

11.1 INTRODUÇÃO

Toda instalação elétrica de média e baixa tensão para funcionar com desempenho satisfatório e ser suficientemente segura contra risco de acidentes fatais deve possuir um sistema de aterramento dimensionado adequadamente para as condições de cada projeto.

Um sistema de aterramento visa à:

- segurança de atuação da proteção;
- proteção das instalações contra descargas atmosféricas;
- proteção do indivíduo contra contatos com partes metálicas da instalação energizadas acidentalmente;
- uniformização do potencial em toda área do projeto, prevenindo contra lesões perigosas que possam surgir durante uma falta fase-terra.

11.2 PROTEÇÃO CONTRA CONTATOS INDIRETOS

O acidente mais comum a que estão submetidas as pessoas, principalmente aquelas que trabalham em processos industriais ou desempenham tarefas de manutenção e operação de sistemas industriais, é o toque acidental em partes metálicas energizadas, ficando o corpo ligado eletricamente sob tensão entre fase e terra. Assim, entende-se por contato indireto aquele que um indivíduo mantém com uma determinada massa do sistema elétrico que, por falha, perdeu a sua isolamento e permitiu que esse indivíduo ficasse submetido a um determinado potencial elétrico.

O limite de corrente alternada suportada pelo corpo humano é de 25 mA, sendo que na faixa entre 15 e 25 mA o indivíduo sente dificuldades em soltar o objeto energizado. Entre 15 e 80 mA, o indivíduo é acometido de grandes contrações e asfixia. Acima de 80 mA até a ordem de grandeza de poucos ampères, o indivíduo sofre graves lesões musculares e queimaduras, além de asfixia imediata. Acima disto, as queimaduras são intensas, o sangue sofre o processo de eletrólise, a asfixia é imediata e há necrose dos tecidos. A gravidade dessas lesões dependem do tempo de exposição do corpo humano à corrente elétrica.

11.2.1 Tensão de Contato ou de Toque

É aquela a que está sujeito o corpo humano quando em contato com partes metálicas (massa) acidentalmente energizadas. A Figura 11.1(a) mostra as condições de um indivíduo submetido a uma tensão de toque. A Figura 11.1(b) mostra o esquema elétrico correspondente.

O valor máximo de tensão de toque que uma pessoa pode suportar sem que ocorra a fibrilação ventricular pode ser expresso pela Equação (11.22).

11.2.2 Tensão de Passo

Quando um indivíduo se encontra no interior de uma malha de terra e através desta está fluindo, naquele instante, uma determinada corrente de defeito, fica submetido a uma tensão entre os dois

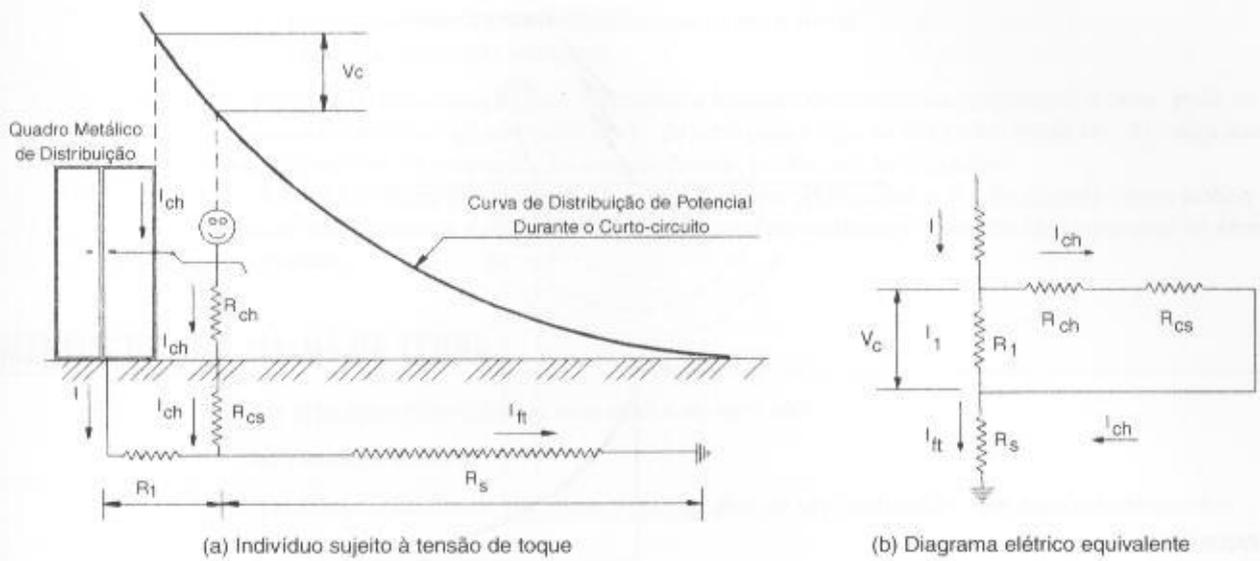


FIGURA 11.1 Tensão de toque I_f – corrente de curto-circuito fase e terra; I_{ch} – corrente de choque; R_{ch} – resistência do corpo humano; R_s – resistência do solo; R_{cs} – resistência de contato resultante de cada pé com o solo; V_c – tensão de contato.

pés, conforme se pode observar na Figura 11.2(a), sendo que a Figura 11.2(b) mostra o circuito elétrico correspondente.

Cabe salientar que a corrente elétrica quando injetada no solo através de eletrodos ou diretamente por descarga atmosférica se dispersa em forma de arcos com o centro no local de penetração, podendo provocar uma tensão de passo, conforme ilustra a Figura 11.3 para o caso de uma descarga atmosférica.

11.2.2.1 Limite da tensão de passo para um indivíduo no interior de uma malha de terra

É aquela que, durante o funcionamento de uma instalação de terra, pode aparecer entre os pés de uma pessoa dando um passo de abertura igual a 1 m, em conformidade com a Figura 11.4.

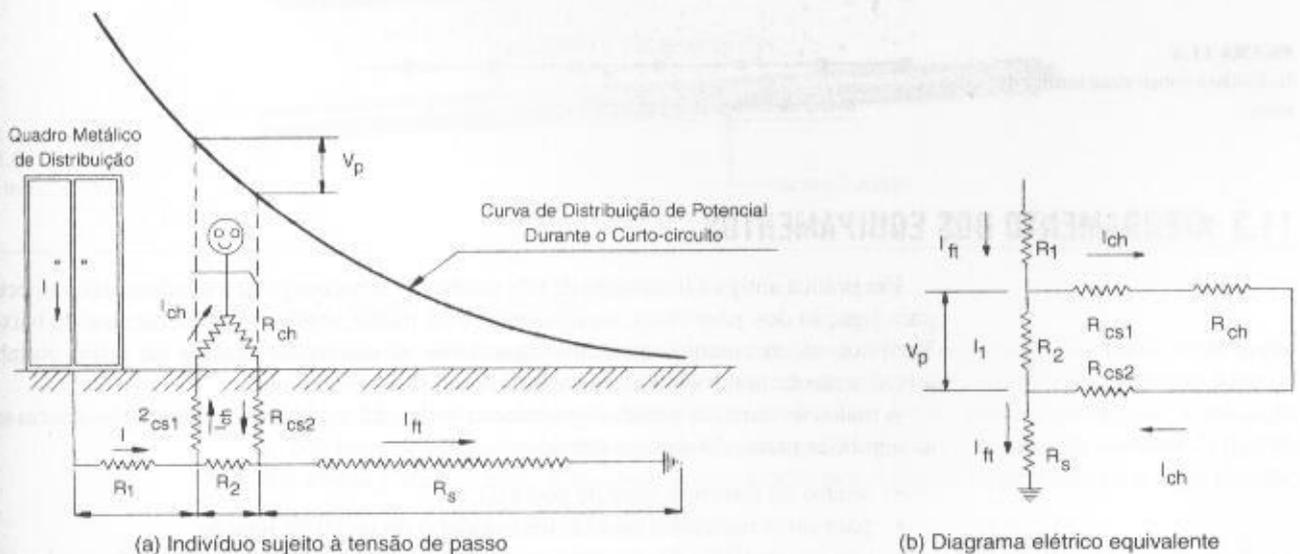


FIGURA 11.2 Tensão de passo R_{cs1} – resistência de contato do pé direito; R_{cs2} – resistência de contato do pé esquerdo; I_f – corrente de curto-circuito fase e terra; I_{ch} – corrente de choque; R_{ch} – resistência do corpo humano; R_s – resistência do solo; V_p – tensão de contato.

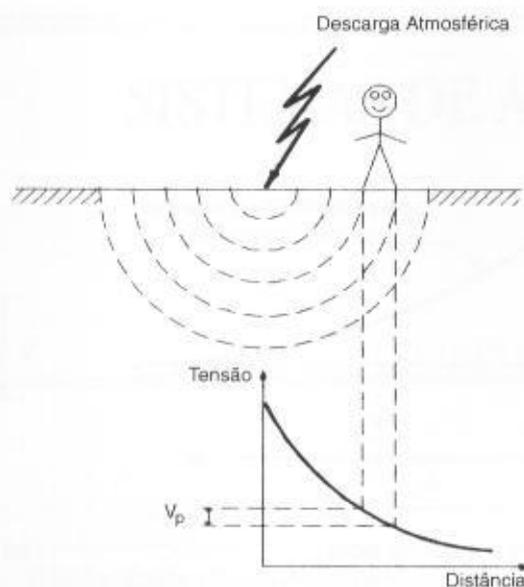


FIGURA 11.3
Tensão de passo por raio

Para reduzir as tensões perigosas de passo, por exemplo, as subestações são dotadas de uma camada de brita cuja espessura pode variar entre 10 e 20 cm, melhorando o nível de isolamento do operador, conforme se observa na Figura 11.4.

O valor máximo da tensão de passo que uma pessoa pode suportar sem que ocorra a fibrilação ventricular pode ser expresso pela Equação (11.19).

A corrente máxima admitida pelo corpo humano, denominada corrente de choque, pode ser determinada pela Equação (11.25).

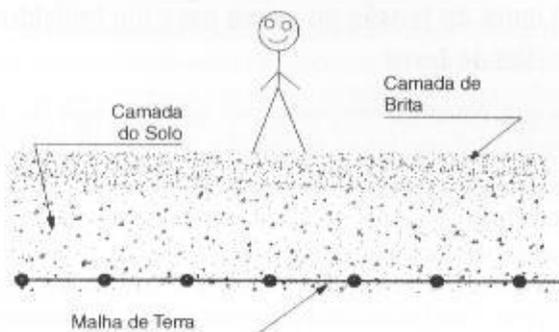


FIGURA 11.4
Indivíduo sobre uma malha de terra

11.3 ATERRAMENTO DOS EQUIPAMENTOS

Era prática antiga a instalação de três malhas de terra nos projetos industriais, respectivamente para ligação dos pára-raios, equipamentos de média tensão e equipamentos de baixa tensão. Verificou-se, entretanto, que, interligando-se as diferentes malhas de terra, obtinha-se um aterramento de maior eficiência e segurança.

À malha de terra construída sob o terreno onde está implantada a subestação, devem ser ligadas as seguintes partes do sistema elétrico:

- neutro do transformador de potência;
- pára-raios instalados na(s) extremidade(s) do ramal de ligação;
- carcaça metálica dos equipamentos elétricos: transformadores de potência, de medição, de proteção, disjuntores, capacitores, motores etc.;
- suportes metálicos das chaves fusíveis e seccionadoras, isoladores de apoio, transformadores de medição, chapas de passagem, telas de proteção, portões de ferro etc.;

- estruturas dos quadros de distribuição de luz e força;
- estruturas metálicas em geral.

No caso de a subestação ficar distante das instalações industriais propriamente ditas, pode ser conveniente a construção de outra malha de terra para a ligação das partes metálicas das máquinas e equipamentos de produção. As malhas devem, porém, ser interligadas.

A malha de terra produz maior segurança quando construída sob o local onde foram instalados os equipamentos a ela conectados, pois esse procedimento uniformiza o potencial na área em questão.

11.4 ELEMENTOS DE UMA MALHA DE TERRA

Os principais elementos de uma malha de terra são:

a) Eletrodos de terra

Também chamados de eletrodos verticais, podem ser constituídos dos seguintes elementos:

- Aço galvanizado

Em geral, após um determinado período de tempo, o eletrodo (haste cantoneira ou cano de ferro) sofre corrosão, aumentando, em consequência, a resistência de contato com o solo. Seu uso, portanto, deve ser restrito.

- Aço cobreado

Dada a cobertura da camada de cobre sobre o vergalhão de aço, o eletrodo adquire uma elevada resistência à corrosão, mantendo as suas características originais ao longo do tempo. O processo de eletrodeposição tem-se mostrado, na prática, mais eficiente que o processo de encamisamento da haste que, quando submetida a choques mecânicos para cravamento no solo, muitas vezes tem o vergalhão de aço separado da capa de revestimento. A Figura 11.5 mostra dois diferentes tipos de eletrodo de terra: haste prolongável e haste comum.

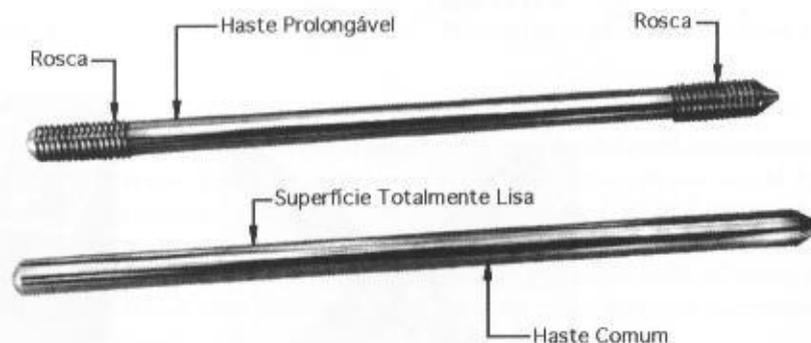


FIGURA 11.5
Hastes de terra

b) Condutor de aterramento

No caso de solos de características ácidas, pode-se utilizar o condutor de cobre nu de seção não inferior a 16 mm^2 . Para solos de natureza alcalina, a seção do condutor de cobre não deve ser inferior a 25 mm^2 . Em subestações industriais aconselha-se, até por motivos mecânicos, a utilização do condutor de aterramento com seção não inferior a 25 mm^2 . A grandeza da corrente de defeito fase e terra poderá, porém, determinar seções superiores. A Figura 11.6(a) mostra a seção de cabo utilizado como condutor de aterramento.

c) Conexões

São elementos metálicos utilizados para conectar os condutores nas emendas ou derivações. Existe uma grande variedade de conectores, destacando-se os seguintes.

- Conectores aparafusados

São peças metálicas de formato mostrado na Figura 11.6(b) utilizadas na emenda de condutores. Sempre que possível deve-se evitar a sua utilização em condutores de aterramento.

- Conexão exotérmica

É um processo de conexão a quente onde se verifica uma fusão entre o elemento metálico de conexão e o condutor. Existem vários tipos de conexão utilizando este processo. A Figura 11.6(c) ilustra uma conexão exotérmica tipo derivação (T). Já a Figura 11.6(d) mostra uma conexão exotérmica tipo cruzamento (X).

A conexão exotérmica é executada no interior de um cadinho, sendo que para cada tipo de conexão há um modelo específico de cadinho. A Figura 11.6(e) ilustra um cadinho próprio para a conexão tipo (T) para emenda de condutores.

d) Condutor de proteção

É aquele utilizado para a ligação das massas (por exemplo: carcaça dos equipamentos) aos terminais de aterramento parcial e principal. Este último será ligado à malha de terra através do condutor de aterramento. A NBR 5410/04 estabelece a seção mínima dos condutores de proteção e as condições gerais de instalação e operação, valores estes explicitados no Capítulo 3.

