



CEFET/RJ - Centro Federal de Educação Tecnológica  
Celso Suckow da Fonseca

# Aula nº 10

## Subestações

## Malha de Terra

Prof. Marcos Vinícius Pimentel Teixeira

E-mail: [marcos\\_eng.eletrica@hotmail.com](mailto:marcos_eng.eletrica@hotmail.com)

27 de Maio de 2017  
Rio de Janeiro, RJ, Brasil

# Introdução

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

Os principais objetivos do aterramento são:

- ◆ Obter uma resistência de aterramento a mais baixa possível, para correntes de falta a terra;
- ◆ Manter os potenciais produzidos pelas correntes de falta dentro de limites de segurança de modo a não causar danos físicos nas pessoas;
- ◆ Fazer que equipamentos de proteção sejam mais sensibilizados e isolem rapidamente as falhas à terra;
- ◆ Proporcionar um caminho de escoamento das descargas atmosféricas para terra;
- ◆ Proteção das pessoas contra contatos com partes metálicas da instalação energizadas acidentalmente;
- ◆ Escoar cargas estáticas geradas nas carcaças dos equipamentos.

# Introdução

Existem várias maneiras para aterrar um sistema elétrico, que vão desde uma simples haste, passando por placas de formas e tamanhos diversos, chegando às mais complicadas configurações de cabos enterrados no solo. Esta última maneira de se aterrar uma instalação elétrica, na sua forma mais completa, constitui a **malha de terra**, que será o objeto do nosso estudo, uma vez que nossa intenção é estudar o aterramento de subestações.

# Proteção Contra Contatos Indiretos

O acidente mais comum a que estão submetidas as pessoas que trabalham nas instalações elétricas, desempenhando tarefas de manutenção e operação, é o toque accidental 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 isolação e permitiu que este indivíduo ficasse submetido a uma determinado potencial elétrico.

# Estimativa dos Efeitos da Corrente Elétrica no Corpo Humano

I (m A)		REAÇÃO FISIOLÓGICA	CONSEQUÊNCIA	SALVAMENTO	RESULTADO FINAL MAIS PROVÁVEL
C.A.	C.C.				
ATE 25	ATE 80	1 mA (C.A.)-Limiar da sensação/sens. de formigamento 5-15 mA(C.A.)-Contração muscular 15-25 mA(C.A.)-Contr.Violenta Impossib. de soltar o eletrodo. Prob. Respiratório	Se a corrente for próxima 25 mA --- pode haver Asfixia e conseq. Morte Aparente.	RESPIRAÇÃO ARTIFICIAL	RESTABELECIMENTO
25-80	80-300	- Sensação Insuportável - Contrações Violentas - Asfixia	MORTE APARENTE	RESPIRAÇÃO ARTIFICIAL	RESTABELECIMENTO
>80	>300	- Asfixia Imediata - Fibrilação Ventric. - Alteração Musculares (Químicas). - Queimaduras	MORTE APARENTE	- RESPIRAÇÃO ARTIFICIAL - MASSAGEM CARDÍACA	CASO LEVADO AO HOSP. E FEITO A DESFIBRILAÇÃO -- RESTABELECIMENTO
CORRENTE DA ORDEM DE AMPÈRES		- Queimaduras (Efeito Térmico). - Necrose dos tecidos - Fibrilação Ventric. - Asfixia Imediata - Danos Posteriores Resultado do Produto da Eletrolise	- MORTE APARENTE - DEPENDENDO DA EXTENSÃO DAS QUEIMADURAS, SE QUELAS OU MORTE	- RESPIRAÇÃO ARTIFICIAL - MASSAGEM CARDÍACA - TRATAMENTO HOSPITALAR	- HOSPITAL - DESFIBRILAÇÃO - RECUPERAÇÃO DIFÍCIL - ATROFIA MUSCULAR - OUTROS DANOS

# Corrente Máxima Admitida pelo Corpo Humano

A corrente máxima admitida pelo corpo humano, denominada de máxima corrente de choque, pode ser determinada pela expressão abaixo:

$$I_{ch} = 0,116/\sqrt{T_e} \text{ (A)}$$

Sendo:

$$0,03 \text{ s} \leq T_e \leq 3,00 \text{ s}$$

$I_{ch}$  = corrente (A) máxima para não causar dano ao ser humano

$T_e$  = tempo (s) da duração do choque

A expressão acima é usada para obtenção do limite permissível e aceitável de corrente, para que não ocorra dano ao corpo humano, durante o tempo em que a pessoa fica submetida à **tensão de toque** ou à **tensão de passo** (que serão definidas a seguir).

Numa subestação, o tempo de duração do choque ( $T_e$ ) é limitado pela atuação da proteção. Este tempo, definido pelo tempo de atuação da proteção, levado à expressão acima permite a obtenção da corrente limite através do corpo humano, até a qual não ocorre dano físico no mesmo.

# Tensão de Toque (ou de Contato)

Tensão (ou potencial) de toque é a diferença de potencial entre o ponto da estrutura metálica, situado ao alcance da mão de uma pessoa, e um ponto no chão situado a 1m da base da estrutura.

O potencial máximo gerado por um aterramento, durante o período de defeito, não deve produzir uma corrente de choque superior à corrente máxima admitida pelo corpo humano ( $I_{ch}$ )

Pela Figura 6.1 (ver página seguinte), obtém-se a expressão do potencial de toque em relação à corrente elétrica de choque.

$$V_{toque} = \left( R_{ch} + \frac{R_c}{2} \right) \times I_{ch} \quad \longrightarrow \quad V_{toque} = (1000 + 1,5\rho_s) \times I_{ch}$$

Onde:

$R_{ch}$  = resistência do corpo humano (considerada igual a 1000 ohms)

$R_c$  = resistência de contato que pode ser considerada igual a  $3\rho_s$  ( $\rho_s$  = resistividade superficial do solo), de acordo com a recomendação da IEEE-80 (Guide for Safety in Substations Grounding-1986)

$I_{ch}$  = corrente de choque pelo corpo humano

$R_1$  e  $R_2$  = resistências dos trechos de terra considerados

# Tensão de Toque (ou de Contato)

A expressão do potencial de toque pode ser escrita da seguinte maneira:

