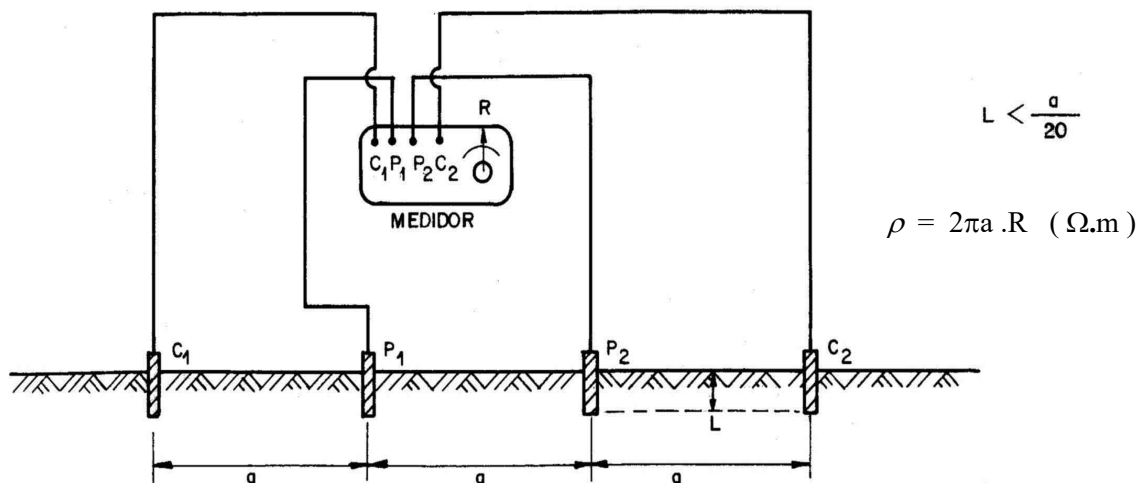


Figura 13 - Medida de resistividade do solo com medidor de resistência de terra

Note-se que neste método as dimensões dos eletrodos de corrente (C1 e C2), desde que pequenas ($L < a / 20$), só influem na sensibilidade da medida, uma vez que suas resistências de terra estão em série com o gerador, desta forma limitando o valor da corrente I que flui pelo solo entre C1 e C2. As resistências de terra dos eletrodos de potencial (P1 e P2) entretanto afetam a medida, pois ficam em série com o sensor de potencial (determine o gerador equivalente de Thèvenin do exemplo 9). Cada fabricante de medidor de resistência de terra fornece os valores limites das resistências de terra dos eletrodos para uma dada precisão na medida da resistividade.

8 - Resistividade de solo estratificado

É útil interpretar a medida da resistividade do solo pelo método das 4 pontas (Figuras 12 e 13) em termos da região do solo que é efetivamente observada. Cálculos efetuados no

modelo que é abaixo descrito revelam que a resistividade medida depende essencialmente das características do solo até uma profundidade a, isto é, se abaixo dessa profundidade o solo for alterado drasticamente - de condutor a isolante perfeitos, a resistividade medida variará apenas de um fator entre 0,6 e 1,5. Tal resultado pode ser intuitivamente compreendido se considerarmos que a profundidade em que penetra uma fração apreciável das linhas de corrente depende diretamente da distância a.