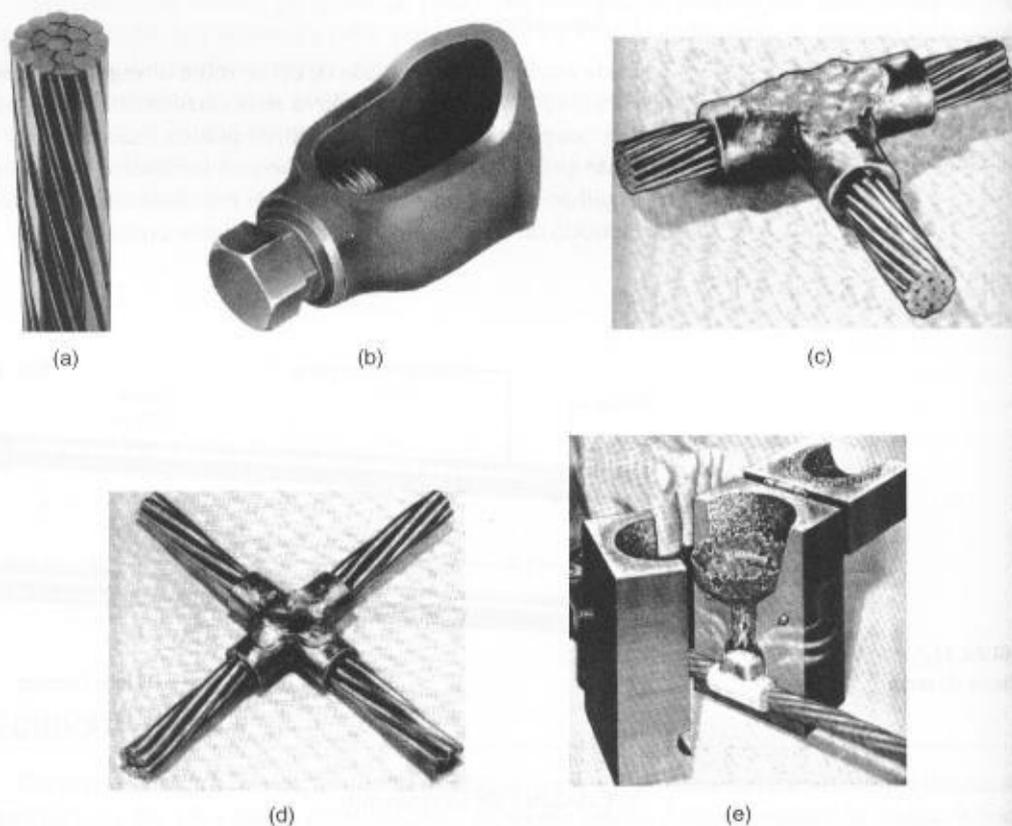


FIGURA 11.6
Acessórios para malha de terra

(a) Cabo; (b) Conexão aparafusada; (c) Conexão exotérmica em T; (d) Conexão exotérmica em X; (e) Cadinho.

11.4.1 Resistência de um Sistema de Aterramento

Num sistema de aterramento, considera-se como resistência de terra o efeito de três resistências, a saber:

- a resistência relativa às conexões existentes entre os eletrodos de terra (hastes e cabos);
- a resistência relativa ao contato entre os eletrodos de terra e a superfície do terreno em torno dos mesmos;
- a resistência relativa ao terreno nas imediações dos eletrodos de terra, denominada também resistência de dispersão.

O primeiro componente é de valor desprezível perante os demais e, portanto, não é considerado no dimensionamento do sistema de aterramento. Na prática, a resistência de terra pode ser geralmente identificada como sendo as demais resistências especificadas.

Cabe salientar que é grande a densidade de corrente nas imediações dos eletrodos de terra sendo notável o valor da resistência elétrica, conforme se observa na ilustração da Figura 11.7. Como a corrente se dispersa de maneira fantástica no solo, tornando-se a densidade praticamente nula, a resistência do solo no percurso da corrente elétrica é considerada desprezível, conforme se observa na Figura 11.8.



FIGURA 11.7
Dispersão de corrente por eletrodo

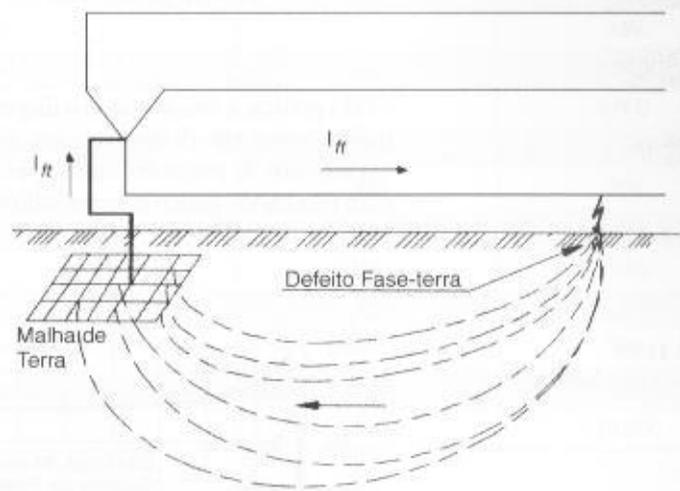


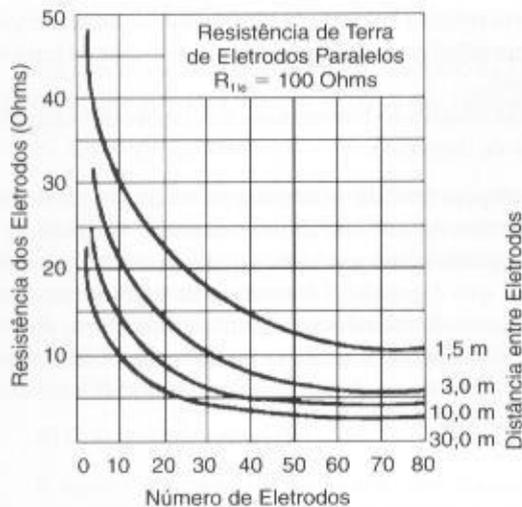
FIGURA 11.8
Percurso da corrente de defeito fase-terra

Investigações realizadas mostram que 90% da resistência elétrica total de um terreno que envolve um eletrodo nele enterrado se encontra geralmente dentro de um raio de 1,8 a 3,5 m do eixo geométrico do referido eletrodo. Dessa forma explica-se porque é normal durante o tratamento do solo, através de produtos químicos, retirar a terra em torno do eletrodo e misturá-la a substâncias redutoras de resistência do solo. Na realidade, produz-se artificialmente um eletrodo de grande seção transversal cuja resistência pode ser dada pela conhecida expressão $R = \rho \times L/S$, em que R é inversamente proporcional à área S .

A Figura 11.9 representa a resistência de um sistema de terra de eletrodos verticais em paralelo, cada qual tendo uma resistência de terra de 100 Ω , em função do número de eletrodos e da distância entre estes. Por este gráfico pode-se determinar, para um número total de 20 hastes de um sistema de aterramento mantidas a uma distância de 3 m entre si, a resistência equivalente que é de 14 Ω . Mantendo-se, porém, o mesmo número de hastes e aproximando-as entre si para uma distância de 1,5 m, a resistência equivalente obtida é de 23 Ω , aproximadamente.

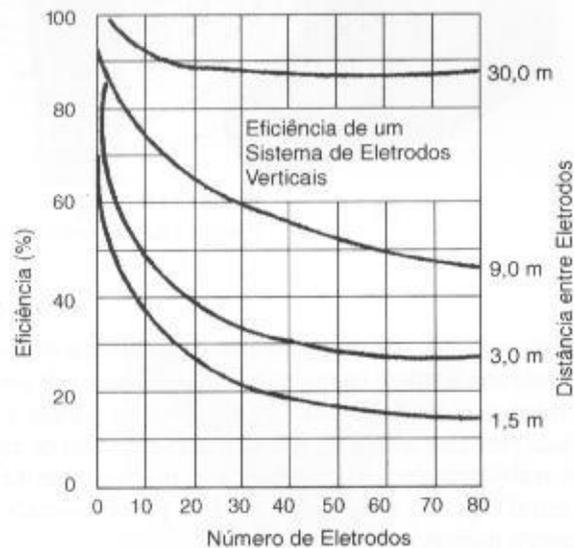
Cabe ressaltar que a distância mínima entre eletrodos contíguos deve corresponder ao comprimento efetivo de uma haste. Este procedimento deve-se ao fato de que quando dois eletrodos demasiadamente próximos são percorridos por uma elevada corrente de falta, dispersa por ambos, esta provoca um aumento na impedância mútua. A Figura 11.10 expressa a eficiência de um sistema de eletrodos verticais em paralelo, em função da quantidade de eletrodos utilizada e da distância entre estes.

FIGURA 11.9
Resistência de terra dos
eletrodos



Na prática, a resistência dos dispersores em paralelo exige que o terreno tenha certas dimensões muitas vezes não disponíveis em áreas de instalações industriais. A aplicação de muitas hastes em terrenos de pequenas dimensões resulta, essencialmente, um notável desperdício de material, com resultados pouco compensadores.

FIGURA 11.10
Eficiência dos eletrodos



11.5 RESISTIVIDADE DO SOLO

Para o projeto de um sistema de aterramento, é de primordial importância o conhecimento prévio das características do solo, principalmente no que diz respeito à homogeneidade de sua constituição. A Tabela 11.1 fornece a resistividade de diferentes naturezas de solo compreendidas entre valores inferior e superior, que podem ser usados na elaboração de projeto de malha de terra, desde que não se disponha de medições adequadas. Para cálculos precisos de resistividade do solo é necessário, porém, realizar medições com instrumentos do tipo terrômetro.

TABELA 11.1
Resistividade dos solos

Natureza dos Solos	Resistividade ($\Omega \cdot m$)	
	Mínima	Máxima
Solos alagadiços e pantanosos	-	30
Lodo	20	100
Húmus	10	150
Argilas plásticas	-	50
Argilas compactas	100	200
Terra de jardins com 50% de umidade	-	140
Terra de jardins com 20% de umidade	-	480
Argila seca	1.500	5.000
Argila com 40% de umidade	-	80
Argila com 20% de umidade	-	330
Areia com 90% de umidade	-	1.300
Areia comum	3.000	8.000
Solo pedregoso nu	1.500	3.000
Solo pedregoso coberto com relva	300	500
Calcários moles	100	400
Calcários compactos	100	5.000
Calcários fissurados	500	1.000
Xisto	50	300
Micaxisto	-	800
Granito e arenito	500	10.000

11.5.1 Método de Medição (Método de Wenner)

Consiste em colocar quatro eletrodos de teste em linha separados por uma distância A e enterrados no solo com uma profundidade de 20 cm. Os dois eletrodos extremos estão ligados aos terminais de corrente $C1$ e $C2$ e os dois eletrodos centrais estão ligados aos terminais de potencial $P1$ e $P2$ do terrômetro.

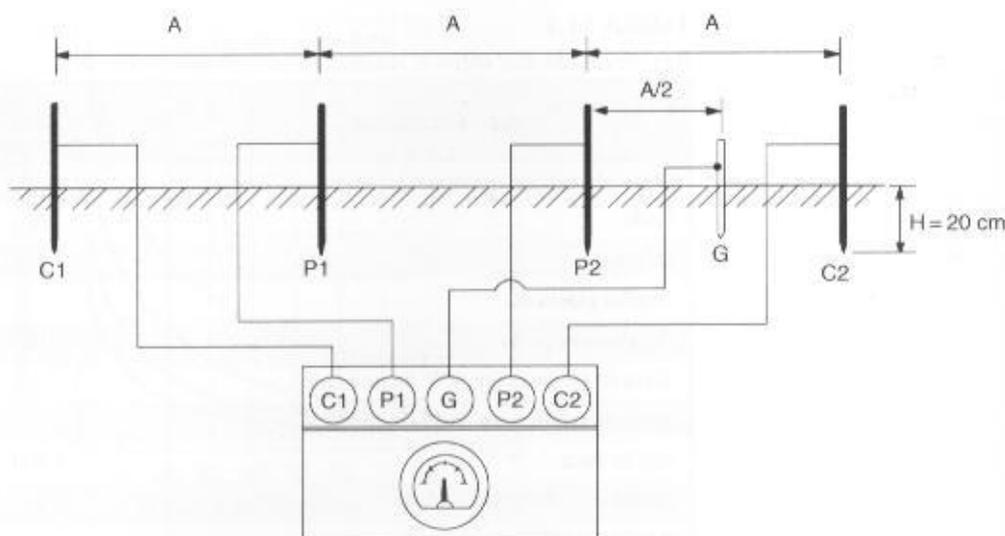
Alguns instrumentos do tipo *Megger* de terra dispõem de um terminal guarda ligado a um eletrodo, com a finalidade de minimizar os efeitos das correntes parasitas de valor relativamente elevado, que podem distorcer os resultados lidos. A disposição do terrômetro para medição e dos eletrodos está representada na Figura 11.11.

Para realizar uma medição de resistividade de solo e obter resultados satisfatórios devem ser seguidos alguns pontos básicos:

- os eletrodos devem ser cravados, aproximadamente, a 20 cm no solo, ou até que apresentem resistência mecânica de cravação consistente, definindo uma resistência de contato aceitável;
- os eletrodos devem estar sempre alinhados;
- a distância entre os eletrodos deve ser sempre igual;
- para cada espaçamento definido entre os eletrodos, ajustar o potenciômetro e o multiplicador do terrômetro até que o galvanômetro do aparelho indique zero com o equipamento ligado;
- o espaçamento entre os eletrodos deve variar de acordo com a série da Tabela 11.2, equivalendo a uma medida por ponto para cada distância considerada;
- a distância entre as hastes corresponde à profundidade do solo cuja resistividade se está medindo, conforme ilustrado na Figura 11.12;

FIGURA 11.11

Ligação do terrômetro aos eletrodos de medida de resistividade do solo



- se o ponteiro do galvanômetro oscilar insistentemente, isso significa que existe alguma interferência que deve ser eliminada ou minimizada, afastando-se, por exemplo, os pontos de medição;
- devem ser anotadas as condições de umidade, temperatura etc. do solo;
- o valor da resistividade deve ser dado pela Equação 11.1.

$$\rho = 2 \times \pi \times A \times R \ (\Omega \cdot m) \quad (11.1)$$

TABELA 11.2

Resistividade média do solo ($\Omega \cdot m$)

Posição dos Eletrodos	Resistividade Medida					Resistividade Média ($\Omega \cdot m$)
	Pontos Medidos					
Distância (m)	A	B	C	D	E	
2						
4						
8						
16						
32						

A – distância entre eletrodos, em m;

R – valor da resistência do solo indicado no potenciômetro do terrômetro, em Ω .

- com base nos valores resultantes da medição, calcular a resistividade média, ou seja:
- calcular a média aritmética dos valores de resistividade do solo para cada espaçamento considerado;
- calcular o desvio de cada medida em relação à média aritmética anteriormente determinada;
- desprezar todos os valores de resistividade que tenham um desvio superior a 50% em relação à média;
- para um grande número de valores desviados da média, é conveniente repetir as medições em campo;
- persistindo os resultados anteriores, a região pode ser considerada como não aderente ao processo de modelagem do método de Wenner.

A Figura 11.13 ilustra a disposição dos eletrodos no plano do terreno e a direção em que devem ser realizadas as medições de resistividade.

FIGURA 11.12
Passagem da corrente pelos
eletrodos de potencial

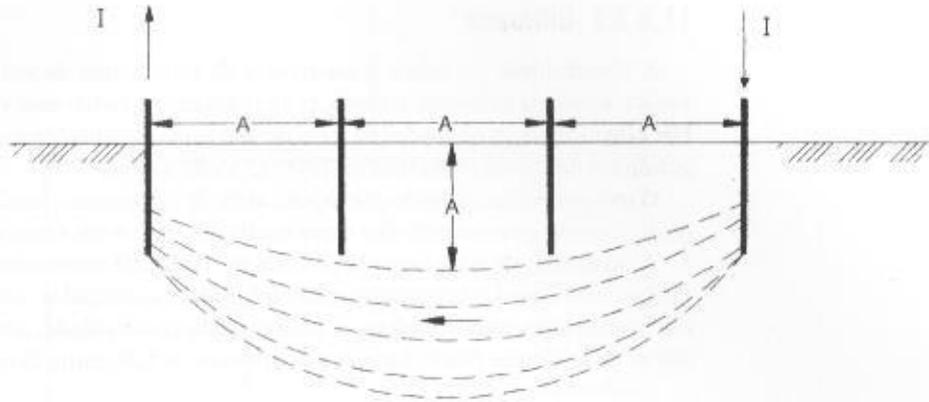
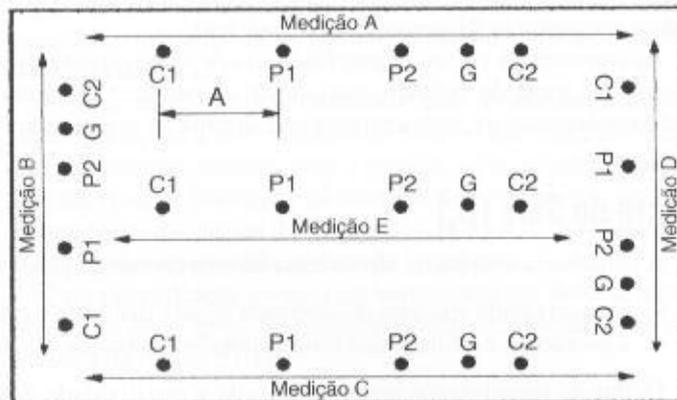


FIGURA 11.13
Posição dos eletrodos no terreno
para a medição da resistividade
do solo



11.5.2 Fatores de Influência na Resistividade do Solo

A resistividade do solo é função de vários fatores que podem variar, dependendo das condições a que este está submetido no instante da medição.