$$V_{\text{toque}} = (1000 + 1,5 \rho_s) I_{\text{ch}}$$

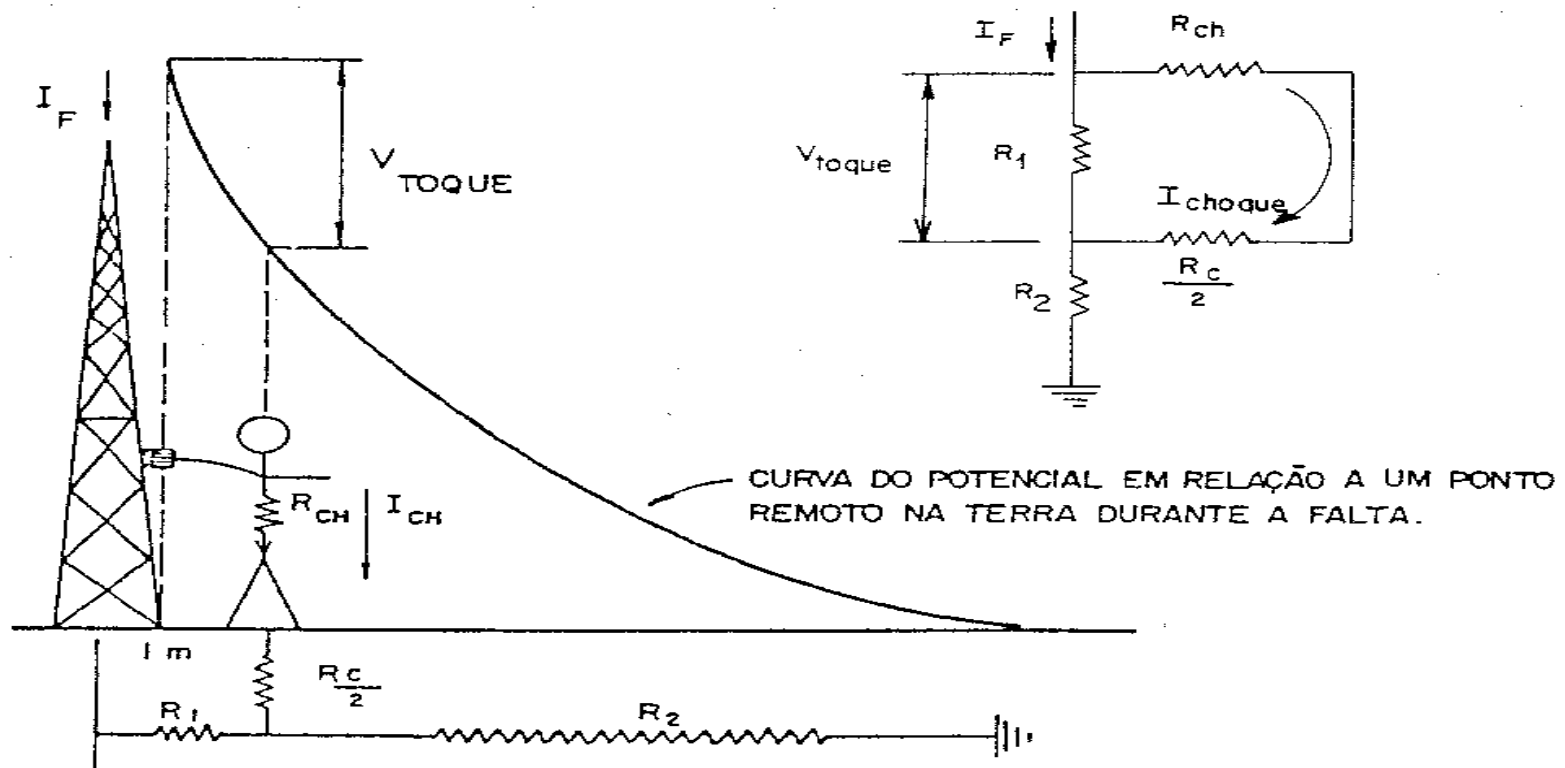


Figura 6.1  
Circuito Equivalente de um Indivíduo Sujeito à Tensão de Toque



# Tensão de Toque Máxima

A tensão de toque máxima permissível entre a mão e o pé, para não causar danos ao ser humano, é a produzida pela corrente máxima de choque. Assim, da expressão final do item 6 obtém-se:

$$V_{\text{toque máximo}} = (1000 + 1,5\rho_s) \times \overset{I_{ch}}{(0,116/\sqrt{T_e})}$$

$$V_{\text{toque máximo}} = (116 + 0,174\rho_s)/\sqrt{T_e} \text{ Volts}$$

# Tensão de Passo

Tensão (ou potencial) de passo é a diferença de potencial entre os dois pés.

As tensões de passo ocorrem quando aparecem diferenças de potencial entre os pés. Isto pode ocorrer quando os pés se encontrarem sobre linhas equipotenciais diferentes. Estas linhas equipotenciais se formam na superfície do solo quando do escoamento da corrente de curto-circuito. É claro que, se no breve espaço de tempo em que ocorre o curto-circuito, os dois pés estiverem sobre a mesma linha equipotencial ou se um único pé estiver sendo usado como apoio, não haverá a tensão de passo.

Em outras palavras, o potencial de passo é a diferença de potencial que aparece entre dois pontos situados no chão e distanciados de 1m, devido à passagem da corrente de curto-circuito pela terra. Pela Figura 9.1, obtém-se a expressão do potencial de passo, em relação à corrente de choque.