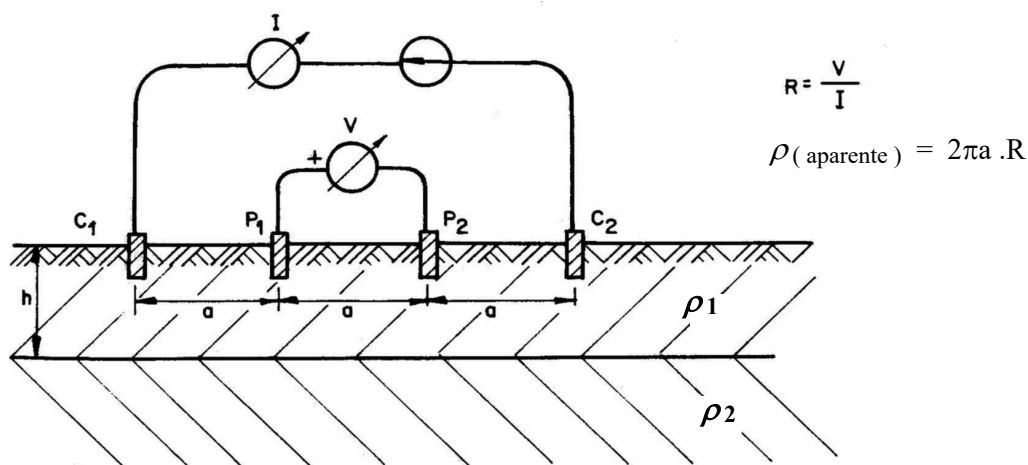


Figura 14 - Medida da resistividade (aparente) ρ pelo método das quatro pontas

As relações entre os parâmetros do modelo (ρ_1 , ρ_2 , h) e as resistividades aparentes ρ medidas com espaçamentos a variáveis foram calculados em [6] e são apresentadas na Figura 15. Cada curva refere-se a uma relação (ρ_2 / ρ_1), e dá (ρ / ρ_1) em função de (a / h). As escalas são logarítmicas para facilitar o uso: medidas de ρ são feitas com vários espaçamentos a ; se o solo puder ser bem representado por duas camadas, uma curva (e uma única) será bem ajustada pelos pares (ρ , a) experimentalmente determinados, fornecendo a relação (ρ_2 / ρ_1). A posição dos pontos experimentais sobre a curva dará as relações (ρ / ρ_1) e (a / h).

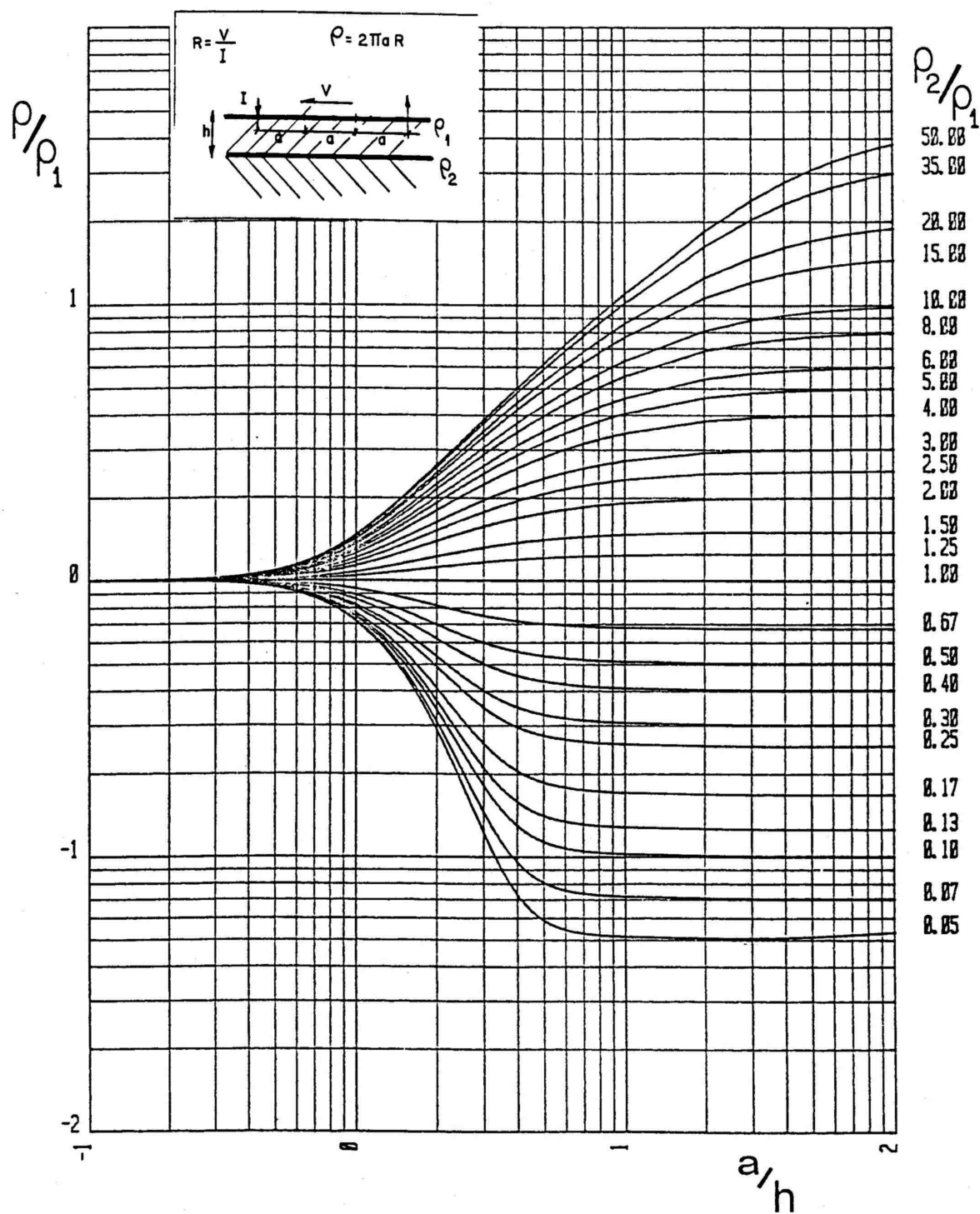


Figura 15 - Resistividade aparente ρ em função do espaçamento dos eletrodos (a) no método das quatro pontas - ver Figura 14

9 - Resistividade de solos comuns

Os valores de resistividades reproduzidos abaixo referem-se a solos típicos e devem ser usados apenas como ordem de grandeza.