11.5.2.1 Composição química

A presença e a quantidade de sais solúveis e ácidos que normalmente se acham agregados ao solo influenciam predominantemente no valor da resistividade deste. Sabe-se que, quando é necessário reduzir a resistência de uma determinada malha de terra, adicionam-se adequadamente produtos químicos ao solo circundante ao eletrodo de terra. Há vários produtos químicos à base de mistura de sais, que, combinados entre si e na presença de água, formam o GEL, produto de uso comercial e de grande eficiência na redução da resistividade do solo. Esses compostos têm as seguintes características:

- são higroscópios;
- dão estabilidade química ao solo;
- não são corrosivos;
- não são atacados pelos ácidos;
- são insolúveis na presença de água;
- têm longa duração (geralmente de 5 a 6 anos).

O tratamento de solo através da utilização de sal e carvão vegetal, ainda de largo uso entre alguns instaladores, não apresenta os efeitos esperados, principalmente pela curta duração de sua eficiência e também pela agressão corrosiva atuante nos eletrodos de terra.

11.5.2.2 Umidade

A resistividade do solo e a resistência de uma malha de terra são bastante alteradas quando varia a umidade existente no solo, principalmente quando este valor cai a níveis abaixo de 20%. Por este motivo, os eletrodos de terra devem sem implantados a uma profundidade adequada para garantir a necessária umidade do solo em torno destes.

O teor normal de umidade de um solo, além de variar com a localização, depende também da época do ano, sendo que nos períodos secos oscila em 10% e nas estações chuvosas pode atingir a 35%.

A utilização de uma camada de brita de 100 a 200 mm sobre a área da malha construída ao tempo, bem como o próprio piso das subestações abrigadas, servem para retardar a evaporação da água do solo, além de oferecer uma elevada resistividade, cerca de $3.000 \Omega \cdot m$, reduzindo os riscos de acidentes fatais durante a ocorrência de falta entre fase e terra.

11.5.2.3 Temperatura

A resistividade do solo e a resistência de um sistema de aterramento são bastante afetadas quando a temperatura cai abaixo de $0^{\circ}C$. Para temperaturas acima deste valor, a resistividade do solo e a resistência de aterramento se reduzem.

As correntes de curto-circuito fase-terra de valor elevado podem ocasionar a ebulição da água do solo em torno do eletrodo, diminuindo a umidade e elevando a temperatura no local, prejudicando, sobremaneira, o desempenho do sistema de aterramento.

11.5.3 Resistividade Aparente do Solo (ρ_a)

A resistência elétrica de um sistema de aterramento depende de dois fatores básicos:

- a resistividade aparente do solo para aquela malha de terra específica;
- a geometria e a forma que foram adotadas no projeto da malha de terra.

Define-se resistividade aparente do solo a resistividade vista por um particular sistema de aterramento. Assim, um solo homogêneo pode apresentar-se com diferentes valores de resistividade vistos por duas malhas de terra distintas. Ou ainda, uma mesma malha de terra pode interagir diferentemente com um solo de mesma resistividade média.

Para que se possa determinar a resistividade aparente dos solos é necessário que se adote uma das técnicas disponíveis de modelagem. O solo é constituído, em geral, por várias camadas horizontais com formação geológica diferente, sendo, por esta razão, modelado em camadas estratificadas, conforme mostra a Figura 11.14.

No entanto, será adotada a modelagem de estratificação do solo em duas camadas, conforme definida na Figura 11.15.

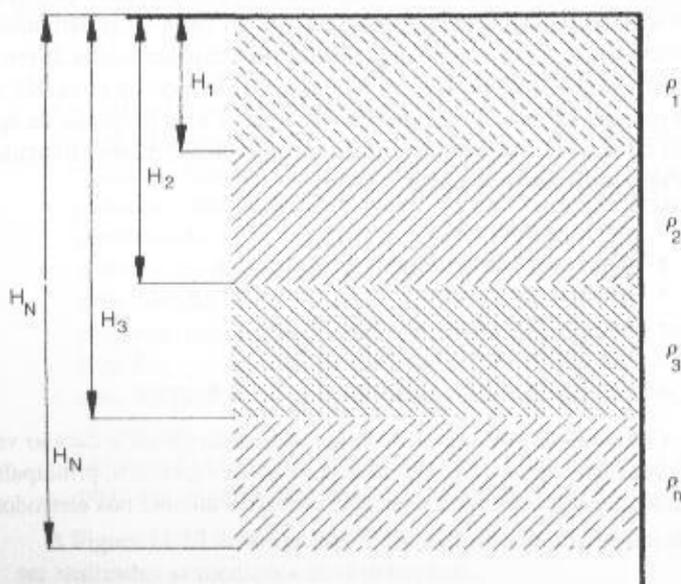
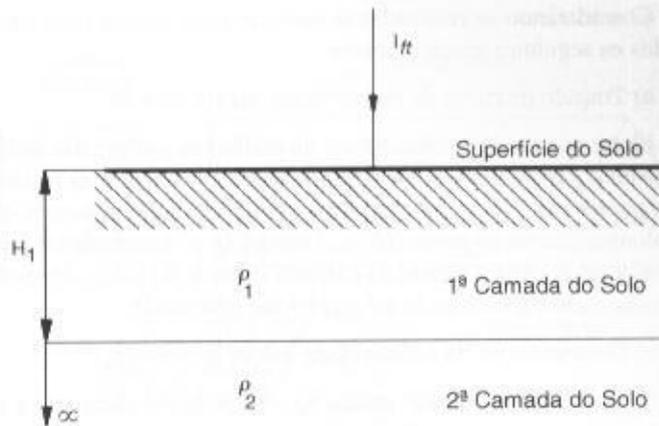


FIGURA 11.14
Solo estratificado em várias camadas

FIGURA 11.15
Solo estratificado em duas camadas



A medição de resistividade do solo deve ser feita após a terraplanagem e depois de decorrido algum tempo para a estabilização físico-química do solo. Porém, a prática indica que em muitos projetos o instalador não segue este princípio, prejudicando os resultados encontrados no cálculo da malha de terra.

O processo de medição da resistividade do solo, segundo a Seção 11.5.1, fornece os elementos necessários para a determinação da resistividade média do mesmo. Neste livro, será utilizado um método bastante simples para a estratificação do solo. Seus resultados são de precisão razoável quando a curva resultante da medição da resistividade do solo apresentar uma formação semelhante a uma das curvas das Figuras 11.16 e 11.17. Isto é, este método somente é aplicável quando o solo puder ser estratificado em duas camadas.

Para estratificação do solo em várias camadas deve-se utilizar outro método, cujo estudo foge ao escopo deste livro. Normalmente são encontradas, neste caso, curvas com a formação semelhante à da Figura 11.18.

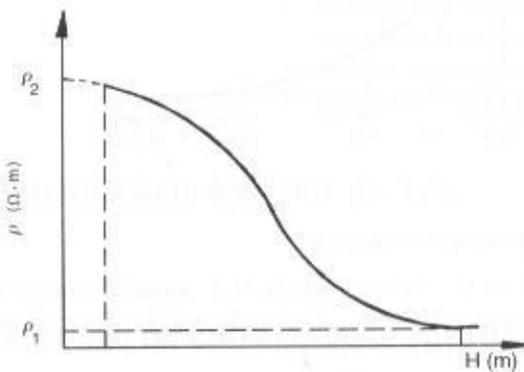


FIGURA 11.16
Solo de duas camadas

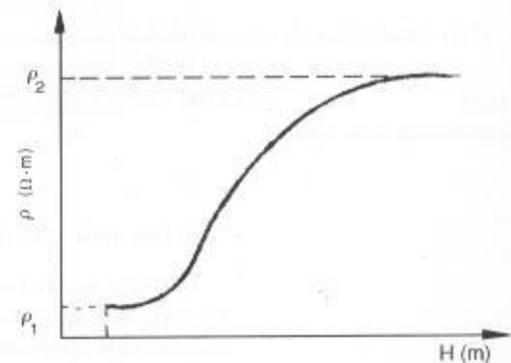


FIGURA 11.17
Solo de duas camadas

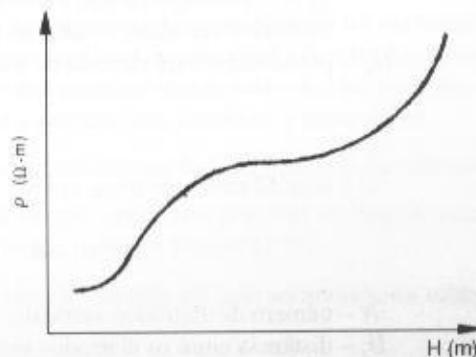


FIGURA 11.18
Solo de várias camadas

Considerando-se realizadas as medições nos pontos indicados na Tabela 11.2, devem ser adotados os seguintes procedimentos:

a) Traçado da curva de resistividade média do solo

Plotar no eixo H (profundidade da malha) os valores das distâncias entre as hastes de medição e no eixo ρ (resistividade do solo) os valores referentes às resistividades médias correspondentes aos pontos medidos para uma mesma distância entre as hastes, conforme a Figura 11.19. Deve-se prolongar a curva no ponto $(H_1; \rho_{m1})$ até o eixo ρ , determinando, assim, o valor ρ_1 . Para se determinar o valor de ρ_2 (resistividade da camada inferior do solo), deve-se traçar uma assíntota à curva de resistividade e prolongá-la até o eixo das ordenadas.

b) Determinação da resistividade média do solo (ρ_m)

O valor da resistividade média do solo pode ser calculado a partir da Equação (11.2).

$$\rho_m = \rho_1 \times K_1 \quad (11.2)$$

O valor de K_1 é obtido através da Tabela 11.3 a partir da relação ρ_2/ρ_1 , cujos valores são definidos no gráfico correspondente à curva de resistividade do solo, equivalente ao gráfico ilustrado na Figura 11.19.

Para se determinar a profundidade a que se encontra a resistividade média, introduzir o valor de ρ_m na curva da Figura 11.19, obtendo-se o valor H_m .

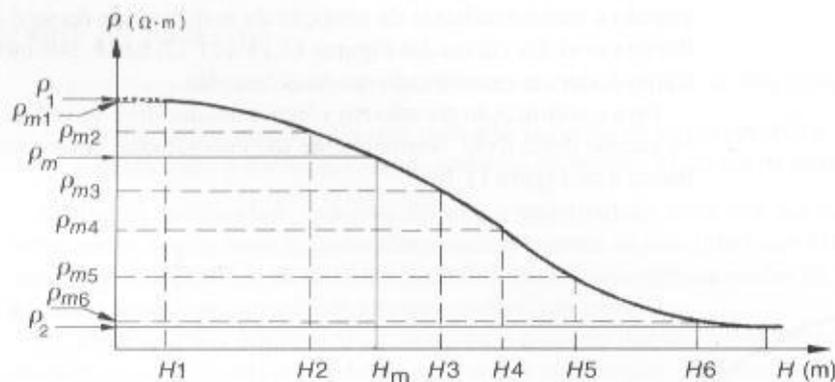


FIGURA 11.19
Curva de resistividade do solo

c) Determinação da resistividade aparente do solo (ρ_a)

Introduz-se na Tabela 11.4 o valor de K_1 , dado na Tabela 11.3, juntamente com o valor de K_2 , dado na Equação (11.3), obtendo-se o valor de K_3 , a partir do qual se determina o valor da resistividade aparente através da Equação (11.4).

$$K_2 = \frac{R}{H_m} \quad (11.3)$$

$$\rho_a = K_3 \times \rho_1 \quad (11.4)$$

R – raio do círculo equivalente à área da malha de terra da subestação, dado pela Equação (11.5), correspondendo a áreas retangulares. Para sistemas de aterramento utilizando-se eletrodos verticais, o valor de R é dado pela Equação (11.6);

H_m – profundidade da camada de solo correspondente à resistividade média.

$$R = \sqrt{\frac{S}{\pi}} \quad (11.5)$$

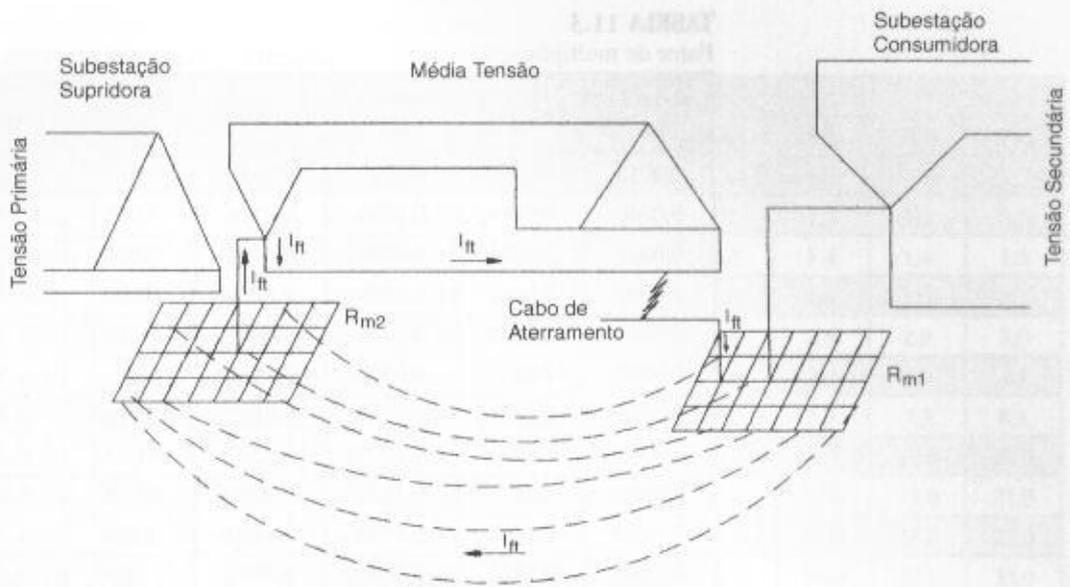
S – área da malha de terra, em m^2 .

$$R = \frac{(N - 1) \times D_e}{2} \quad (11.6)$$

N – número de eletrodos verticais;

D_e – distância entre os eletrodos verticais, em m .

FIGURA 11.20
Percurso da corrente de curto-circuito fase-terra franco no primário



11.6 CÁLCULO DA MALHA DE TERRA

A seguir será estudada a metodologia mais utilizada em subestações de potência. Para malhas de terra dedicadas a pequenas subestações do tipo distribuição, pode-se aplicar o processo demonstrado na Seção 11.7.

O cálculo da malha de terra de uma subestação requer o conhecimento dos seguintes parâmetros:

- resistividade aparente do solo (ρ_a);
- resistividade da camada superior do solo (ρ_1);
- resistividade do material de acabamento da superfície da área da subestação (ρ_s);
- corrente máxima de curto-circuito fase-terra (I_{cp});
- tempo de duração da corrente de curto-circuito fase-terra (T_c).

11.6.1 Resistividade Aparente do Solo

Conforme o disposto na Seção 11.5.3.

11.6.2 Corrente de Curto-circuito Fase-terra

As dimensões do terreno de algumas indústrias, principalmente aquelas localizadas em áreas urbanas, tornam inviável a dissipação das correntes de curto-circuito que é proporcional à área disponível para a construção da malha de terra, o que dificulta o seu cálculo pelo método do IEEE - 80.

A corrente de curto-circuito adotada no cálculo da malha de terra deve ser a de planejamento no horizonte de 10 anos.

O método de cálculo das correntes de curto-circuito foi explanado no Capítulo 5.