# Tensão de Passo

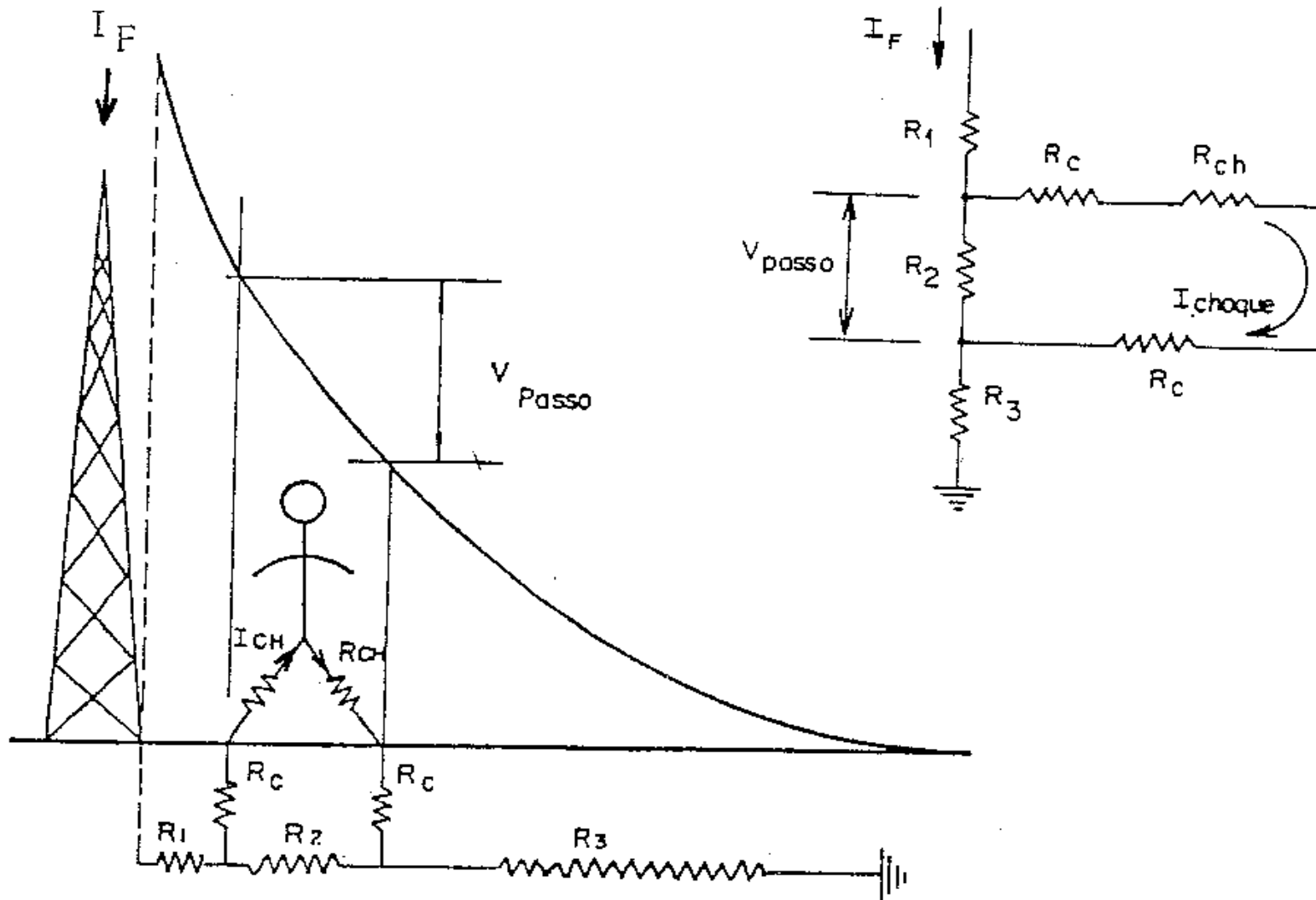


Figura 8.1  
Circuito Equivalente de um Indivíduo Sujeito à Tensão de Passo

# Tensão de Passo devido à Descarga Atmosférica

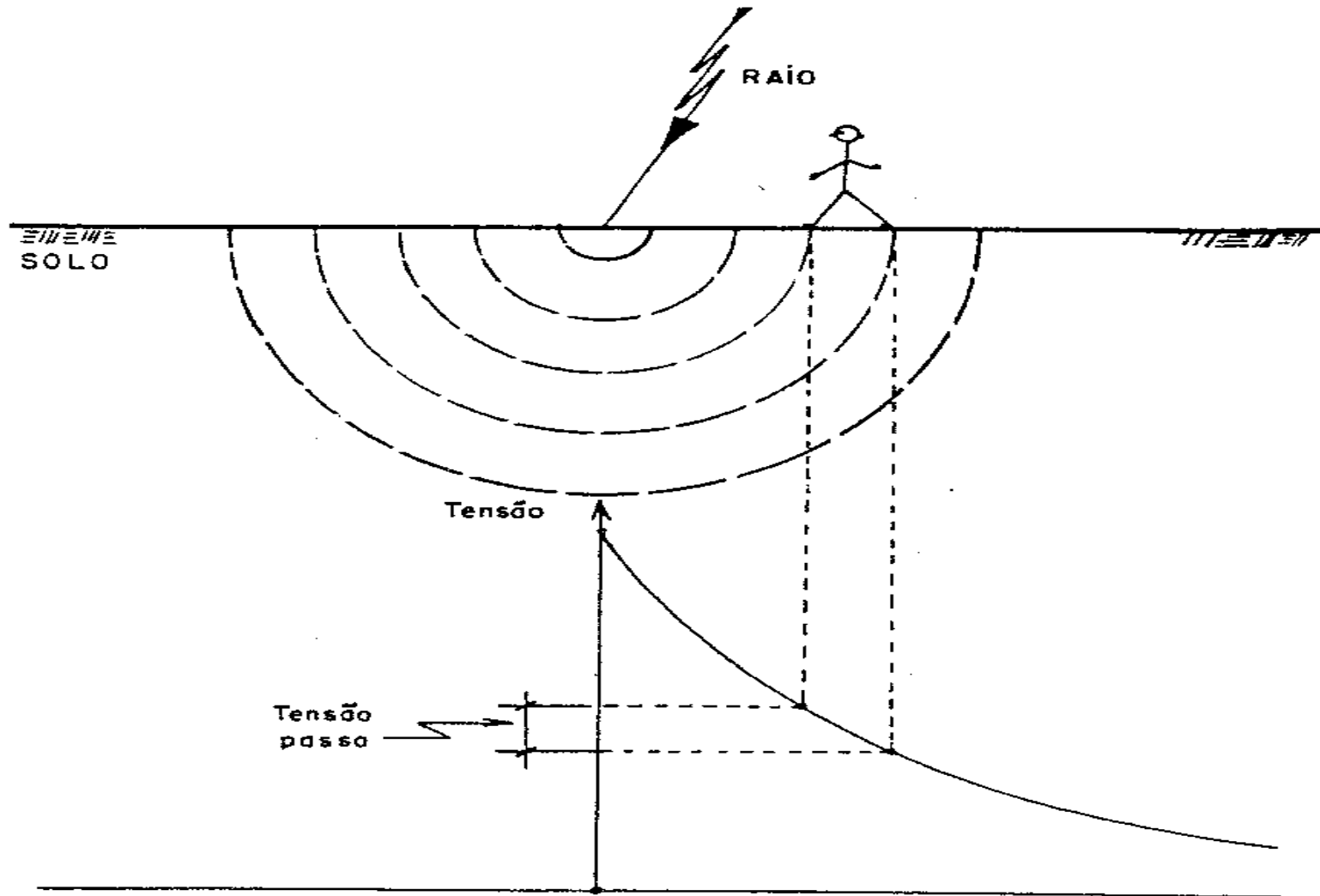


Figura 8.2

Tensão de Passo Resultante de uma Descarga Atmosférica

# Tensão de Passo

$$V_{\text{passo}} = (R_{\text{ch}} + 2R_{\text{c}}) \times I_{\text{ch}}$$

Onde:

$R_{\text{ch}}$  = resistência do corpo humano (considerada igual a 1000 ohms)

$R_{\text{c}}$  = resistência de contato que pode ser considerada igual a  $3\rho_{\text{s}}$  ( $\rho_{\text{s}}$  = resistividade superficial do solo), de acordo com a recomendação da IEEE-80 (Guide for Safety in Substations Grounding-1986)

$I_{\text{ch}}$  = corrente de choque pelo corpo humano

$R_1, R_2$  e  $R_3$  = resistências dos trechos de terra considerados

# Tensão de Passo

A expressão do potencial de passo pode ser escrita da seguinte maneira:

$$V_{\text{passo}} = (1000 + 6\rho_s) \times I_{\text{ch}}$$

A Figura 8.2 mostra o potencial de passo devido a um raio que cai no solo. Por esta figura, pode-se ver as linhas equipotenciais, referidas no início deste item 8 (Obs: 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).