TIPO DE SOLO	RESISTIVIDADE ρ (Ohm.m)
Solo orgânico (fértil, de cultura), molhado	10 - 30
Solo relativamente fértil	100
Areia úmida	300
Terreno desértico seco, areia seca	1.000
Pedrisco seco	3.000
Rocha	> 10.000

10 - Exemplos

1) - Determinar a resistência de terra de uma haste de aço cobreada, de diâmetro 2 cm, comprimento $L = 2$ m, verticalmente enterrada em solo homogêneo de resistividade $\rho = 100$ Ohm.m (terreno úmido) conforme ilustrado na Figura 5.

Determinar o raio a da semi esfera equivalente.

$R =$ _____ Ohm

$a =$ _____ m

2) - Para se baixar a resistência de terra do exemplo 1 interligam-se 3 hastes idênticas, cravadas em linha e espaçadas 5 m uma da outra, conforme ilustrado na Figura 6. Determinar a distribuição da corrente $I = 100$ A entre as 3 hastes e a resistência desse aterramento. (Note que a corrente não se distribui igualmente entre as hastes, e que a resistência é maior que $1/3$ da resistência de uma só haste!)

$I_1 = I_3 =$ _____ A $I_2 =$ _____ A $R =$ _____ Ohm

3) - Determinar a resistência de terra de um eletrodo constituído de coque compactado na forma de cilindro com comprimento 6 m e diâmetro 30 cm, enterrado em solo úmido (100 Ohm.m) conforme ilustrado na Figura 5.

$$R = \underline{\hspace{2cm}} \text{ Ohm}$$

4) - Através da haste do exemplo 1 (Figura 5) uma corrente $I = 100 \text{ A}$ é injetada no solo.

a) calcule os potenciais em pontos da superfície do solo situados a distâncias L , $2L$, $3L$ e $4L$ da haste.

b) calcule os potenciais nesses mesmos pontos, causados por fonte puntiforme em A (Figura 5). Esses potenciais são maiores ou menores que os calculados em a) ? Justifique fisicamente esse comportamento.

c) expresse em porcentagem as diferenças entre a) e b).

a) $V(L)$:	b) $V(L)$:	c) $\Delta V / V$ (%):
$V(2L)$:	$V(2L)$:	
$V(3L)$:	$V(3L)$:	
$V(4L)$:	$V(4L)$:	

5) - Verifique que a localização da estaca de tensão em qualquer das posições $P2'$, $P2''$ ou $P2'''$ (Figura 8) conduz à correta medida da resistência do terra localizado em T , desde que o potencial causado por este à distância d_1 já seja essencialmente o de uma fonte puntiforme.

6) - Verifique que as ligações da Figura 10, com d_1 muito maior que D' , dão a correta medida da resistência do aterramento, sem que se tenha conhecimento de como a corrente I se distribui pelas várias hastes que compõem o aterramento.

7) - Para avaliar a precisão da medida indicada na Figura 10, considere o modelo simplificado ilustrado na Figura 16, de um aterramento constituído por duas hastes idênticas,

de modo que a corrente I se divida igualmente entre elas. Sejam $R = 10$ Ohms a resistência do aterramento, $D' = 10$ m e $\rho = 10$ Ohm.m (terreno orgânico molhado).

a) sabendo-se que o diâmetro das hastes é 2 cm, calcule aproximadamente o seu comprimento L , a fim de verificar que L é pequeno em comparação com as outras dimensões.

b) calcule a resistência medida, bem como o erro percentual quando se toma $d_1 = 3D' = 30$ m.

c) idem, quando $d_1 = 5D' = 50$ m.

a) $L \cong$ _____ m

b) $R_{\text{med}}(d_1 = 3D') =$ _____ Ohms; $\frac{\Delta R}{R} =$ _____ %

c) $R_{\text{med}}(d_1 = 5D') =$ _____ Ohms; $\frac{\Delta R}{R} =$ _____ %

8) - Mostre que, num terreno homogêneo (ρ uniforme), vale a relação entre as grandezas da Figura 12:

$$R \stackrel{\Delta}{=} \frac{V}{I} = \frac{\rho}{2\pi a}.$$

Considere que as estacas são pequenas, podendo ser consideradas puntiformes, e que o voltímetro não absorve corrente.