Como se sabe, a seção do condutor de uma malha de terra é função da corrente de curto-circuito fase-terra, valor máximo que pode ser obtido tanto do lado primário como do lado secundário da subestação. Será adotada a corrente que conduzir o maior valor.

a) Corrente de curto-circuito tomada do lado primário da subestação

Neste caso, considera-se que o condutor primário de fase faça contato direto com a malha de terra da subestação, conforme mostra a Figura 11.20.

b) Corrente de curto-circuito tomada no lado secundário da subestação para uma impedância desprezível

TABELA 11.3
Fator de multiplicação

Relação ρ_2/ρ_1	Fator K1						
0,0010	0,6839	0,3000	0,8170	6,500	1,331	19,00	1,432
0,0020	0,6844	0,3500	0,8348	7,000	1,340	20,00	1,435
0,0025	0,6847	0,4000	0,8517	7,500	1,349	30,00	1,456
0,0030	0,6850	0,4500	0,8676	8,000	1,356	40,00	1,467
0,0040	0,6855	0,5000	0,8827	8,500	1,363	50,00	1,474
0,0045	0,6858	0,5500	0,8971	9,000	1,369	60,00	1,478
0,0050	0,6861	0,6000	0,9107	9,500	1,375	70,00	1,482
0,0060	0,6866	0,6500	0,9237	10,000	1,380	80,00	1,484
0,0070	0,6871	0,7000	0,9361	10,500	1,385	90,00	1,486
0,0080	0,6877	0,7500	0,9480	1,000	1,390	100,00	1,488
0,0090	0,6882	0,8000	0,9593	11,500	1,394	110,00	1,489
0,0100	0,6887	0,8500	0,9701	12,000	1,398	120,00	1,490
0,0150	0,6914	0,9000	0,9805	12,500	1,401	130,00	1,491
0,0200	0,6940	0,9500	0,9904	13,000	1,404	140,00	1,492
0,0300	0,6993	1,0000	1,0000	13,500	1,408	150,00	1,493
0,0400	0,7044	1,5000	1,0780	14,000	4,410	160,00	1,494
0,0500	0,7095	2,0000	1,1340	14,500	1,413	180,00	1,495
0,0600	0,7145	2,5000	1,1770	15,000	1,416	200,00	1,496
0,0700	0,7195	3,0000	1,2100	15,500	1,418	240,00	1,497
0,0800	0,7243	3,5000	1,2370	16,000	1,421	280,00	1,498
0,0900	0,7292	4,0000	1,2600	16,500	1,423	350,00	1,499
0,1000	0,7339	4,5000	1,2780	17,000	1,425	450,00	1,500
0,1500	0,7567	5,0000	1,2940	17,500	1,427	640,00	1,501
0,2000	0,7781	5,5000	1,3080	18,000	1,429	1.000,00	1,501
0,2500	0,7981	6,0000	1,3200	18,500	1,430		

Neste caso, considera-se que o condutor fase faça contato direto com a massa conectada ao condutor de aterramento nas proximidades da subestação, conforme mostra a Figura 11.21. Uma situação característica pode ocorrer quando uma barra de fase faz contato com a barra de terra do Quadro Geral de Força, instalado no interior da subestação, em que no caminho as correntes de curto-circuito encontram apenas as impedâncias dos condutores metálicos, constituindo-se assim no valor máximo da corrente de curto-circuito que é significativamente superior ao caso anterior. Portanto, para se determinar a seção do condutor, deve-se utilizar o valor da corrente de curto-circuito obtida nessas condições.

c) Corrente de curto-circuito tomada no secundário da subestação para uma impedância considerada

Este caso se caracteriza por um defeito fase-terra em que o condutor faz contato com o solo ou outro elemento aterrado e a corrente é conduzida à malha através do solo, sendo considerável a impedância do percurso (resistência de contato, resistência da malha de terra e resistência do resistor de aterramento se houver), mesmo que se despreze a resistência de contato do condutor, conforme mostrado na Figura 11.22.

O valor dessa corrente deve ser utilizado no cálculo dos parâmetros da malha de terra, tais como tensão de passo, tensão de toque etc.

TABELA 11.4

Determinação da resistividade aparente do solo de 2 camadas

z/H_m	Relação ρ_2/ρ_1												
	0,01	0,05	0,10	0,20	0,50	1	2	5	10	20	50	100	200
	Relação ρ_0/ρ_1												
0,10	1,00	1,01	1,01	1,02	1,05	1,00	1,10	1,15	1,18	1,2	1,2	1,3	1,3
0,20	0,95	0,96	1,00	0,97	0,99	1,00	1,13	1,20	1,25	1,3	1,4	1,4	1,5
0,50	0,80	0,90	0,98	0,95	1,00	1,00	1,20	1,30	1,40	1,6	1,8	2,0	2,3
1,0	0,77	0,83	0,90	0,85	0,90	1,00	1,30	1,50	1,60	2,0	2,5	2,8	3,0
2,0	0,67	0,82	0,86	0,86	0,90	1,00	1,31	1,55	1,60	2,6	3,2	4,0	4,5
5,0	0,56	0,60	0,65	0,68	0,80	1,00	1,32	2,00	2,90	4,0	5,7	7,3	8,8
10	0,48	0,52	0,60	0,60	0,80	1,00	1,35	2,40	3,50	5,3	8,0	11,0	14,0
20	0,41	0,45	0,50	0,53	0,72	1,00	1,40	2,70	4,20	6,8	12,0	15,0	21,0
35	0,36	0,40	0,45	0,50	0,71	1,00	1,40	2,80	4,80	7,8	14,0	18,0	27,0
50	0,32	0,37	0,40	0,48	0,70	1,00	1,50	3,10	5,40	8,5	16,0	23,0	33,0
75	0,29	0,35	0,38	0,46	0,68	1,00	1,50	3,10	5,50	9,0	17,0	26,0	40,0
100	0,27	0,31	0,35	0,42	0,55	1,00	1,50	3,20	5,80	9,8	18,0	39,0	45,0
200	0,22	0,26	0,30	0,38	0,60	1,00	1,60	3,50	6,00	11,0	22,0	35,0	56,0
500	0,18	0,21	0,25	0,35	0,60	1,00	1,70	3,70	6,70	12,0	25,0	42,0	77,0
1000	0,15	0,17	0,22	0,30	0,60	1,00	1,80	4,00	7,00	13,0	37,0	48,0	85,0

11.6.3 Seção Mínima do Condutor

A seção mínima do condutor deve ser determinada em função da corrente de curto-circuito e do seu tempo de duração, para cada tipo de junção dos condutores da malha. A Tabela 11.5 fornece o valor unitário da seção mínima do condutor (K) de cobre em função do tipo de junção. Logo, a seção mínima do condutor da malha será de:

$$S_c = K \times I_{cf} \quad (11.7)$$

Não se recomenda, contudo, utilizar condutores de cobre de seção inferior a 25 mm².

No caso de se utilizar condutor de aço cobreado, tipo Copperweld, a seção do condutor pode ser dada pela Equação (11.8).

$$S_c = \frac{\sqrt{T_f} \times I_{cf}}{2 \times 10^3 \times \beta} \times K \text{ (mm}^2\text{)} \quad (11.8)$$

T_f – tempo de duração da falha, em Hz. Em geral, não inferior a 30 Hz, ou seja, 0,5 s;

K – coeficiente de segurança

$K = 1,10$ a $1,30$

β – coeficiente que expressa o tipo do condutor:

$\beta = 0,91$ – para fios ou cabos com condutividade de 40%;

$\beta = 0,81$ – para fios ou cabos com condutividade de 30%.

TABELA 11.5

Seção mínima do condutor em mm²/A

Tempo (s)	Cabo Simples - Solda Exotérmica (K)	Cabo com Juntas Soldadas (K)	Cabo com Juntas Rebitadas (K)
30	0,020268	0,025335	0,032935
4	0,007093	0,010134	0,012160
1	0,003546	0,005067	0,006080
0,5	0,002533	0,003293	0,004306

A Tabela 11.6 mostra as características típicas dos condutores de aço cobreado que podem ser utilizados como condutor da malha de terra.

Para uma corrente de curto-circuito de 20.000 A, com duração de 0,50 s e um cabo Copperweld de condutividade de 40%, tem-se:

$$S_c = \frac{\sqrt{30} \times 20.000}{2 \times 10^3 \times 0,91} \times 1,30 = 78,24 \text{ mm}^2 \rightarrow S_c = 93,10 \text{ mm}^2 \rightarrow \text{Formação } 7 \times 6$$

(Tabela 11.6)

TABELA 11.6

Características dos condutores de aço cobreado

Formação N × AWG	Diâmetro Nominal (mm)	Seção (mm ²)	Resistência (Ohm/m)		Carga de Ruptura (kg)		Corrente de Fusão	
			40%	30%	40%	30%	40% Cond.	30% Cond.
19 × 5	23,10	318,70	0,1399	0,1865	11.200	13.400	104.000	93.000
19 × 6	20,60	252,70	0,1764	0,2352	889	10.700	83.000	74.000
19 × 7	18,30	200,40	0,2224	0,2966	7.030	8.440	66.000	58.000
19 × 8	16,30	159,00	0,2805	0,3740	5.580	6.710	52.000	46.000
19 × 9	14,50	126,10	0,3537	0,4715	4.430	5.310	41.000	37.000
7 × 4	15,60	148,10	0,3000	0,3999	5.220	6.260	49.000	43.000
7 × 5	13,90	117,40	0,3783	0,5043	4.130	4.940	38.000	34.000
7 × 6	12,30	93,10	0,4770	0,6358	3.270	3.930	31.000	27.000
7 × 7	11,00	73,87	0,6014	0,8018	2.600	3.120	24.000	22.000
7 × 8	9,78	58,56	0,7585	1,0110	2.060	2.470	19.000	17.000
7 × 9	8,71	46,44	0,9564	1,2750	1.630	1.950	15.200	13.500
7 × 10	7,77	36,83	1,2060	1,6080	1.290	1.550	12.000	10.700
3 × 5	9,96	50,32	0,8809	1,1740	1.770	2.120	16.500	14.700
3 × 6	8,86	39,90	1,1110	1,4810	1.400	1.700	13.000	11.600
3 × 7	7,90	31,65	1,4010	1,8670	1.110	1.330	10.600	9.200
3 × 8	7,04	25,10	1,7660	2,3540	880	1.050	8.200	7.300
3 × 9	6,27	19,90	2,2270	2,9690	700	840	6.500	5.800
3 × 10	5,59	15,78	2,8080	3,7430	550	660	5.100	4.600

FIGURA 11.21

Percurso da corrente de curto-circuito fase-terra franco no secundário

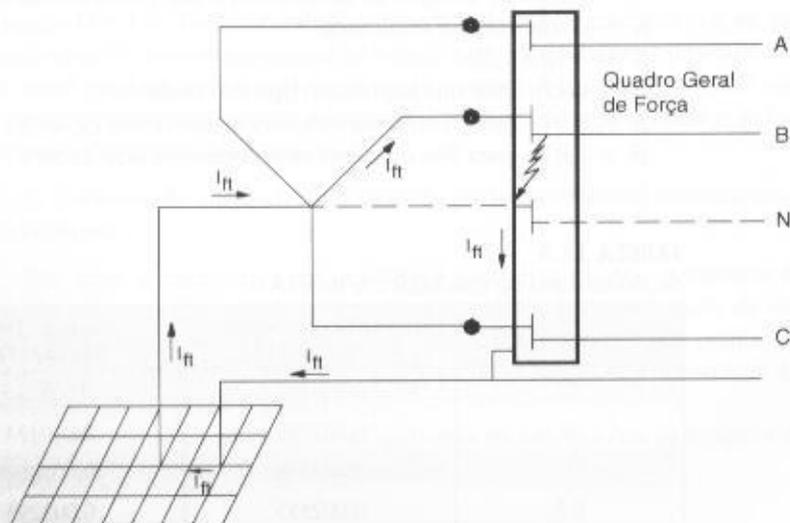
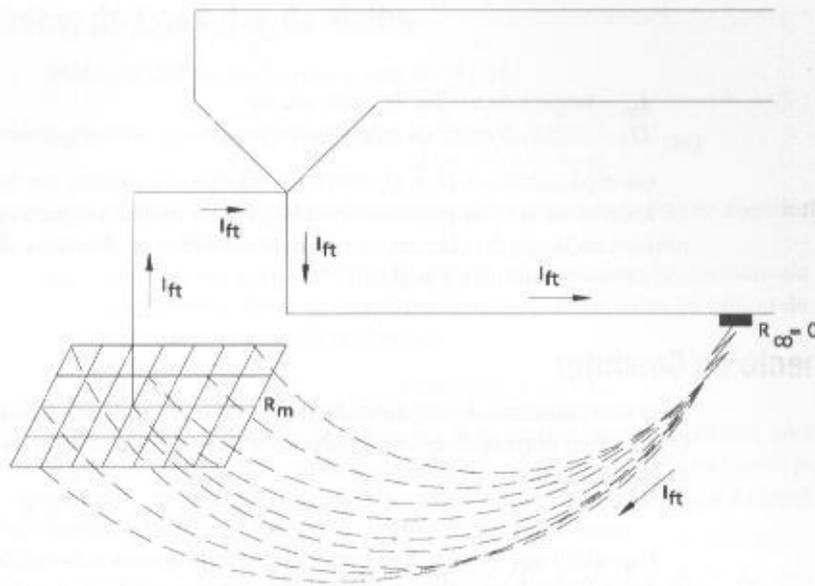


FIGURA 11.22
Percurso da corrente de curto-circuito fase-terra sob impedância no secundário.



Testes realizados em laboratório demonstraram que os condutores Copperweld (fios e cabos) do tipo recozido podem ser aquecidos por correntes de curto-circuito de até 850°C, enquanto os condutores de cobre tornam-se amolecidos a partir de uma temperatura de 450°C.

11.6.4 Número de Condutores Principais e de Junção

Considerando a Figura 11.23, que representa a área de uma subestação industrial com as dimensões indicadas, pode-se calcular o número de condutores principais e de junção adotando-se as Equações (11.9) e (11.10).

a) Condutores principais

São assim denominados aqueles instalados na direção que corresponde ao comprimento da malha de terra. São determinados pela Equação (11.9).

$$N_{cp} = \frac{C_m}{D_l} + 1 \quad (11.9)$$

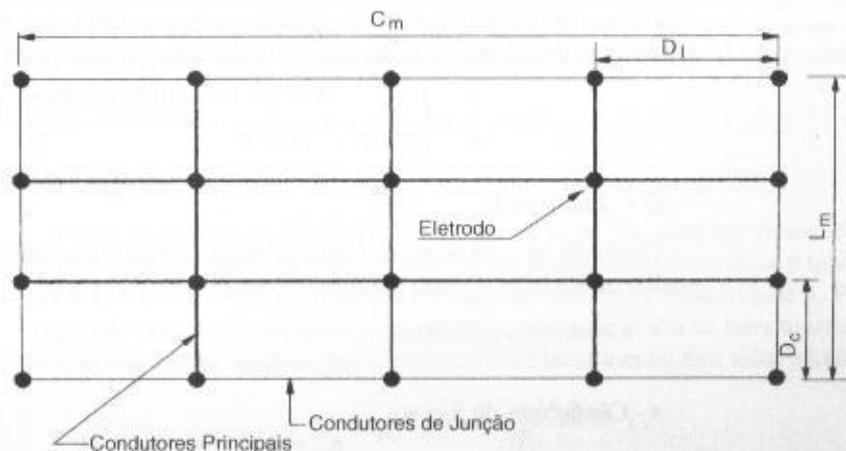
C_m – comprimento da malha de terra, em m;

D_l – distância entre os cabos correspondentes à largura da malha de terra, em m.

b) Condutores de junção

São assim denominados aqueles instalados na direção que corresponde à largura da malha de terra. São determinados pela Equação (11.10).

FIGURA 11.23
Geometria da malha de terra com os respectivos eletrodos verticais



$$N_{cj} = \frac{L_m}{D_c} + 1 \quad (11.10)$$

L_m – largura da malha de terra, em m;

D_c – distância entre os cabos correspondentes ao comprimento da malha de terra, em m.

Os espaçamentos D_i e D_c entre os condutores podem ser tomados inicialmente entre 5% e 10% do valor do comprimento e da largura da malha, respectivamente. Dependendo dos valores obtidos ao longo do cálculo, os mesmos poderão ser alterados, de forma a se obter uma malha de terra mais econômica e segura.