# Tensão de Passo Máxima

O potencial de passo máximo ( $V_{\text{passo máximo}}$ ) tolerável, para não causar danos ao ser humano, é o produzido pela corrente máxima de choque (ver item 5). Assim, da expressão final do item 8 obtém-se:

$$V_{\text{passo máximo}} = (1000 + 6\rho_s) \times \overset{I_{\text{ch}}}{0,116/\sqrt{T_e}} \text{ Volts}$$

$$V_{\text{passo máximo}} = (116 + 0,696\rho_s) / \sqrt{T_e} \text{ Volts}$$

# Correção de Potencial de Toque e de Passo Máximo Admissível Devido à Aplicação de Brita na Superfície

Como a área da subestação é a mais perigosa, o solo é revestido por uma camada de brita. Esta confere maior qualidade no nível de isolamento dos contatos dos pés com o solo (ver Figura 10.1).

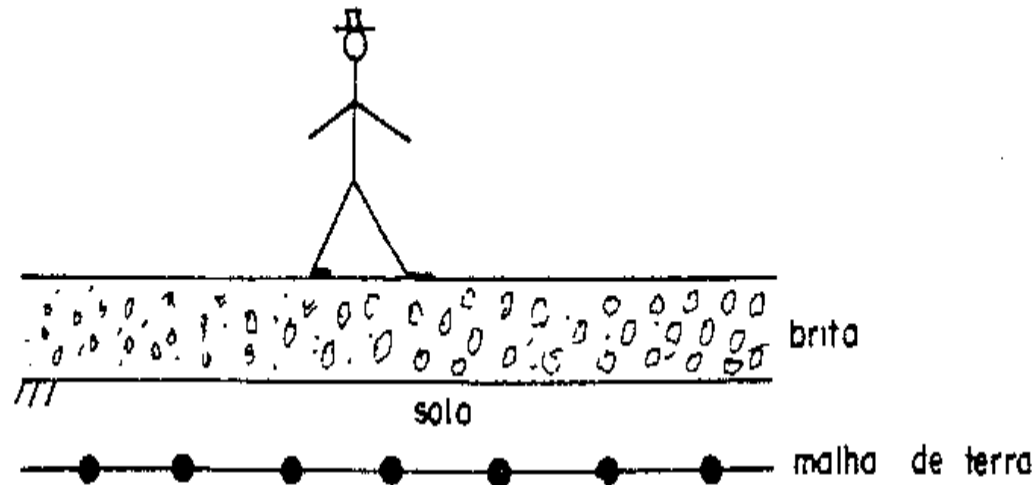


Figura 10.1  
Solo da Subestação com uma Camada de Brita



# Correção de Potencial de Toque e de Passo Máximo Admissível Devido à Aplicação de Brita na Superfície

Esta camada representa uma estratificação adicional com a camada superficial do solo. Portanto, deve haver uma correção no parâmetro que contém  $\rho_s$  das expressões de cálculo dos potenciais de toque e de passo máximos.

Deve-se fazer uma correção  $C_s(h_s, K)$  no  $\rho_s = \rho_{brita} = 3000 \text{ } \Omega.m$ .

O fator de correção  $C_s(h_s, K)$  é dado pela expressão:

$$C_s = 1 - \frac{0,09 \left( 1 - \frac{\rho_a}{\rho_s} \right)}{2h_s + 0,09}$$

onde:

$h_s$  = profundidade (espessura) da brita em [m]

$\rho_a$  = resistividade aparente do solo onde será instalada a malha, sem considerar a brita

$\rho_s = \rho_{brita} = 3.000 \text{ } \Omega.m$  = resistividade da brita

$$K = \frac{\rho_a}{\rho_s}$$

## Correção de Potencial de Toque e de Passo Máximo Admissível Devido à Aplicação de Brita na Superfície

$$V_{\text{toque máximo}} = (1000 + 1,5\rho_s) \times (0,116/\sqrt{T_e})$$

$$V_{\text{passo máximo}} = (1000 + 6\rho_s) \times 0,116/\sqrt{T_e} \text{ Volts}$$

Assim, as expressões do potencial de toque e de passo máximos, com o fator de correção, ficam:  $C_s(h_s, K)$

$$V_{\text{toque máximo}} = (1000 + 1,5 C_s(h_s, K) \rho_s) \times (0,116/\sqrt{T_e}) \text{ Volts}$$

$$V_{\text{passo máximo}} = (1000 + 6 C_s(h_s, K) \rho_s) \times 0,116/\sqrt{T_e} \text{ Volts}$$

# Ensaio: Medida de Potencial de Toque

Para determinação do potencial de toque, utiliza-se duas placas de cobre ou alumínio, com superfícies bem polidas, de dimensões 10x20 cm e com um terminal próprio para interligação com os terminais do voltímetro. As dimensões acima simulam a área do pé humano e, para simular o peso, deve-se colocar 80 kg sobre as placas (admitindo um peso humano de 80 kg). As placas são colocadas próximas uma da outra.

Deve ser usado um voltímetro de alta sensibilidade (alta impedância interna) e intercalar entre os pontos de medição uma resistência com o valor de 1000 ohms para simular a resistência do corpo humano. A seguir, mede-se o potencial entre o solo (placa colocada a 1m de distância do pé da estrutura) e a estrutura metálica no ponto de alcance da mão, com a resistência inserida entre estes dois pontos (ver Figura 11.1).