9) Determine o gerador de Thèvenin visto pelo voltímetro da Figura 12. (A força eletromotriz será função de I , ρ e a , como já determinado no exemplo 8, e a impedância interna será função das resistências de terra dos eletrodos $P1$ e $P2$).

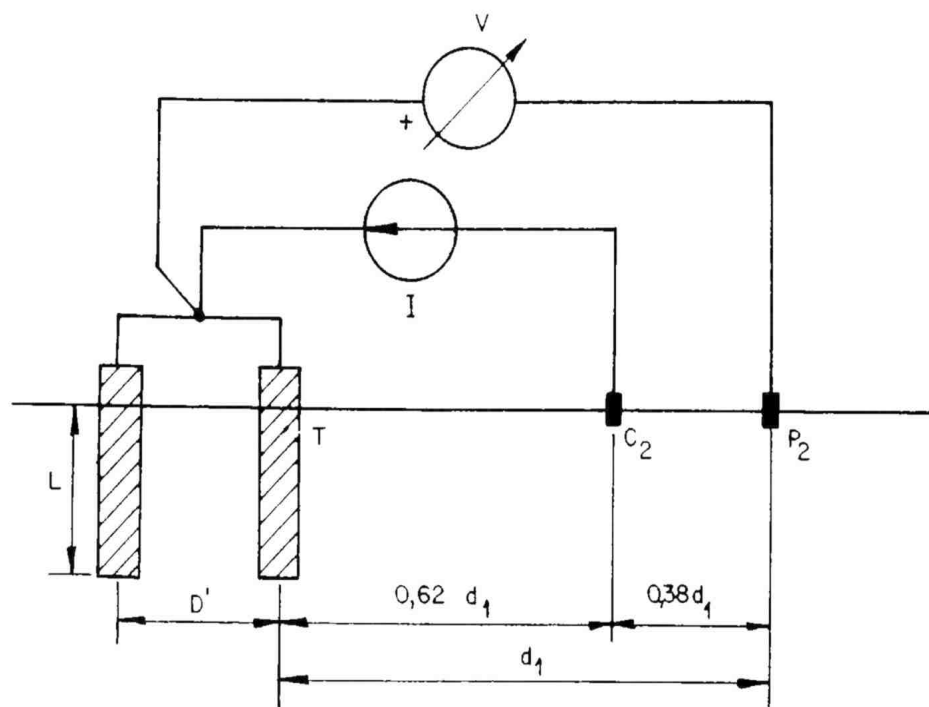


Figura 16 - Modelo simplificado para avaliação de precisão nas medidas

11 - Bibliografia

- [1] - "IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Ground System" publicado pelo IEEE, Standards Department, 1983
- [2] - Ramo, S., J.R. Whinnery e T. Van Duzer, "Fields and Waves in Communication Electronics", Wiley-Toppan, 1965.
- [3] - Fano, R.M., L.J. Chu e R.B. Adler, "Electromagnetic Fields, Energy, and Forces", Wiley, 1960
- [4] - Seely, S., "Introduction to Eletromagnetic Fields", McGraw Kogakusha, 1958
- [5] - Camargo, J.B. "Eletromagnetismo", DEE, EPUSP, 1984

- [6] - Sunde, E.D., “Earth Conduction Effects in Transmission Systems”, Van Nostrand, 1949
- [7] - Larsen, S.L. e D.E. Nordell, “The Measurement of Substation Ground Resistance”, IEEE Trans. on P.A.S., vol. 94, ps. 1666 -1673, 1975
- [8] - Kindermann, G. e Campagnolo, J. M., “Aterramento Elétrico”, Sagra-DC Luzzatto Editores, 3ª Edição, 1995

12 - Material Utilizado

- uma haste de terra (1) já cravada no solo (comprimento = 3 m, diâmetro = 17 mm)
- uma haste de terra (2) já cravada no solo a 30 m da haste (1) (comprimento = 3 m, diâmetro = 17 mm)
- 4 hastes auxiliares + 2 hastes tipo L
- 1 transformador 110/220 V com secundário isolado do primário
- 1 auto-transformador variável (Variac)
- 1 multímetro digital
- 1 amperímetro de ferro móvel
- 1 voltímetro de ferro móvel
- 2 medidores de resistência de terra (Norma E3960 ou Megger ET 5 e Yokogawa 3235)
- Bobinas de fios calibre 14 ou 16 AWG
- 1 trena
- 1 chave liga/desliga
- martelo
- ponto de aterramento do prédio
- extensão 110 V
- Cabos banana / banana (8)
- Cabos banana / jacaré (2)