11.6.5 Comprimento do Condutor

O comprimento do condutor da malha de terra pode ser calculado através da Equação (11.11). O fator 1,05 corresponde ao acréscimo de cabo da malha referente aos condutores de ligação entre os equipamentos e esta.

$$L_{cm} = 1,05 \times [(C_m \times N_{cj}) + (L_m \times N_{cp})] \quad (11.11)$$

Fica claro que a equação anterior contempla apenas subestações de áreas retangulares. No caso de áreas irregulares, divide-se a subestação em subáreas e calcula-se a área equivalente correspondente, admitindo-se finalmente $C = L$.

11.6.6 Determinação dos Coeficientes de Ajuste

Para maior simplificação, as expressões que determinam os coeficientes K_m , K_s , K_i são tomadas na sua forma mais aproximada. A aplicação desses coeficientes deve ser feita com base no maior produto entre os valores utilizados, considerando os coeficientes para os condutores principais e de junção.

a) Coeficiente K_m

Chamado de coeficiente de malha, corrige a influência da profundidade da malha de terra (H), do número de condutores (principais e de junção) e do espaçamento entre os referidos condutores.

Devem ser determinados dois valores correspondentes aos condutores principais (K_{mp}) e aos condutores de junção (K_{mj}). Esses valores são obtidos para os dois casos pela Equação (11.12).

$$K_m = \frac{1}{2 \times \pi} \times \ln \left[\frac{D^2}{4 \times \pi \times (N - 1) \times H \times D_{co}} \right] \quad (11.12)$$

\ln – logaritmo neperiano;

D – espaçamento médio entre os condutores, na direção considerada, em m;

H – profundidade da malha, em m;

N – número de condutores na direção considerada;

D_{co} – diâmetro do condutor, em m.

b) Coeficiente K_s

Chamado de coeficiente de superfície, corrige a influência da profundidade da malha de terra (H), do diâmetro do condutor (D_{co}) e do espaçamento entre os mesmos.

Devem ser determinados dois valores correspondentes aos condutores principais (K_{sp}) e aos condutores de junção (K_{sj}). São determinados para os dois casos pela Equação (11.13).

$$K_s = \frac{1}{\pi} \times \left\{ \frac{1}{2 \times H} + \frac{1}{D + H} + \frac{\ln[0,655 \times (N - 1) - 0,328]}{D} \right\} \quad (11.13)$$

c) Coeficiente K_i

Chamado de coeficiente de irregularidade, corrige a não uniformidade do fluxo da corrente da malha para a terra. É dado pelas Equações (11.14) e (11.15).

- Condutores principais

$$K_{sp} = 0,65 + 0,172 \times N_{cp} \quad (11.14)$$

- Condutores de junção

$$K_{sj} = 0,65 + 0,172 \times N_{cj} \quad (11.15)$$

11.6.7 Comprimento Mínimo do Condutor da Malha

Pode ser determinado pela Equação (11.16).

$$L_c = \frac{K_m \times K_i \times \rho_s \times I_{cft} \times \sqrt{T_f}}{116 + 0,174 \times \rho_s} \text{ (m)} \quad (11.16)$$

ρ_s – resistividade da camada superior da malha, normalmente constituída de brita, cujo valor é de $3.000 \Omega \cdot \text{m}$;

I_{cft} – corrente de curto-circuito fase-terra não envolvendo diretamente qualquer condutor de aterramento. Deve-se considerar o maior produto entre os valores de $K_m \times K_i$, anteriormente calculados, numa dada direção.

$$\text{Condição: } L_{cm} \geq L_c \quad (11.17)$$

Caso não se verifique esta condição, deve-se recommençar o cálculo, adotando-se novos valores de seção dos condutores, espaçamento, profundidade da malha ou outros parâmetros que resultem diminuir L_c . Na prática, quando é pequena a diferença entre L_{cm} e L_c , pode-se acrescentar a L_{cm} o comprimento total das hastes a serem utilizadas, ou seja:

$$L_{cm} = 1,05 \times [(C_m \times N_v) + (L_m \times N_{cp})] + (N_h \times L_h) \text{ (m)} \quad (11.18)$$

N_h – número de eletrodos verticais;

L_h – comprimento de um eletrodo vertical, em m.

11.6.8 Tensão de Passo

Como já referido na Seção 11.2.2, é o maior valor que pode ser alcançado no nível da malha de terra, considerando que o tempo máximo de permanência da corrente é igual a T_f ($T_f \leq 0,50 \text{ s}$) e que está coberta por material (normalmente brita) de resistividade ρ_s . Para estas condições, o operador estaria em segurança caminhando no interior da malha de terra. Seu valor máximo vale:

$$E_{pa} = \frac{116 + 0,7 \times \rho_s}{\sqrt{T_f}} \text{ (V)} \quad (11.19)$$

11.6.9 Tensão de Passo Existente na Periferia da Malha

Corresponde à diferença de potencial existente entre dois pontos distanciados de 1 m e localizados na periferia da malha de terra. Seu valor é dado pela Equação (11.20).

$$E_{per} = \frac{K_s \times K_j \times \rho_s \times I_{cft}}{L_{cm}} \text{ (V)} \quad (11.20)$$

$$\text{Condição: } E_{pa} \geq E_{per} \quad (11.21)$$

Deve-se ressaltar que é de 25 m, em geral, a distância entre qualquer elemento condutivo da malha de terra e o terra de referência, caracterizado como sendo uma parte do solo nas proximidades do elemento condutivo da malha de terra, de modo que não ocorram diferenças de potencial significativas entre os dois pontos quaisquer na superfície. O valor referido é característico de pequenas malhas de terra.

11.6.10 Tensão Máxima de Toque

Como já referido na Seção 11.2.1, é o maior valor que pode ser alcançado no nível da malha de terra, considerando que o tempo máximo de permanência da corrente é igual a T_f ($T_f \leq 0,50 \text{ s}$) e que o solo está coberto por material (normalmente brita) de resistividade ρ_s . Para estas condições, o operador estaria em segurança em qualquer ponto da malha de terra tocando com o corpo uma massa (carcaça de equipamento) energizada acidentalmente. Seu valor máximo vale:

$$E_{tm} = \frac{116 + 0,174 \times \rho_s}{\sqrt{T_f}} \text{ (V)} \quad (11.22)$$

11.6.11 Tensão de Toque Existente

$$E_{te} = \frac{K_m \times K_i \times \rho_l \times I_{cfr}}{L_{cm}} \quad (\text{V}) \quad (11.23)$$

$$\text{Condição: } E_{m} \geq E_{te} \quad (11.24)$$

11.6.12 Corrente Máxima de Choque

É o maior valor de corrente suportável pelo corpo humano para um tempo de permanência de contato de T_f .

$$I_{ch} = \frac{116}{\sqrt{T_f}} \quad (\text{mA}) \quad (11.25)$$

11.6.13 Corrente de Choque Existente Devido à Tensão de Passo sem Brita na Periferia da Malha

$$I_{pmcb} = \frac{1.000 \times E_{per}}{1.000 + 6 \times \rho_l} \quad (\text{mA}) \quad (11.26)$$

$$\text{Condição: } I_{pmcb} \leq I_{ch} \quad (11.27)$$

11.6.14 Corrente de Choque Existente na Periferia da Malha Devido à Tensão de Passo, com Camada de Brita

$$I_{pmcb} = \frac{1.000 \times E_{per}}{1.000 + 6 \times (\rho_l + \rho_b)} \quad (\text{mA}) \quad (11.28)$$

$$\text{Condição: } I_{pmcb} \leq I_{ch} \quad (11.29)$$

11.6.15 Corrente de Choque Devido à Tensão de Toque Existente, sem Brita

$$I_{msb} = \frac{1.000 \times E_{te}}{1.000 + 1,5 \times \rho_l} \quad (\text{mA}) \quad (11.30)$$

$$\text{Condição: } I_{msb} \leq I_{ch} \quad (11.31)$$

11.6.16 Corrente de Choque Devido à Tensão de Toque Existente, com Brita

$$I_{msb} = \frac{1.000 \times E_{te}}{1.000 + 1,5 + (\rho_l + \rho_b)} \quad (\text{mA}) \quad (11.32)$$

$$\text{Condição: } I_{msb} \leq I_{ch} \quad (11.33)$$

11.6.17 Corrente Mínima de Acionamento do Relé de Terra

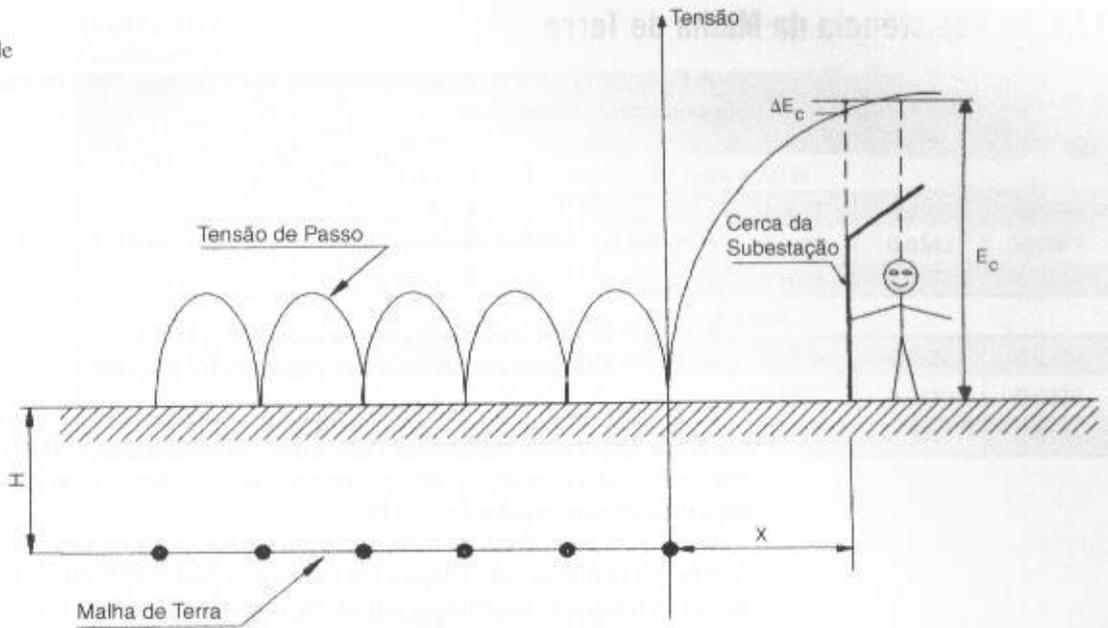
$$I_a = \frac{(R_{ch} + 1,5 \times \rho_l) \times 9 \times L_{cm}}{1.000 \times K_m \times K_i \times \rho_l} \quad (\text{A}) \quad (11.34)$$

R_{ch} – resistência do corpo humano, em Ω .

11.6.18 Potenciais da Região Externa à Malha

Observando-se a Figura 11.24, podem-se analisar as condições a que ficaria submetida uma pessoa ali posicionada tocando a cerca.

FIGURA 11.24
Potenciais externos à malha de terra



- 1.ª condição: cerca interligada à malha de terra

Neste caso, o indivíduo estaria submetido à tensão E_c .

- 2.ª condição: cerca sem interligação à malha de terra

Nesta condição, o indivíduo estaria submetido apenas à diferença de potencial ΔE_c .

É importante frisar que se faz necessário seccionar e aterrar a cerca nos pontos extremos deste seccionamento para facilitar a atuação da proteção quando da queda de um condutor energizado sobre ela. Isto, porém, não dá segurança ao indivíduo que a toque no momento do defeito.

Considerando-se a segunda condição anteriormente mencionada, pode-se determinar a necessidade ou não de interligação de uma cerca à malha de terra, ou seja:

$$\Delta E_c = [K_{c(x)} - K_{c(x-1)}] \times \frac{P_t \times I_{df}}{L_c} \text{ (V)} \quad (11.35)$$

$$K_{c(x)} = \frac{1}{2 \times \pi} \times \ln \left\{ \frac{(H^2 + X^2) \times [H^2 + (D + X)^2]}{H \times D_{av} \times (H^2 + D^2)} \right\} + \frac{1}{\pi} \times \ln \left[\left(\frac{2 \times D + X}{2 \times D} \right) \times \left(\frac{3 \times D + X}{3 \times D} \right) \times \left(\frac{4 \times D + X}{4 \times D} \right) \times \dots \times \left(\frac{(N - 1) \times D + X}{(N - 1) \times D} \right) \right] \quad (11.36)$$

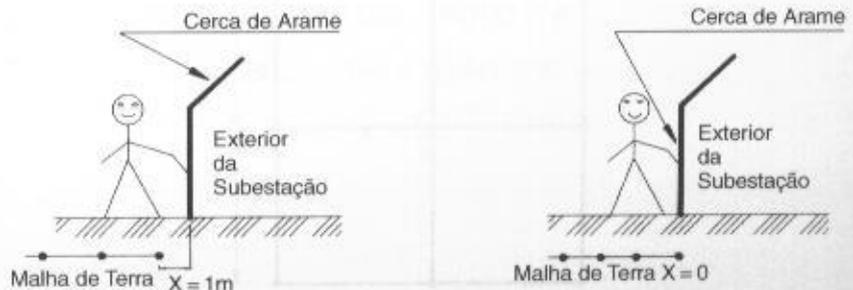
X – distância da periferia da malha de terra a um ponto considerado; no caso, a cerca tocada pelo indivíduo;

D – distância entre os eletrodos horizontais, na direção considerada.

A Figura 11.25 mostra as referências para os valores de X . Logo, deve-se ter:

$$\Delta E_c \leq E_{tr}$$

FIGURA 11.25
Ilustração da condição dos potenciais de cerca



11.6.19 Resistência da Malha de Terra

A Equação (11.37) representa somente o valor da resistência da malha de terra correspondente aos condutores horizontais.

$$R_{mc} = \frac{\rho_b}{4 \times R} + \frac{\rho_b}{L_{cm}} \quad (\Omega) \quad (11.37)$$

R – raio do círculo equivalente à área destinada à malha de terra, em m.

Condições:

- $R_{mc} \leq 10 \Omega$ (para subestações da classe 15 a 38 kV)
- $R_{mc} \leq 5 \Omega$ (para subestações da classe 69 kV e acima)

Se o valor de R_{mc} não atender às condições anteriores, deve-se recalculá-la a malha de terra, alterando-se o comprimento dos condutores, dimensões da malha etc., de modo a manter R_{mc} dentro dos valores estabelecidos. Observar que este cálculo pode facilmente ser convertido num programa de computador do tipo PC.

O valor da resistência da malha de terra é uma forma de saber se o valor encontrado é satisfatório. Na realidade, não chega a ser necessário conhecer o valor exato da resistência do aterramento. A legislação americana, por exemplo, estabelece que a resistência da malha de terra não deve superar 25Ω .

Para malhas de terra de pequenas dimensões geométricas, o valor de R_{mc} freqüentemente ultrapassa os valores mínimos para resistividade aparente de solo elevada. Neste caso, é necessário calcular a influência dos eletrodos verticais na resistência final da malha de terra como se segue.

11.6.20 Resistência de Aterramento de um Eletrodo Vertical

$$R_{et} = \frac{\rho_b}{2 \times \pi \times L_h} \times \ln \left(\frac{400 \times L_h}{2,54 \times D_h} \right) \quad (\Omega) \quad (11.38)$$

L_h – comprimento cravado da haste de terra, em m;

D_h – diâmetro equivalente da haste de terra, em polegada.

11.6.21 Coeficiente de Redução da Resistência de um Eletrodo Vertical

Esse coeficiente reduz a resistência de uma haste de terra quando fincada numa malha de terra em formato de um quadrado cheio, conforme a Figura 11.26.

$$K_h = 1 + \frac{A \times B}{N_h} \quad (11.39)$$

N_h – número de hastes de terra;

A – determinado segundo a Tabela 11.7 em função do comprimento e diâmetro dos eletrodos e do espaçamento entre estes;

B – determinado de acordo com a Tabela 11.8, em função do número de eletrodos verticais utilizados.