# Ensaio: Medida de Potencial de Toque

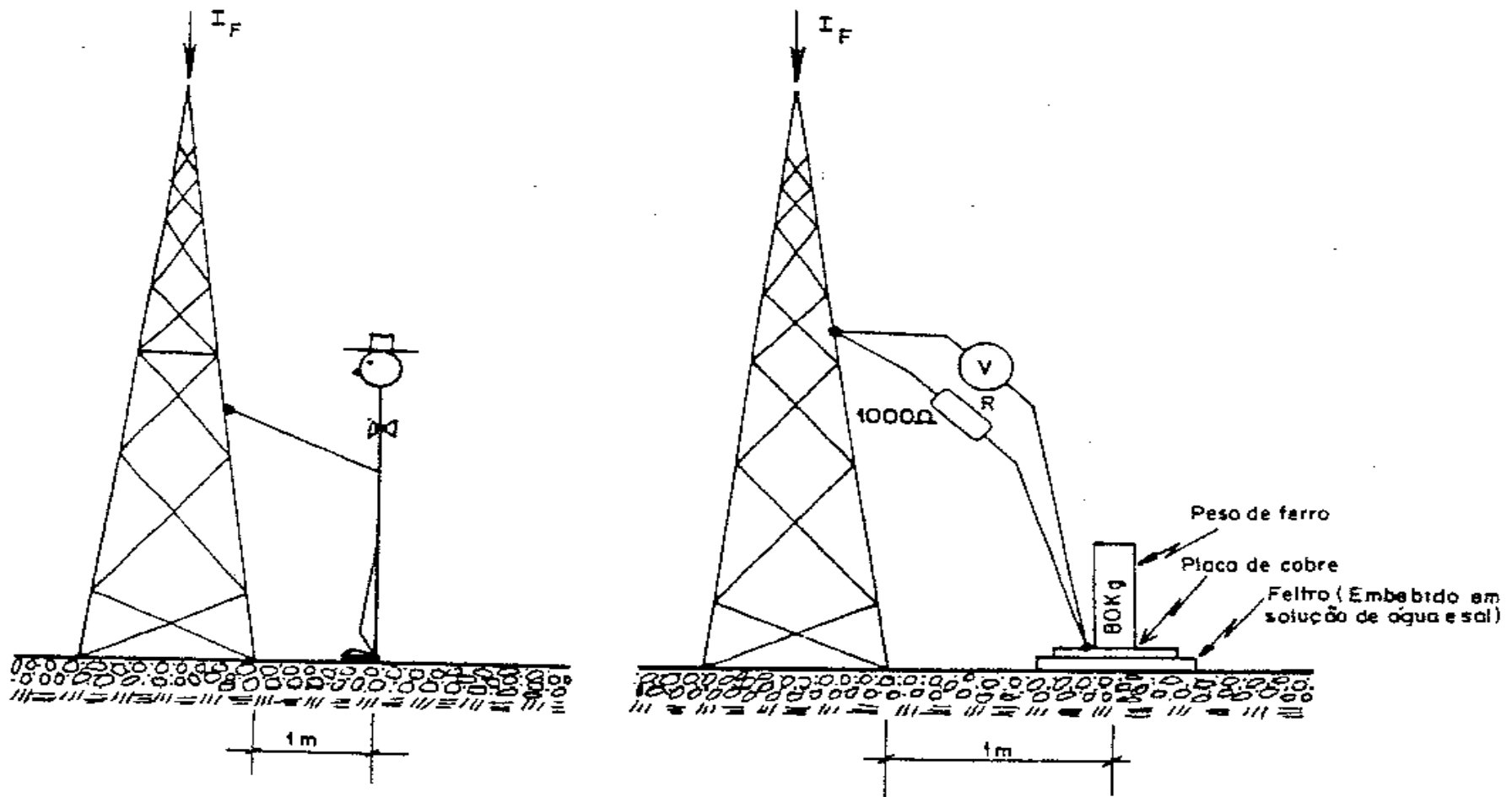


Figura 11.1  
Medida de Potencial de Toque

# Ensaio: Medida de Potencial de Passo

Para a medida do potencial de passo, são utilizados duas placas de cobre ou alumínio, como descrito no item anterior, que serão colocadas no solo espaçadas de 1 metro. Deverá ser aplicado um peso de 40 kg a cada placa para simular o peso do corpo humano e inserir entre os dois pontos uma resistência de 1000 ohms (ver Figura 12.1).

O potencial obtido, medido com voltímetro de alta impedância interna, deverá ser extrapolado para valores de corrente de curto-circuito fase-terra, como já foi explicado no item anterior. Na prática, também deve-se ter valores medidos abaixo dos valores especificados pelos limites de segurança.

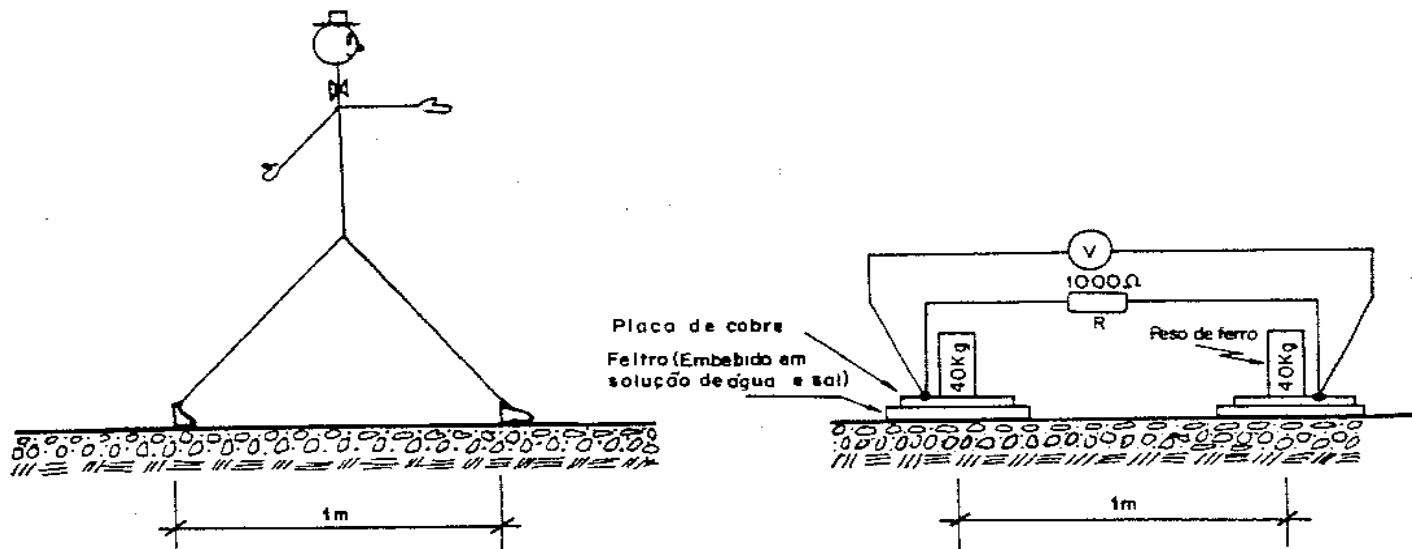


Figura 12.1  
Medida de Potencial de Passo

# Cálculo da Malha de Terra

- O dimensionamento correto de uma malha de aterramento deve atender principalmente os seguintes requisitos:
  - os potenciais que surgem na superfície (quando da ocorrência do máximo defeito a terra) devem ser inferiores aos máximos potenciais de passo e de toque que uma pessoa pode suportar sem sofrer danos físicos
  - o condutor da malha deve suportar os esforços mecânicos e térmicos a que estarão sujeitos ao longo de sua vida (em função das altas correntes de defeito que circularão por esta malha)
  - a resistência de terra da malha deve ser compatível com o sistema de proteção permitindo que o relé de neutro atue com segurança em caso de defeitos para a terra

# Cálculo da Malha de Terra

- O dimensionamento da malha é um processo iterativo onde parte-se de uma malha inicial e verifica-se seus potenciais
  - Caso os potenciais sejam inferiores aos máximos valores suportáveis por um ser humano, parte-se para o detalhamento da malha (convergiu)
  - Caso contrário, modifica-se o projeto da malha até estabelecer as condições exigidas

# Dados Necessários para o Projeto de uma Malha de Terra

- Antes de iniciar o processo de calculo, deve-se :
  - Fazer no local da construção da malha de terra as medições de resistividade do solo (utilizando-se, por exemplo, o método de Wenner), com finalidade de se obter a estratificação do solo
  - Conhecer a resistividade superficial do solo (geralmente brita molhada sendo o valor da resistividade igual a  $3000 \Omega \cdot \text{metro}$ )
  - Obter o valor da corrente máxima de curto circuito entre fase e terra no local do aterramento ( $I_{\text{máxima}} = 3I_0$ )
  - Tempo de eliminação do defeito fase-terra pela proteção contra falhas à terra
  - Conhecer a área da malha de terra a ser projetada



# Resistividade Solo

Para o projeto de uma malha de terra, é de primordial importância o conhecimento prévio das características das resistividades das diversas camadas do solo no local onde será instalada a subestação, principalmente no que diz respeito à homogeneidade de sua constituição. A Tabela 1.1 fornece a resistividade de diferentes naturezas de solo compreendidas entre valores, mínimo e máximo, que podem ser usados na elaboração de um projeto de malha de terra, caso não se disponha de medições adequadas. Para cálculos precisos de resistividade do solo é necessário, porém, realizar medições com instrumentos do tipo Megger.