FIGURA 11.26
Malha de terra tipo quadrado
cheio

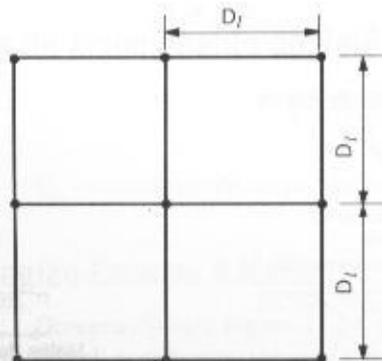


TABELA 11.7
Coeficiente A

Diâmetro do Eletrodo	Distância entre Eletrodos (m)					
	2	3	4	5	9	12
Para eletrodo de comprimento igual a 3,0 m						
1/2"	0,2292	0,1528	0,1149	0,0917	0,0509	0,0382
3/4"	0,2443	0,1629	0,1222	0,0977	0,0543	0,0407
1"	0,2563	0,1709	0,1282	0,1025	0,0570	0,0427
Para eletrodo de comprimento igual a 2,40 m						
1/2"	0,1898	0,1266	0,0949	0,0759	0,0422	0,0316
3/4"	0,2028	0,1352	0,1014	0,0811	0,0450	0,0338
1"	0,2132	0,1421	0,1066	0,0853	0,0474	0,0355

TABELA 11.8
Coeficiente B

Número de Eletrodos	B
4	2,7071
9	5,8917
16	8,5545
25	11,4371
36	14,0650
49	16,8933

11.6.22 Resistência de Aterramento do Conjunto de Eletrodos Verticais

Representa o valor da resistência resultante de todas as hastes de terra interligadas em paralelo.

$$R_{ne} = K_h \times R_{et} (\Omega) \quad (11.40)$$

11.6.23 Resistência Mútua dos Cabos e Eletrodos Verticais

$$R_{mu} = \frac{\rho_n}{\pi \times L_{cm}} \times \left[\ln \left(\frac{2 \times L_{cm}}{L_m} \right) + \frac{K_1 \times L_{cm}}{\sqrt{S}} - K_2 + 1 \right] \quad (11.41)$$

S – área da malha, em m^2 ;

L_{th} – comprimento total das hastes utilizadas, em m.

$$L_{th} = N_n \times L_n \quad (11.42)$$

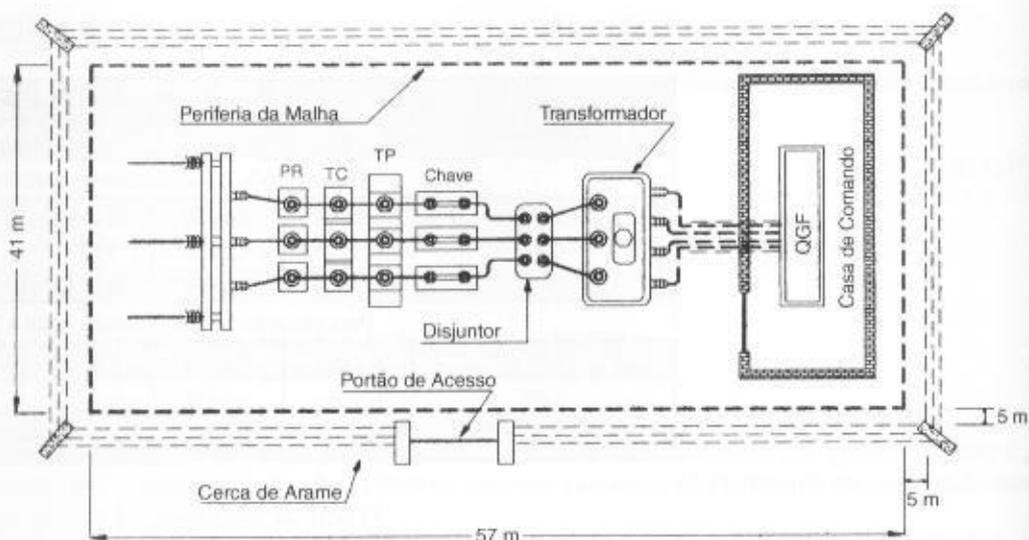
L_n – comprimento de uma haste, em m, isto é:

$$K_{1red} = 1,14125 - 0,0425 \times K \quad (11.43)$$

$$K_{2red} = 5,49 - 0,1443 \times K \quad (11.44)$$

$$K = \frac{C_m}{L_m} \quad (11.45)$$

FIGURA 11.27
Detalhes da vista superior da subestação



11.6.24 Resistência Total da Malha

É o valor que representa as resistências combinadas das hastes de terra e dos condutores de interligação. É dado pela Equação (11.46).

$$R_{m} = \frac{R_{mc} \times R_{ne} - R_{mc}^2}{R_{mc} + R_{ne} - 2 \times R_{mc}} \tag{11.46}$$

EXEMPLO DE APLICAÇÃO (11.1)

Considerar a área da subestação 5.000 kVA, classe 15 kV, de uma grande indústria do Ceará dada na Figura 11.27 e os valores de medição de resistividade do solo, conforme a Tabela 11.9. A corrente de curto-circuito fase-terra máxima é de 55.000 A. A corrente de curto-circuito fase-terra mínima é de 871 A. A superfície da subestação será coberta por uma camada de brita de 15 cm.

Observar que todas as resistividades medidas não apresentam desvios em relação à média superiores a 50%, como exemplo:

$$\left| \frac{603,21 - 470}{470} \times 100 \right| = 28,3\% < 50\%$$

$$\left| \frac{345,90 - 467}{467} \times 100 \right| = 25,9\% < 50\%$$

a) Resistividade aparente do solo

- Curva das resistividades médias, conforme a Figura 11.28
- Resistividade média do solo (ρ_m)

TABELA 11.9
Resistividade média do solo $\Omega \cdot m$

Distância m	Subestação da Indústria Kelvin - Fortaleza					Resistividade Média ($\Omega \cdot m$)
	Resistividade Medida					
	A	B	C	D	E	
2	603,21	567,20	450,20	410,00	320,50	470
4	562,23	526,10	476,11	425,04	345,90	467
8	538,23	496,10	446,11	425,04	345,90	450
16	516,19	437,58	394,58	362,98	334,41	409
32	468,89	415,58	374,58	372,98	354,41	397

A partir do valor da média das resistividades $\rho_m = 470 \Omega \cdot m$ (obtida na Tabela 11.9 na distância de 2 m) prolonga-se a curva da Figura 11.28, obtendo-se no eixo das ordenadas o valor de $\rho_1 = 472 \Omega \cdot m$. Por outro lado, traçando-se uma assíntota à mesma curva, obtém-se o valor de $\rho_2 = 395 \Omega \cdot m$. Logo, a relação ρ_2/ρ_1 vale:

$$\frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{395}{472} = 0,81$$

Com o valor de $\rho_2/\rho_1 = 0,81$ obtém-se a relação $K_1 = 0,9593$ na Tabela 11.3. Logo, o valor da resistividade média em conformidade com a Equação (11.2) vale:

$$\rho_m = K_1 \times \rho_1 = 0,9593 \times 472 = 452 \Omega \cdot m$$

• Profundidade da camada do solo corresponde à resistividade média ρ_m

De acordo com a Equação (11.5), tem-se:

$$R = \sqrt{\frac{S}{\pi}} = \sqrt{\frac{2.337}{\pi}} = 27,27 \text{ m}$$

$$S = 57 \times 41 = 2.337 \text{ m}$$

• Resistividade aparente

Da Equação (11.3), tem-se:

$$K_2 = \frac{R}{H_m} = \frac{27,27}{7,8} = 3,49$$

O valor de H_m é obtido a partir da curva da Figura 11.28, em função de $\rho_m = 452 \Omega \cdot m$, ou seja:

$$\rho_m = 452 \Omega \cdot m \rightarrow H_m = 7,8 \text{ m}$$

Com o valor de $K_2 = 3,49$ m e de $\rho_2/\rho_1 = 0,81$, obtém-se através da Tabela 11.4 os valores para interpolação a fim de determinar ρ_m/ρ_1 , ou seja:

$$\frac{1 - 0,5}{1 - 0,9} = \frac{1 - 0,81}{1 - X_1} \rightarrow \frac{0,5}{0,1} = \frac{0,19}{1 - X_1} \rightarrow 0,481 = 0,5 X_1 \rightarrow X_1 = 0,962$$

$$\frac{1 - 0,5}{1 - 0,8} = \frac{1 - 0,81}{1 - X_2} \rightarrow \frac{0,5}{0,2} = \frac{0,19}{1 - X_2} \rightarrow 0,462 = 0,5 X_2 \rightarrow X_2 = 0,924$$

$$\frac{5 - 2}{0,924 - 0,962} = \frac{5 - 3,49}{0,924 - K_3} \rightarrow \frac{3}{-0,03} = \frac{1,51}{0,924 - K_3} \rightarrow 2,8293 = 3 \times K_3 \rightarrow K_3 = 0,943 \Omega \cdot m,$$

$$\rho_m = K_3 \times \rho_1 = 0,943 \times 472 = 445 \Omega \cdot m$$

b) Seção mínima do condutor

Será considerado que o condutor fase conectou-se acidentalmente com o condutor de aterramento, caracterizando um defeito fase-terra na condição mais severa, ou seja, máxima corrente de curto-circuito que atravessa a malha de terra.

Para $T_f = 0,5$ s, pode-se obter diretamente da Tabela 11.5 o valor da seção do condutor de cobre em mm^2/A , considerando-se que a conexão entre os eletrodos de terra seja em solda exotérmica e a corrente de curto-circuito fase-terra seja de 55.000 A, em baixa tensão.

$$S_c = K \times I_{cp} \rightarrow S_c = 0,002533 \times I_{cp}$$

$$S_c = 0,002533 \times 55.000 = 139,3 \text{ mm}^2$$

$$S_c = 150 \text{ mm}^2 \text{ (seção adotada)}$$

c) Número de condutores principais e de junção

Como primeira tentativa será considerado arbitrariamente um espaçamento entre os condutores principais de 3,35 m e de 3,40 m (veja Figura 11.29) para os condutores de junção, ou seja:

$$D_c = 3,40 \text{ m (8,29\% de } L_m \text{ - valor considerado inicialmente)}$$

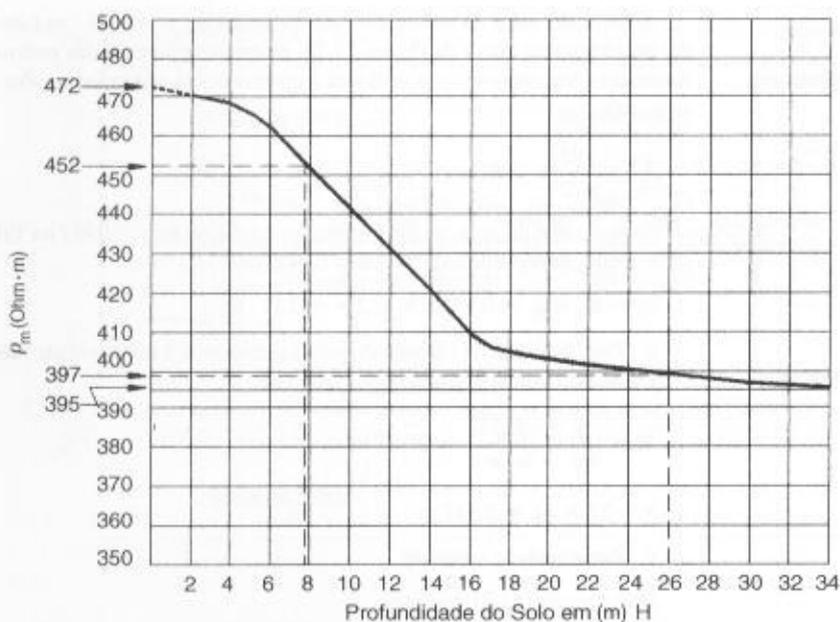
$$D_j = 3,35 \text{ m (5,87\% de } C_m \text{ - valor considerado inicialmente)}$$

• Condutores principais

Da Equação (11.9), tem-se:

$$N_{cp} = \frac{C_m}{D_c} + 1 = \frac{57}{3,35} + 1 = 18 \text{ condutores}$$

FIGURA 11.28
Curva de resistividade do solo



- Condutores de junção

Da Equação (11.10), tem-se:

$$N_j = \frac{L_m}{D_c} + 1 = \frac{41}{3,40} + 1 = 13 \text{ condutores}$$

- d) Comprimento dos condutores da malha de terra

Da Equação (11.11), tem-se:

$$L_{cm} = 1,05 \times [(C_w \times N_j) + (L_m \times N_{cp})]$$

$$L_{cm} = 1,05 \times [57 \times 13] + (41 \times 18) = 1.552,9 \text{ m}$$

- e) Coeficientes de ajuste

- Coeficiente K_w para os condutores principais

Da Equação (11.12), tem-se:

$$K_w = \frac{1}{2 \times \pi} \times \ln \left(\frac{D^2}{4 \times \pi \times (N - 1) \times H \times D_{co}} \right)$$

$H = 0,5 \text{ m}$ (profundidade considerada da malha de terra)

$$K_w = \frac{1}{2 \times \pi} \times \ln \left(\frac{3,35^2}{4 \times \pi \times (18 - 1) \times 0,5 \times 0,01433} \right) = 0,317$$

$D_{co} = 14,33 \text{ mm} = 0,01433 \text{ m}$ (Tabela 3.47)

- Coeficiente K_n para os condutores de junção

Da Equação (11.12), tem-se:

$$K_n = \frac{1}{2 \times \pi} \times \ln \left[\frac{3,40^2}{4 \times \pi \times (13 - 1) \times 0,5 \times 0,01433} \right] = 0,377$$

- f) Coeficiente de ajuste K_s

- Coeficiente K_s para os condutores principais

Da Equação (11.13), tem-se:

$$K_s = \frac{1}{\pi} \times \left\{ \frac{1}{2 \times H} + \frac{1}{D + H} + \frac{\ln[0,655 \times (N - 1) - 0,328]}{D} \right\}$$

$$K_{sp} = \frac{1}{\pi} \times \left[\frac{1}{2 \times 0,5} + \frac{1}{3,35 + 0,5} + \frac{\ln[0,665 \times (18 - 1) - 0,328]}{3,35^2} \right] = 0,469$$

- Coeficiente K_j para os condutores de junção

Da Equação (11.13), tem-se:

$$K_{sj} = \frac{1}{\pi} \times \left[\frac{1}{2 \times 0,5} + \frac{1}{3,40 + 0,5} + \frac{\ln[0,665 \times (13 - 1) - 0,328]}{3,40^2} \right] = 0,456$$

g) Coeficiente de ajuste K_i

- Coeficiente K_i para os condutores principais

Das Equações (11.14) e (11.15), tem-se:

$$K_{ip} = 0,65 + 0,172 \times N_{cp} = 0,65 + 0,172 \times 18 = 3,746$$

Coeficiente K_j para os condutores de junção

$$K_{sj} = 0,65 + 0,172 \times N_{cj} = 0,65 + 0,172 \times 13 = 2,886$$

h) Comprimento mínimo do condutor da malha

Da Equação (11.16), tem-se:

$$L_c = \frac{0,317 \times 3,746 \times 448 \times 871 \times \sqrt{0,5}}{0,116 + 0,174 \times 3,000} = 627 \text{ m}$$

$$\rho_s = 3.000 \Omega \text{ (camada superficial de brita de 15 cm)}$$

Adotar o maior produto $K_m \times K_i$ para uma direção considerada, ou seja, $K_{sp} \times K_{ip}$.

$$L_{cm} > L_c \text{ (condição satisfeita).}$$

Observar que inicialmente a quantidade mínima de condutores é muito inferior ao valor adotado. É economicamente viável a redução da quantidade de condutores se os demais parâmetros a serem analisados alcançarem valores que permitam uma redefinição da geometria da malha de terra.

i) Tensão máxima de passo

Da Equação (11.19), tem-se:

$$E_{ps} = \frac{116 + 0,7 \times \rho_s}{\sqrt{I_f}} = \frac{116 + 0,7 \times 3.000}{\sqrt{0,5}} = 3.133 \text{ V}$$

j) Tensão de passo existente na periferia da malha

Da Equação (11.20), tem-se:

$$E_{psr} = \frac{K_j \times K_i \times \rho_s \times I_{cp}}{L_{cm}} = \frac{0,469 \times 3,746 \times 472 \times 871}{1.552,9} = 465,1 \text{ V}$$

$$E_{ps} > E_{psr} \text{ (condição satisfeita).}$$

Adotar o maior produto $K_r \times K_i$ para uma direção considerada, ou seja, $K_{sp} \times K_{ip}$.

k) Tensão máxima de toque

Da Equação (11.22), tem-se:

$$E_{tm} = \frac{116 + 0,174 \times \rho_s}{\sqrt{I_f}} = \frac{116 + 0,174 \times 3.000}{\sqrt{0,5}} = 902,2 \text{ V}$$

l) Tensão de toque existente

Da Equação (11.23), tem-se:

$$E_{te} = \frac{K_m \times K_i \times \rho_s \times I_{cp}}{L_{cm}} = \frac{0,317 \times 3,746 \times 472 \times 871}{1.552,9} = 314,3 \text{ V}$$

$$E_{tm} > E_{te} \text{ (condição satisfeita).}$$

m) Corrente máxima de choque

Da Equação (11.25), tem-se:

$$I_{ch} = \frac{116}{\sqrt{I_f}} = \frac{116}{\sqrt{0,5}} = 164 \text{ mA}$$

n) Corrente de choque existente devido à tensão de passo sem brita na periferia da malha

Da Equação (11.26), tem-se:

$$I_{pmob} = \frac{1.000 \times E_{per}}{1.000 + 6 \times \rho_t} = \frac{1.000 \times 465,1}{1.000 + 6 \times 472} = 121,3 \text{ mA}$$

$$I_{pmob} < I_{ch} \text{ (condição satisfeita).}$$

o) Corrente de choque existente na periferia da malha devido à tensão de passo, com camada de brita

Da Equação (11.28), tem-se:

$$I_{pmob} = \frac{1.000 \times E_{per}}{1.000 + 6 \times (\rho_t + \rho_r)} = \frac{1.000 \times 465,1}{1.000 + 6 \times (472 + 3.000)} = 21,3 \text{ mA}$$

$$I_{pmob} < I_{ch} \text{ (condição satisfeita).}$$

p) Corrente de choque devido à tensão de toque existente, sem brita

Da Equação (11.30), tem-se:

$$I_{mob} = \frac{1.000 \times E_{te}}{1.000 + 1,5 \times \rho_t} = \frac{1.000 \times 314,3}{1.000 + 1,5 \times 472} = 184,0 \text{ mA}$$

$$I_{mob} > I_{ch} \text{ (condição não satisfeita: a utilização da brita é portanto, fundamental).}$$

q) Corrente de choque devido à tensão de toque existente, com brita

Da Equação (11.32), tem-se:

$$I_{mob} = \frac{1.000 \times E_{te}}{1.000 + 1,5 \times (\rho_t + \rho_r)} = \frac{1.000 \times 314,3}{1.000 + 1,5 \times (472 + 3.000)} = 50,62 \text{ mA}$$

$$I_{mob} < I_{ch} \text{ (condição satisfeita).}$$

r) Corrente mínima de acionamento do relé de terra

Da Equação (11.34), tem-se:

$$I_a = \frac{(R_{ch} + 1,5 \times \rho_t) \times 9 \times L_{cm}}{1.000 \times K_m \times K_t \times \rho_t} = \frac{(1.000 + 1,5 \times 3.000) \times 9 \times 1.552,9}{1.000 \times 0,317 \times 3,746 \times 472} = 137,1 \text{ A}$$

$$R_{ch} = 1.000 \text{ } \Omega \text{ (resistência considerada do corpo humano)}$$

s) Potenciais da região externa à malha

Da Equação (11.35), tem-se:

$$\Delta E_v = [K_{e(x)} - K_{e(x-1)}] \frac{\rho_t \times I_{cf}}{L_e}$$

Como a cerca está afastada da periferia da malha de terra, então será calculado o valor K para $X = 5 \text{ m}$ e para $X = (5 - 1) \text{ m}$ (veja a Figura 11.27), relativamente aos condutores principais, por ser esta a condição mais desfavorável. Da Equação (11.36), tem-se:

• Para $X = 5$, ou seja, $K_{e(5)}$

$$K_{e(5)} = \frac{1}{2 \times \pi} \times \ln \left[\frac{(H^2 + X^2) \times [H^2 + (D + X)^2]}{H \times D_{ca} \times (H^2 + D^2)} \right] + \frac{1}{\pi} \times \ln \left[\frac{2 \times D + X}{2 \times D} \times \frac{3 \times D + X}{3 \times D} \times \frac{3 \times D + X}{3 \times D} \times \frac{4 \times D + X}{4 \times D} \times \dots \times \frac{(N-1) \times D + X}{(N-1) \times D} \right]$$

$$K_{e(5)} = \frac{1}{2 \times \pi} \times \ln \left[\frac{(0,5^2 + 5^2) \times [0,5^2 + (3,35 + 5)^2]}{0,5 \times 0,01433 \times (0,5 + 3,35)} \right] + \frac{1}{\pi} \times \ln \left[\frac{2 \times 3,35 + 5}{2 \times 3,35} \times \frac{3 \times 3,35 + 5}{3 \times 3,35} \times \frac{4 \times 3,35 + 5}{4 \times 3,35} \times \frac{5 \times 3,35 + 5}{5 \times 3,35} \times \frac{6 \times 3,35 + 5}{6 \times 3,35} \times \frac{7 \times 3,35 + 5}{7 \times 3,35} \times \frac{8 \times 3,35 + 5}{8 \times 3,35} \right]$$

$$\times \frac{9 \times 3,35 + 5}{9 \times 3,35} \times \frac{10 \times 3,35 + 5}{10 \times 3,35} \times \dots \times \frac{17 \times 3,35 + 5}{17 \times 3,35} \Bigg]$$

$$K_{(15)} = \frac{1}{2 \times \pi} \times 111,06 + \frac{1}{\pi} \times \ln(23,1) = 2,75$$

- Para $X = 4$, ou seja, $K_{(4)}$
Adotando-se o mesmo procedimento anterior, tem-se:

$$K_{(4)} = \frac{1}{2 \times \pi} \times 10,43 + \frac{1}{\pi} \times \ln(21,14) = 2,63$$

Logo, a tensão a que fica submetida uma pessoa que toca a cerca, estando afastada da malha de terra de 1 (um) m no momento de um curto-circuito vale:

$$\Delta E_c = (2,75 - 2,63) \times \frac{472 \times 871}{1.552,9} = 84,71 \text{ V}$$

$\Delta E_c < E_u$ (condição satisfeita).

Neste caso, verifica-se que a cerca não necessita de aterramento.

t) Resistência da malha de terra

Da Equação (11.37), tem-se:

$$R_{mte} = \frac{\rho_s}{4 \times R} + \frac{\rho_s}{L_{cm}} = \frac{445}{4 \times 27,27} + \frac{445}{1.552,9} = 4,3 \text{ } \Omega$$

O valor da resistência de terra satisfaz plenamente ao máximo estabelecido, que é de 10 Ω para subestações de 15 kV. Para efeito de demonstração de cálculo, porém, será determinada a influência dos eletrodos verticais no valor final da resistência da malha de terra.

u) Resistência de um aterramento de um eletrodo vertical

Da Equação (11.38), tem-se:

$$R_{vt} = \frac{\rho_s}{2 \times \pi \times L_v} \times \ln \left(\frac{400 \times L_v}{2,54 \times D_v} \right) = \frac{445}{2 \times \pi \times 3} \times \ln \left(\frac{400 \times 3}{2,54 \times 3/4} \right) = 152,1 \text{ } \Omega$$

$$D_v = 3/4''$$

$$L_v = 3 \text{ m}$$

v) Coeficiente de redução da resistência de um eletrodo vertical

Da Equação (11.39), tem-se:

$$K_k = \frac{1 + A \times B}{N_h} = \frac{1 + 0,0407 \times 7,0329}{12} = 0,10718$$

$N_h = 12$ hastes de terra (valor adotado arbitrariamente e visto na Fig. 11.29)

$A = 0,0407$ (Tabela 11.7 – a distância entre as hastes de terra varia de 13,40 m a 13,60 m; utilizar o valor de 12 m)

$B = 7,0329$ (valor interpolado da Tabela 11.8), ou seja:

$$\frac{9 - 16}{5,8917 - 8,5545} = \frac{9 - 12}{5,8917 - B} \rightarrow B = 7,0329$$

x) Resistência de aterramento do conjunto de eletrodos verticais

Da Equação (11.40), tem-se:

$$R_{mte} = K_k \times R_{vt} = 0,1071 \times 152,1 = 16,3 \text{ V}$$

y) Resistência mútua dos cabos e eletrodos verticais

Da Equação (11.41), tem-se:

$$R_{mte} = \frac{\rho_s}{\pi \times L_{cm}} \times \left[\ln \left(\frac{2 \times L_{cm}}{L_{vh}} + \frac{K_1 \times L_{cm}}{\sqrt{S}} - K_2 + 1 \right) \right]$$

$$R_{mte} = \frac{445}{\pi \times 1.552,9} \times \left[\ln \left(\frac{2 \times 1.552,9}{12 \times 3} \right) + \frac{1,082 \times 1.552,9}{\sqrt{2.337}} - 5,289 + 1 \right] \rightarrow R_{mte} = 3,18 \text{ } \Omega$$

$$K = \frac{C_n}{L_m} = \frac{57}{41} = 1,39$$

$$L_{vh} = N_h \times L_{cm} = 12 \times 3 = 36 \text{ m}$$

$$K_1 = 1,14125 - 0,0425 \times K = 1,14125 - 0,0425 \times 1,39 = 1,082$$

$$K_2 = 5,49 - 0,1443 \times K = 5,49 - 0,1443 \times 1,39 = 5,289$$

z) Resistência total da malha

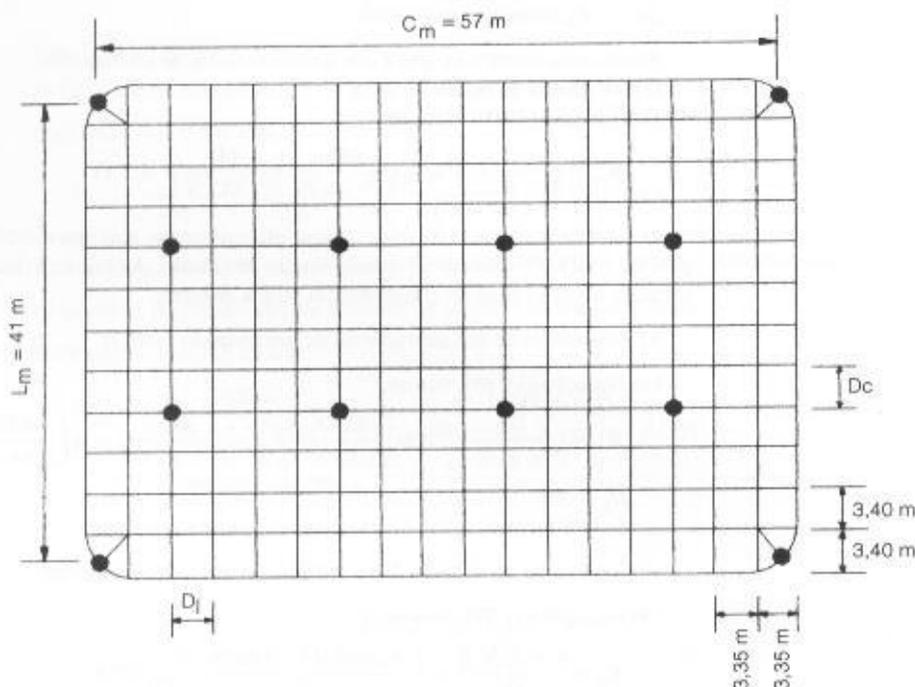
Da Equação (11.46)

$$R_{mv} = \frac{R_{mc} \times R_{ve} - R_{mv}^2}{R_{mc} + R_{ve} - 2 \times R_{mv}}$$

$$R_{mv} = \frac{4,3 \times 16,3 - 3,18^2}{4,3 + 16,3 - 2 \times 3,18} = 4,21 \Omega$$

Observar que a redução da resistência da malha de terra foi de 2,1% quando se considerou o efeito dos eletrodos verticais. A Figura 11.29 mostra a formação final da malha de terra.

FIGURA 11.29
Malha de terra



11.7 CÁLCULO DE UM SISTEMA DE ATERRAMENTO COM ELETRODOS VERTICAIS

Consiste em determinar a resistência de aterramento de um sistema contendo apenas eletrodos verticais interligados através de um condutor. Os eletrodos verticais podem estar dispostos na configuração alinhada, circular, quadrada cheia, quadrada vazia e triângulo.

Este tipo de sistema é normalmente aplicado ao aterramento de pequenas subestações de distribuição utilizadas em plantas de edificações residenciais, comerciais e industriais.

É importante observar que a resistência equivalente de um conjunto de eletrodos verticais alinhados não corresponde ao mesmo resultado do paralelismo de resistências elétricas. A zona de interferência das linhas equipotenciais provoca uma área de bloqueio do fluxo de corrente de cada eletrodo vertical, de sorte que a resistência do conjunto de eletrodos é superior ao valor dos eletrodos quando considerados como resistores em paralelo.

$$\frac{R_{el}}{N_h} < R_{ve} < R_{el} \quad (11.47)$$

R_{el} – resistência de um eletrodo ou haste, em Ω ;

R_{ve} – resistência equivalente de N_h eletrodos (hastes) interligados, em Ω ;

N_h – número de eletrodos utilizados.

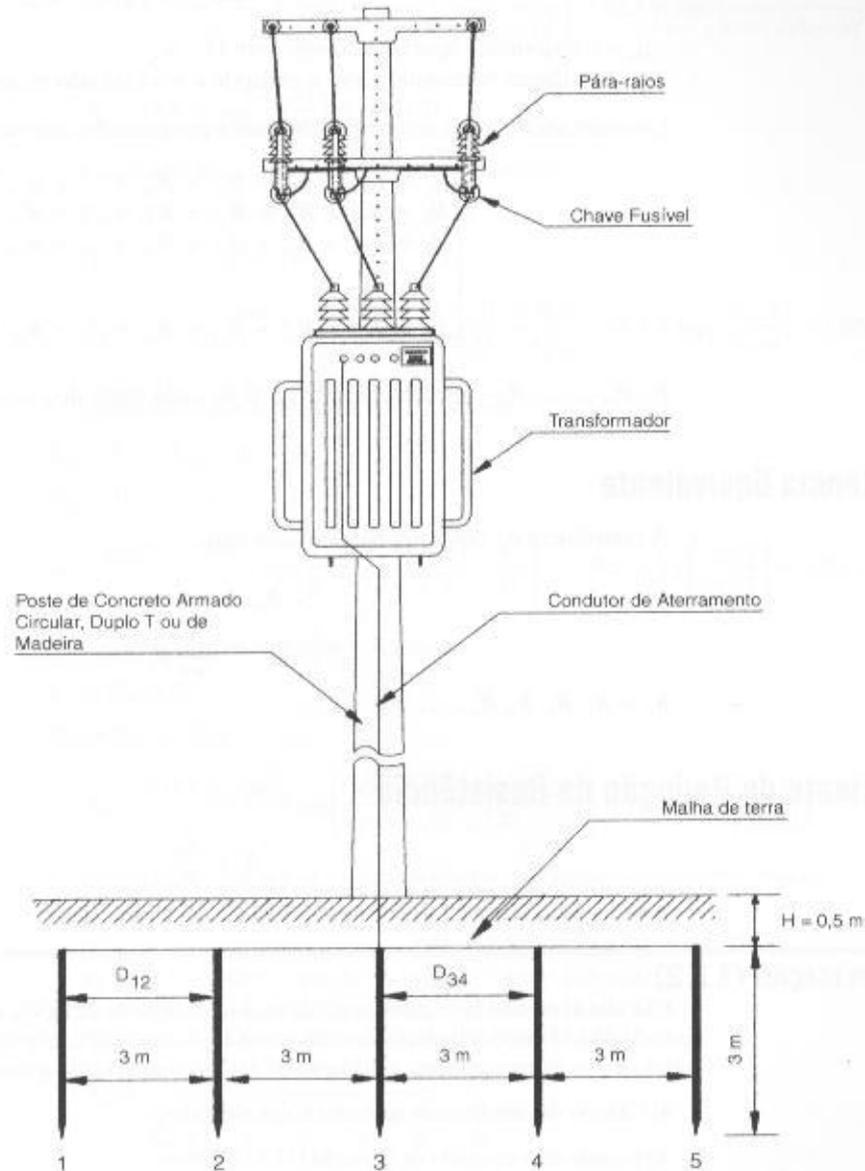
11.7.1 Resistência de Aterramento de um Eletrodo Vertical

Pode-se determinar através da Equação (11.48), já apresentada na Equação (11.38), ou seja:

$$R_{ef} = \frac{\rho_s}{2 \times \pi \times L_h} \times \ln \left(\frac{400 \times L_h}{2,54 \times D_h} \right) \quad (11.48)$$

A resistividade do solo ρ_s deve ser determinada através dos processos anteriormente definidos.