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
Areia argilosa	50	500
Areia silicosa	200	3.000
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	100	10.000

# Medição da Resistividade Pelo Método de Wenner (instrumento do tipo Megger)

Consiste em colocar quatro eletrodos de teste em linha, separados por uma distância  $A$ , e enterrados no solo a uma profundidade de 20cm. 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 **Megger** de terra. Um terminal adicional, marcado com a letra G, é usado para conectar o terminal de guarda do instrumento.

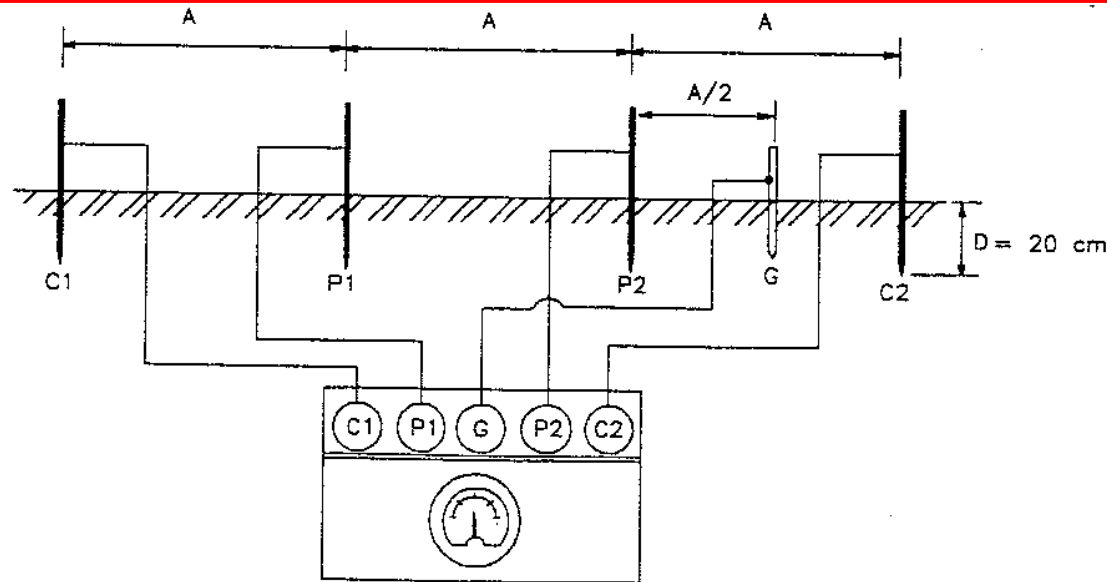


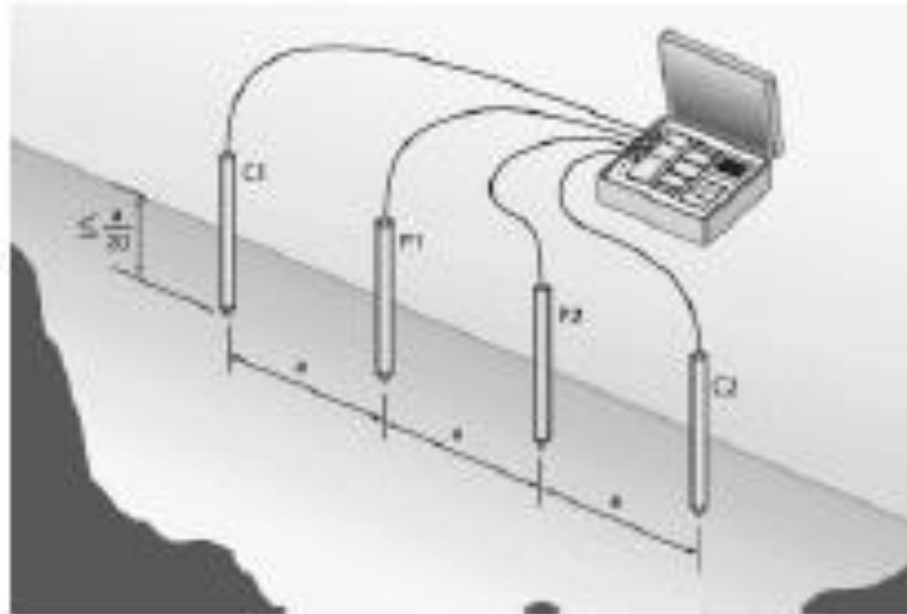
Figura 2.1

Ligação do **Megger** de Terra aos Eletrodos de Medida de Resistividade do Solo

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

# Medição da Resistividade Pelo Método de Wenner (instrumento do tipo Megger)

- Através dos dois eletrodos externos (eletrodos de corrente C1 e C2), faz-se circular uma corrente ( $I$ ) e entre os dois eletrodos internos (P1 e P2) é medida a tensão ( $V$ )
- Com a relação entre a tensão e a corrente ( $V/I$ ) obtém-se a resistência ( $R$ ) em Ohms, a partir da qual é calculado o valor da resistividade do solo até uma determinada profundidade, que é aproximadamente igual à distância ( $A$ ) entre eletrodos



# Dimensionamento do Condutor da Malha de Terra

O condutor da malha de terra é dimensionado considerando os esforços mecânicos e térmicos que ele pode suportar. Na prática utiliza-se, no mínimo, o condutor de  $35\text{mm}^2$ , que suporta os esforços mecânicos da movimentação do solo e dos veículos que transportam os equipamentos durante a montagem da subestação.

O dimensionamento da seção do condutor da malha é feito utilizando-se a expressão abaixo, válida para cabos de cobre:

$$I = 226,53 S_{\text{cobre}} \sqrt{\frac{1}{t_{\text{defeito}}} \ln \left( \frac{\theta_m - \theta_a}{234 + \theta_a} + 1 \right)}$$

Fórmula  
de  
Onderdonk

Sendo:

$S_{\text{cobre}}$  = seção do condutor de cobre da malha de terra em  $\text{mm}^2$

$I$  = corrente de defeito, em Ampères, através do condutor

$t_{\text{defeito}}$  = duração máxima do defeito em segundos

$\theta_a$  = temperatura ambiente em  $^{\circ}\text{C}$

$\theta_m$  = temperatura máxima permissível em  $^{\circ}\text{C}$

Para os condutores de cobre, o valor de  $\theta_m$  é limitado pelo tipo de conexão adotado.

# Dimensionamento do Condutor da Malha de Terra

- As conexões podem ser do tipo:

$\theta_m = 250^{\circ}C$  -> para malha cavilhada com juntas de bronze

$\theta_m = 450^{\circ}C$  -> para malha com emendas tipo solda convencional

$\theta_m = 550^{\circ}C$  -> para malha cuja conexão é com liga Foscooper

$\theta_m = 850^{\circ}C$  -> para malha com emendas em solda exotérmica

# Malha Inicial

- O processo de dimensionamento da malha é um processo iterativo, que partes de um projeto inicial de malha, com dimensões da malha, espaçamentos e colocação de hastes de terra pré-definidas
- A seguir é verificado se os potenciais que surgem na superfície da malha são inferiores aos limites e se a resistência de aterramento da malha é compatível com a sensibilidade da proteção **(CRITÉRIO DE PARADA)**

$$V_{toque} \leq V_{toque\ max}$$

$$V_{cerca} \leq V_{toque\ max}$$

$$V_{passo} \leq V_{passo\ max}$$

- As dimensões da malha são pré-definidas, ou seja, estabelecer um projeto inicial de malha é especificar um espaçamento entre os condutores e definir se serão utilizadas (junto a malha) hastes de aterramento
- Um espaçamento inicial típico adotado está entre 5% e 10% do comprimento total de cada lado da malha

# Malha Inicial

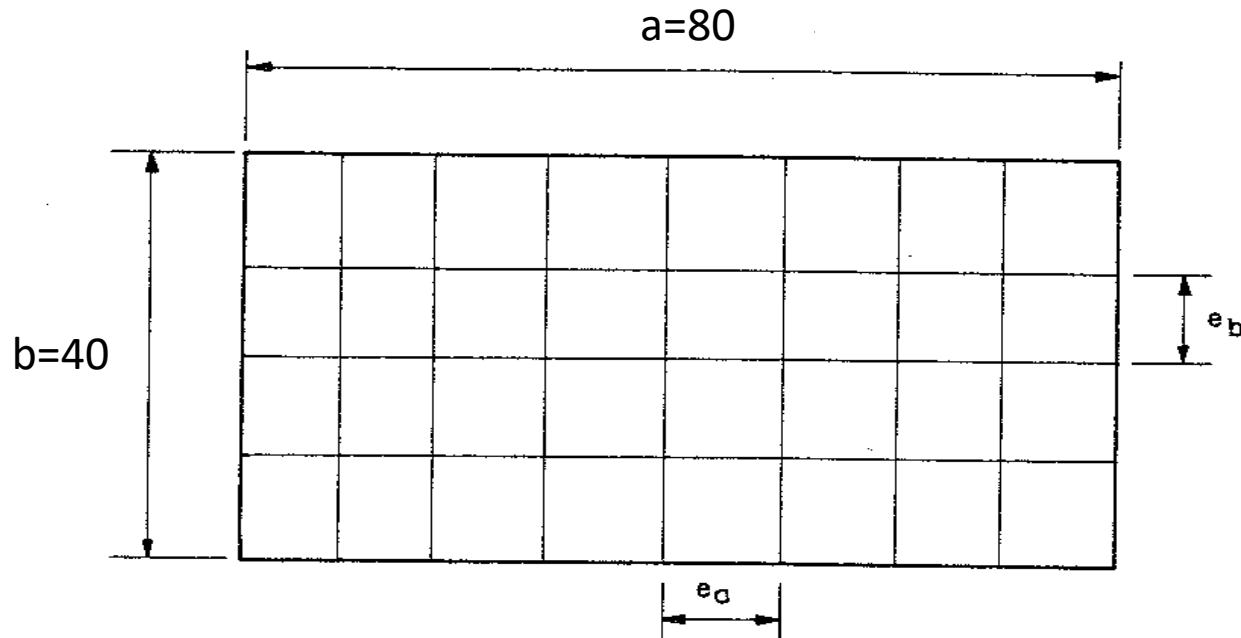


Figura 7.1  
Projeto Inicial da Malha

Todas as fórmulas, a serem usadas no cálculo do dimensionamento da malha de terra, foram deduzidas considerando as submalhas quadradas, isto é,  $e_a \cong e_b$ .

Tendo-se as dimensões da malha determina-se o número de condutores paralelos, ao longo dos lados da malha, pelas expressões:

$$N_a = (a/e_a) + 1$$

$$N_b = (b/e_b) + 1$$

# Malha Inicial

Escolhe-se um número inteiro de condutores, adequado ao resultado dos cálculos acima. O comprimento total dos condutores que formam a malha é dado pela expressão:

$$L_{\text{cabo}} = aN_b + bN_a$$

Se durante o dimensionamento forem introduzidas hastes na malha, deve-se acrescentar seus comprimentos na determinação do comprimento total de condutores:

$$L_{\text{total}} = L_{\text{cabo}} + L_{\text{hastes}}$$

Onde:

$L_{\text{cabo}}$  = comprimento total de condutores da malha

$L_{\text{hastes}}$  = comprimento total das hastes cravadas na malha



# Resistência de Aterramento da Malha

A resistência de aterramento da malha de terra pode, aproximadamente, ser calculada pela fórmula abaixo. Esta fórmula leva em conta a profundidade (h) em que a malha é construída.

$$R_{\text{malha}} = \rho_a \left[ \frac{1}{L_{\text{total}}} + \frac{1}{\sqrt{20A_{\text{malha}}}} \left( 1 + \frac{1}{1 + h \sqrt{\frac{20}{A_{\text{malha}}}}} \right) \right]$$

Fórmula de  
Sverak

Onde:

$\rho_a$  = resistividade aparente do solo

$A_{\text{malha}} = a \times b$  = área ocupada pela malha ( $\text{m}^2$ )

$h$  = profundidade da malha (m),  $0,25 \leq h \leq 2,5\text{m}$

$L_{\text{total}}$  = comprimento total dos cabos e hastes que formam a malha

O valor de resistência obtido com a fórmula deve ser menor do que a máxima resistência limite da sensibilidade do relé de neutro

Esta resistência representa a resistência da malha até o infinito. Deve-se encontrar um valor que preencha as seguintes condições:

a)  $R_{\text{malha}} \leq 10$  ohms (para subestações da classe 15 a 38 kV)

b)  $R_{\text{malha}} \leq 5$  ohms (para subestações da classe 69 kV e acima)

# Potencial de Malha

O potencial de malha ( $V_{\text{malha}}$ ) é o potencial de toque existente na malha de terra que se está projetando quando da ocorrência do máximo defeito fase-terra. Pode ser calculado pela expressão:

$$V_{\text{malha}} = (\rho_a K_m K_i I_{\text{curto}}) / L_{\text{total}}$$

Onde  $K_m$  é definido como o coeficiente de malha, que condensa a influência da profundidade da malha, diâmetro do condutor e dos espaçamentos entre condutores. Seu valor é dado pela expressão:

$$k_m = \frac{1}{2\pi} \left\{ \ln \left[ \frac{e^2}{16hd} + \frac{(e+2h)^2}{8ed} - \frac{h}{4d} \right] + \frac{K_{ii}}{Kh} \ln \frac{8}{\pi(2N-1)} \right\}$$

Sendo:

$h$  = profundidade da malha (m),  $0,25 \leq h \leq 2,5m$

$e$  = espaçamentos entre condutores paralelos ao longo da malha (m)

$d$  = diâmetro do condutor da malha (m)

$N = \sqrt{N_a N_b}$  = a malha retangular é transformada numa malha quadrada com  $N$  condutores paralelos em cada lado

$K_{ii} = 1$  = para malhas com hastes cravadas ao longo do perímetro ou nos cantos da malha ou ambos

$K_{ii} = \frac{1}{(2N)^{\frac{2}{N}}}$  = para malhas sem hastes cravadas ou com poucas hastes (não localizadas nos cantos e perímetro da malha)

# Potencial de Malha

$K_h$  = correção de profundidade calculado pela expressão

$$K_h = \sqrt{1 + \frac{h}{h_0}}$$

Onde:

$$h_0 = 1\text{m}$$

Já o  $K_i$  é definido como coeficiente de irregularidade, que condensa os efeitos da não uniformidade de distribuição da corrente pela malha. O valor de  $K_i$  é dado pela expressão:

$$K_i = 0,656 + 0,172.N$$

Os demais termos da expressão de cálculo de  $V_{\text{malha}}$  são:

$\rho_a$  = resistividade aparente do solo, vista pela malha

$I_{\text{curto}}$  = corrente de defeito

$L_{\text{total}}$  = comprimento total dos condutores da malha

# Potencial de Passo na Malha

Determina-se o maior potencial de passo ( $V_{psM}$ ) que surge na superfície da malha, quando do máximo defeito fase-terra. Este potencial surge na superfície da malha, quando do máximo defeito fase-terra. Este potencial ocorre na periferia da malha e pode ser calculado pela expressão:

$$V_{psM} = (\rho_a K_p K_i I_{curto}) / L_{total}$$

Onde:

$K_p$  = coeficiente que introduz no cálculo a maior diferença de potencial entre dois pontos distanciados de 1m. Este coeficiente relaciona todos os parâmetros da malha que induzem tensões na superfície da terra.

A expressão para o cálculo de  $K_p$  é dada por:

$$K_p = 1/\pi [(1/2h) + (1/(e + h)) + (1/e).(1 - 0,5^{N-2})]$$

Onde:

$N = \text{máximo}(N_a, N_b)$ , dará o maior valor para  $K_p$

# Potencial de Toque na Cerca Perimetral da Malha

Dependendo do grau de risco, localização e característica da malha, deve-se decidir adequadamente o modo como ela será cercada. Usualmente, costuma-se isolar a malha através de:

- ◆ Muro de alvenaria

- ◆ cerca metálica

A cerca metálica é bem econômica, mas, sendo condutora, fica submetida às tensões oriundas das correntes de curto-circuito da subestação. Assim, qualquer pessoa que toca na cerca, no instante em que ocorre um curto-circuito, ficará sujeita a uma diferença de potencial. O potencial de toque máximo na cerca deve ser calculado, de forma a se verificar se é inferior ao valor limite de toque tolerável ( $V_{\text{toque máximo}}$  – item 10, do Capítulo 5) que o corpo humano pode tolerar sem sofrer danos físicos.

# Potencial de Toque na Cerca Perimetral da Malha

O potencial de toque máximo que surge na cerca ( $V_{\text{cerca}}$ ) quando do máximo defeito à terra é dado pela expressão:

$$V_{\text{cerca}} = (\rho_a K_c K_i I_{\text{curto}})/L_{\text{total}}$$

Onde:

$K_c (x)$  = coeficiente que relaciona todos os parâmetros da malha com a posição da pessoa que está tocando a cerca metálica (mãos e pés). Fazer  $K_c = K_c (x=1) - K_c (x=0)$ . O valor de  $K_c (x)$  é dado pela expressão abaixo:

$$K_c (x) = \frac{1}{2\pi} \left\{ \ln \left[ \frac{(h^2 + x^2) + [h^2 + (e + x)^2]}{hd(h^2 + e^2)} \right] + 2 \ln \left\{ \left[ \frac{2e + x}{2e} \right] \cdot \left[ \frac{3e + x}{3e} \right] \dots \left[ \frac{(N+1)e + x}{(N-1)e} \right] \right\} \right\}$$

Onde:

$x$  = distância (m) da periferia da malha ao ponto considerado (pessoa)

$N$  = máximo ( $N_a, N_b$ )

# Exemplo de Dimensionamento de uma Malha de Terra

Projetar uma malha de terra, para uma subestação de 138 kV, com os seguintes dados conhecidos:

- ♦ Corrente de curto-circuito  $I_{\text{curto}} = 1200 \text{ A}$
- ♦ Tempo de atuação da proteção  $t_{\text{defeito}} = 0,6 \text{ s}$
- ♦ Profundidade da malha de terra  $h = 0,60 \text{ m}$
- ♦ Dimensões da malha de terra =  $40 \text{ m} \times 50 \text{ m}$
- ♦ Resistividade aparente do solo  $\rho_a = 411,8 \text{ } \Omega \cdot \text{m}$  (calculada a partir de medições de resistividade das diferentes camadas de solo, feitas no local de construção da subestação, após a conclusão dos serviços de terraplanagem)
- ♦ Superfície da subestação coberta por uma camada de brita de 20cm (Resistividade da brita  $\rho_s = 3000 \text{ } \Omega \cdot \text{m}$ )
- ♦ Emendas dos cabos da malha de terra são feitas com **solda convencional**
- ♦ Temperatura ambiente  $\theta_a = 30 \text{ } ^\circ\text{C}$
- ♦ Pátio da subestação é ladeado por uma cerca metálica acompanhando o perímetro da malha de terra

# Bibliografia

- D'Ajuz, A. & Outros - Transitórios Elétricos e Coordenação de Isolamento - Convênio Furnas Centrais Elétricas S.A. e Universidade Federal Fluminense, Rio de Janeiro, 1985.
- Salgado Carvalho, F. Apostila de Subestações, Universidade Federal Fluminense, 2001.
- D'Ajuz, A. & Outros - Equipamentos Elétricos/Especificação e Aplicação em Subestações de Alta Tensão - Convênio Furnas Centrais Elétricas S.A. e Universidade Federal Fluminense, Rio de Janeiro, 1985.
- Frontin, S.O. & Outros - Equipamentos de Alta Tensão: Prospeção e Hierarquização de Inovações Tecnológicas - Programa de P&D da Aneel, Brasília, 2013.
- Mamede, J. Manual de Equipamentos Elétricos, 4ª Edição, LTC, Rio de Janeiro, 2013.



Dúvidas?

[marcos\\_eng.eletrica@hotmail.com.br](mailto:marcos_eng.eletrica@hotmail.com.br)