FIGURA 11.30
Aterramento com hastes alinhadas



11.7.2 Resistência de Aterramento de Cada Haste do Conjunto de Eletrodos

Devido à influência das linhas equipotenciais, a resistência de cada eletrodo vertical considerado no seu conjunto é diferente da resistência de apenas um único eletrodo tomado separadamente, ou seja:

$$R_e = R_{ef} + \sum_{n=1}^n R_{em} \quad (11.49)$$

R_{em} – acréscimo da resistência do eletrodo e por influência do eletrodo m ;
 $n = N_h$.

11.7.2.1 Acréscimo da resistência do eletrodo e por influência do eletrodo m (R_{em})

A determinação de R_{em} pode ser feita através da Equação (11.50)

$$R_{em} = \frac{0,183 \times \rho_o}{L_h} \times \log \left[\frac{(\sqrt{L_h^2 + D_{em}^2})^2 - L_h^2 - D_{em}^2}{D_{em}^2 - (\sqrt{L_h^2 + D_{em}^2} - L_h)^2} \right] \quad (11.50)$$

ρ_o – resistividade aparente do solo, em $\Omega \cdot m$;

D_{em} – distância horizontal entre o eletrodo e e o eletrodo m , em m.

Considerando-se um conjunto de n hastes em paralelo, tem-se:

$$\begin{bmatrix} R_1 = R_{11} + R_{12} + R_{13} + R_{14} + \dots + R_{1n} \\ R_2 = R_{21} + R_{22} + R_{23} + R_{24} + \dots + R_{2n} \\ R_3 = R_{31} + R_{32} + R_{33} + R_{34} + \dots + R_{3n} \\ \vdots \\ R_n = R_{n1} + R_{n2} + R_{n3} + R_{n4} + \dots + R_{nn} \end{bmatrix} \quad (11.51)$$

R_1, R_2, \dots, R_n – resistência individual de cada haste do conjunto.

11.7.3 Resistência Equivalente

A resistência do conjunto de eletrodos vale:

$$R_{ne} = \frac{1}{\sum_{e=1}^n \frac{1}{R_e}} \quad (11.52)$$

$R_e = R_1, R_2, R_3, R_4, \dots, R_n$

11.7.4 Coeficiente de Redução da Resistência

$$K = \frac{R_{ne}}{R_{ei}} \quad (11.53)$$

EXEMPLO DE APLICAÇÃO (11.2)

Calcular a resistência de aterramento de uma subestação de 225 kVA, em torre simples, contendo um conjunto de cinco eletrodos (hastes) verticais alinhados e dispostos conforme a Figura 11.30. Serão utilizadas 5 hastes de 3 m de comprimento e diâmetro de 3/4". A resistividade aparente do solo é de $300 \Omega \cdot m$.

a) Cálculo das resistências individuais dos eletrodos

Aplicando-se o conjunto da Equação (11.51), tem-se:

$$\begin{bmatrix} R_1 = R_{11} + R_{12} + R_{13} + R_{14} + R_{15} \\ R_2 = R_{21} + R_{22} + R_{23} + R_{24} + R_{25} \\ R_3 = R_{31} + R_{32} + R_{33} + R_{34} + R_{35} \\ R_4 = R_{41} + R_{42} + R_{43} + R_{44} + R_{45} \\ R_5 = R_{51} + R_{52} + R_{53} + R_{54} + R_{55} \end{bmatrix}$$

• Composto-se os eletrodos de mesmos índices, tem-se:

$R_{11} = R_{22} = R_{33} = R_{44} = R_{55} = R_{ee}$

$$R_{ei} = R_{ee} = \frac{\rho_o}{2 \times \pi \times L_h} \times \ln \left(\frac{400 \times L_h}{2,54 \times D_h} \right)$$

$$R_{ee} = \frac{300}{2 \times \pi \times 3} \times \ln \left[\frac{400 \times 3}{2,54 \times 3/4} \right] = 102,5 \, \Omega$$

- Compondo-se os eletrodos 1-2, 2-3, 3-4 e 4-5, tem-se:

$$R_{12} = R_{21} = R_{23} = R_{32} = R_{34} = R_{43} = R_{45} = R_{54} = R_a$$

$$D_{12} = D_{23} = D_{34} = D_{45} = 3 \text{ m}$$

$$R_a = \frac{0,183 \times \rho_b}{L_k} \times \log \left[\frac{(\sqrt{L_k^2 + D_{12}^2} + L_k)^2 - D_{12}^2}{D_{12}^2 - (\sqrt{L_k^2 + D_{12}^2} - L_k)^2} \right]$$

$$R_a = \frac{0,183 \times 300}{3} \times \log \left[\frac{(\sqrt{3^2 + 3^2} + 3)^2 - 3^2}{3^2 - (\sqrt{3^2 + 3^2} - 3)^2} \right] = 18,3 \times \log \left[\frac{(\sqrt{18} + 3)^2 - 9}{9 - (\sqrt{18} - 3)^2} \right]$$

$$R_a = 18,3 \times \log \left(\frac{43,45}{7,45} \right) = 14,01 \, \Omega$$

- Compondo-se os eletrodos 1-3, 2-4 e 3-5, tem-se:

$$R_{13} = R_{31} = R_{24} = R_{42} = R_{35} = R_{53} = R_b$$

$$D_{13} = D_{24} = D_{35} = 6 \text{ m}$$

$$R_b = \frac{0,183 \times 300}{3} \times \log \left[\frac{(\sqrt{3^2 + 6^2} + 3)^2 - 6^2}{6^2 - (\sqrt{3^2 + 6^2} - 3)^2} \right] = 18,3 \times \log \left[\frac{58,24}{22,24} \right] = 7,65 \, \Omega$$

- Compondo-se os eletrodos 1-4 e 2-5, tem-se:

$$R_{14} = R_{41} = R_{25} = R_{52} = R_c$$

$$D_{14} = D_{25} = 9 \text{ m}$$

$$R_c = \frac{0,183 \times 300}{3} \times \log \left[\frac{(\sqrt{3^2 + 9^2} + 3)^2 - 9^2}{9^2 - (\sqrt{3^2 + 9^2} - 3)^2} \right] = 18,3 \times \log \left[\frac{74,92}{38,92} \right] = 5,20 \, \Omega$$

- Compondo-se os eletrodos 1-5, tem-se:

$$R_{15} = R_{51} = R_d$$

$$D_{15} = D_{25} = 12 \text{ m}$$

$$R_d = \frac{0,183 \times 300}{3} \times \log \left[\frac{(\sqrt{3^2 + 12^2} + 3)^2 - 12^2}{12^2 - (\sqrt{3^2 + 12^2} - 3)^2} \right] = 18,3 \times \log \left[\frac{92,21}{56,21} \right] = 3,93 \, \Omega$$

- Substituindo-se todos os valores no conjunto de equações anteriores, tem-se:

$$R_1 = 102,50 + 14,01 + 7,65 + 5,20 + 3,93 = 133,29 \, \Omega$$

$$R_2 = 14,01 + 102,50 + 14,01 + 7,65 + 5,20 = 143,37 \, \Omega$$

$$R_3 = 7,65 + 14,01 + 102,50 + 14,01 + 7,65 = 145,82 \, \Omega$$

$$R_4 = 5,20 + 7,65 + 14,01 + 102,50 + 14,01 = 143,37 \, \Omega$$

$$R_5 = 3,93 + 5,20 + 7,65 + 14,01 + 102,50 = 133,29 \, \Omega$$

$$R_{ne} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i}} = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_5}}$$

$$R_{ne} = \frac{1}{\frac{1}{133,29} + \frac{1}{143,37} + \frac{1}{145,82}} = \frac{1}{0,035}$$

$$R_{ne} = 28,57 \, \Omega$$

- b) Cálculo do coeficiente de redução da resistência

De acordo com a Equação (11.53), tem-se:

$$K = \frac{R_{ne}}{R_d} = \frac{28,57}{102,50} = 0,278$$

11.8 MEDIÇÃO DA RESISTÊNCIA DE TERRA DE UM SISTEMA DE ATERRAMENTO

Toda subestação, antes de ser energizada pela concessionária local, sofre a inspeção de rotina para verificação de certos parâmetros considerados essenciais à segurança do indivíduo.

Sendo a malha de terra um dos fatores predominantes na segurança de um sistema elétrico industrial, a sua resistência deve satisfazer às condições previstas em norma ou em documentos de instituições internacionais de comprovada idoneidade, como o IEC.

A medição da resistência da malha de terra é feita através do terrômetro utilizando-se os eletrodos conforme disposição mostrada na Figura 11.31. Consiste em aplicar uma tensão entre o sistema a ser medido e um terra auxiliar, e medir a resistência de terra até o ponto desejado, conforme o esquema da Figura 11.32. Os conectores C1 e P1 são ligados a um eletrodo da malha de terra situado na periferia da mesma, podendo utilizar-se do ponto médio de um dos lados, ou de um dos vértices, supondo a malha de terra com geometria retangular, conforme a Figura 11.32.

A medição registrada entre os terminais P2 e C1 fornece um valor aproximado de resistência de terra na região entre o eletrodo P2 e a malha. Podem ser tomadas várias medições, considerando-se fixa a posição do eletrodo C2 e variando-se a distância entre o eletrodo P2 e a malha. Efetuando-se várias medições ao se deslocar o eletrodo P2 desde as proximidades da malha até o ponto C2, nesta mesma direção, com os valores obtidos pode ser traçada uma curva de características semelhantes à da Figura 11.33. O eletrodo C2 deve ser colocado distante da malha de terra, numa região onde a densidade da corrente, fluindo do subsolo, seja praticamente nula. Considerando-se a curva da Figura 11.33, pode-se concluir que o eletrodo P2, colocado a uma distância P de valor igual a $0,618 \times C2$, fornece o valor da resistência da malha de terra.

De maneira geral, o valor da resistência de malha pode ser obtido quando o eletrodo P2 for fincado a uma distância média entre C2 e a malha. Para subestações onde não se dispõe de terreno suficiente para o afastamento do eletrodo de corrente C2, pode-se considerar como distância satisfatória aquela correspondente à diagonal da malha de terra, considerando-a de forma retangular.

FIGURA 11.31
Ligação do terrômetro utilizando eletrodos de medida de resistência de malha.

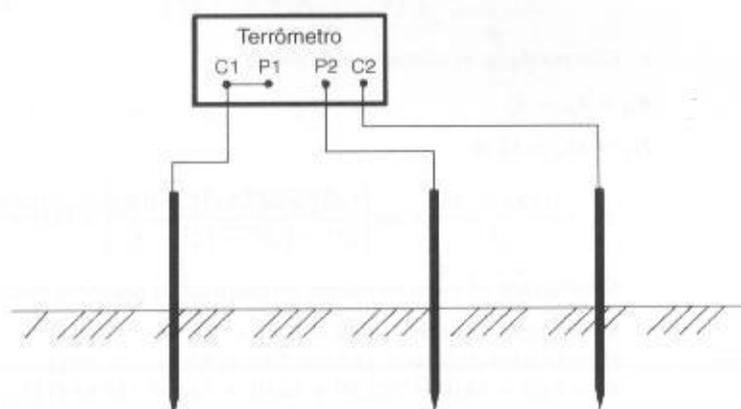


FIGURA 11.32
Posição do terrômetro para a medição de resistência da malha.

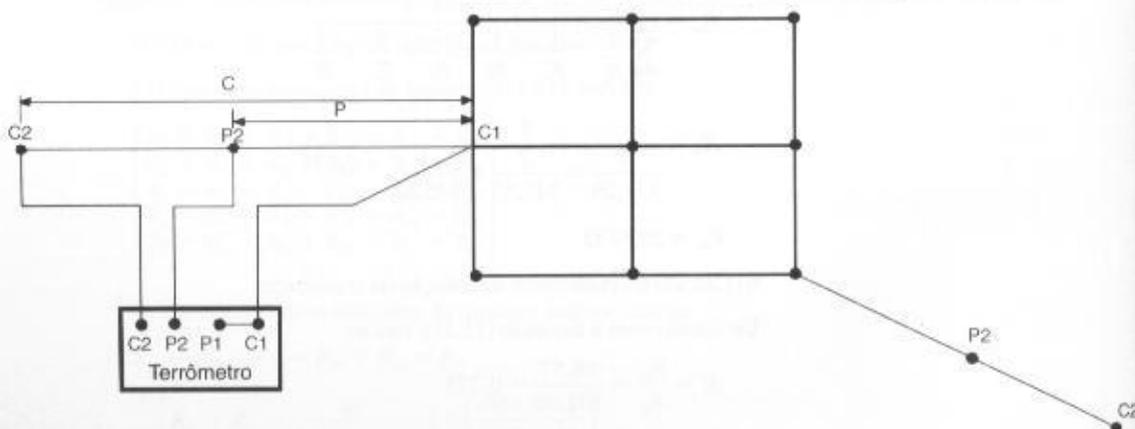
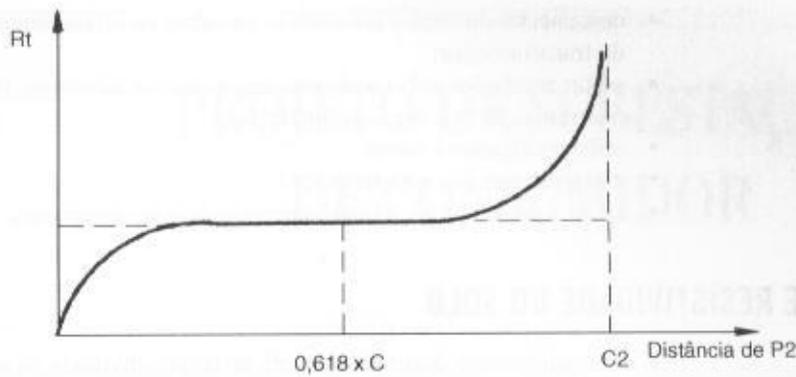


FIGURA 11.33
Curva que define o valor da resistência de malha



Para se determinar as distâncias C e P definidas na Figura 11.32, aplicar a seguinte metodologia:

- Determinar o raio R do círculo equivalente à área da malha de terra, conforme Equação (11.5).
- Determinar o valor de C dado na Figura 11.32 através da Equação (11.54).

$$C = R \times K \quad (11.54)$$

R – raio do círculo cuja área é igual à área da malha de terra, conforme Equação (11.5).

K – considerar um mínimo de 10, sendo aconselhável adotar-se o valor de 30 ou superior, em que se obtém valores de resistência de malha de terra na região plana da curva mostrada na Figura 11.33.

Quanto maior o valor de K maior é o espaço necessário para fincar o eletrodo $C2$ mostrado na Figura 11.32, porém menor será o erro no resultado da medição, reduzindo a interferência da malha de terra com o eletrodo de corrente $C2$.

- Determinar o valor de P através da Equação (11.55)

$$P = 0,618 \times C \quad (11.55)$$

EXEMPLO DE APLICAÇÃO (11.3)

Determinar as distâncias à malha de terra a que devem ficar os eletrodos $C2$ e $P2$ para a medição da respectiva resistência, calculada no Exemplo de Aplicação (11.1).

- a) Adotar o valor de $K = 10$

De acordo com a Equação (11.5), tem-se:

$$S = 57 \times 41 = 2.337 \text{ m}^2$$

$$R = \sqrt{\frac{S}{\pi}} = \sqrt{\frac{2.337}{\pi}} = 27,27 \text{ m}$$

$$C = R \times K = 27,27 \times 10 = 272,7 \text{ m}$$

$$P = 0,618 \times C = 0,618 \times 272,7 = 168,5 \text{ m}$$

- b) Adotar o valor de $K = 20$

$$C = R \times K = 27,27 \times 20 = 545,4 \text{ m}$$

$$P = 0,618 \times C = 0,618 \times 545,4 = 337,0 \text{ m}$$

- c) Adotar o valor de $K = 30$

$$C = R \times K = 27,27 \times 30 = 818,1 \text{ m}$$

$$P = 0,618 \times C = 0,618 \times 818,1 = 505,5 \text{ m}$$

11.8.1 Precauções de Segurança Durante as Medições de Resistência de Aterramento

Relativamente a potenciais perigosos que podem aparecer próximos a sistemas de aterramento ou a estruturas condutoras aterradas, devem ser tomadas as seguintes medidas de segurança, visando evitar acidentes durante a execução das medidas de resistência de aterramento:

