

Capítulo III

Projeto de eletrodo de aterramento (malhas) de subestações de energia elétrica: cálculos de tensões permissíveis, correntes de choque elétrico, tensões de passo e toque

Jobson Modena e Hélio Sueta *

O assunto “projeto de eletrodo de aterramento de subestações de energia elétrica” é relativamente extenso e teve parte de seu conteúdo abordado no fascículo anterior. Nessa oportunidade serão abordados aspectos complementares também recomendados pela ABNT NBR 15751-2009: Sistemas de aterramento de Subestações – Requisitos. A ênfase será dada aos seguintes temas: cálculo das tensões permissíveis, corrente de choque de longa duração, corrente de choque de curta duração, tensão de passo e tensão de toque.

CÁLCULO DAS TENSÕES PERMISSÍVEIS

A norma ABNT NBR 15751-2009 estabelece os valores máximos permissíveis para as tensões de passo e toque em condições locais preestabelecidas. Estes parâmetros são importantes para que um sistema de aterramento seja considerado seguro em uma condição de defeito na instalação elétrica. Relembrando, a tensão de passo é a diferença de potencial entre dois pontos da superfície do solo separados pela distância de um passo de uma pessoa, considerada igual a 1 metro (em função do sistema internacional de unidades). A tensão de toque é a diferença de potencial entre um objeto

metálico aterrado ou não e um ponto da superfície do solo separado por uma distância horizontal equivalente ao alcance normal do braço de uma pessoa. Essa distância é também convencionada igual a 1 metro.

Conhecer as distâncias normalizadas para a definição de tensão de toque e passo pode induzir ao pensamento incorreto e perigoso de que ondas de tensão consideráveis apenas aparecem de forma regular, equidistante e simétrica em relação ao ponto de sua inserção no solo ou no eletrodo. Definição tem função de informar e reger, porém, diversas situações em que aparecem diferenças de potencial devem ser consideradas perigosas dependendo de como elas se apresentem, por exemplo: o risco implícito de choque elétrico é muito parecido quando, sem a proteção devida, toca-se em uma carcaça metálica de um quadro não aterrado, não importando a distância que se esteja dele.

Os valores máximos permissíveis são estabelecidos em função do tempo de eliminação do defeito (t) e da resistividade da camada superficial do solo. Nesse sentido, ressalta-se a importância dos diferentes tipos de recobrimento do solo, tanto no interior como na periferia das instalações. Em geral, estas coberturas são: solo natural (terra ou grama), brita, concreto, asfalto, etc.

A escolha do tempo de eliminação do defeito (t) deve ser feita de forma conservativa, levando-se em conta o tipo de proteção adotado e as características dos equipamentos de proteção utilizados. Devem ser considerados dois casos: defeitos com duração determinada pelo sistema de proteção, tendo em vista a corrente permissível pelo corpo humano, ou seja, a corrente de choque de curta duração (I_{chcd}), que é definida como sendo a corrente máxima de não fibrilação (para 99,5% das pessoas de 50 kg) no intervalo de tempo $0,03 \text{ s} \leq t \leq 3 \text{ s}$. O segundo caso são os defeitos de longa duração que não sensibilizam os dispositivos de proteção considerando a corrente permissível pelo corpo humano de longa duração (I_{chld}), que é definida como a corrente provocada por uma tensão de toque ou passo devido a uma corrente de defeito de longa duração.

CORRENTE DE CHOQUE ELÉTRICO DE LONGA DURAÇÃO (I_{chld})

Esta corrente corresponde ao máximo valor de corrente que circula pelo corpo humano sem provocar fibrilação.

A fibrilação auricular é um tipo de arritmia crônica mais encontrada, durante a qual os estímulos podem ter uma frequência de até 600 batimentos por minuto. Desses estímulos, somente alguns chegam a provocar contrações dos ventrículos e uma frequência tão elevada não é compatível com a sobrevivência das pessoas acometidas, sendo que com o coração batendo mais rápido, cerca de cinco vezes mais que o normal, a pessoa chega ao óbito em pouco mais de 30 minutos, se nada for feito.

A fibrilação ventricular é ainda mais grave e só é tolerada se for de curta duração. O coração não é capaz de manter a circulação eficaz com uma frequência cardíaca muito elevada.

Se a corrente atingir diretamente o músculo cardíaco, poderá atrapalhar o seu funcionamento normal. Os impulsos periódicos que, em condições normais, regulam as contrações (também chamadas de sístole) e as expansões (diástole) são alterados. Na fibrilação, o coração bate desordenadamente, ocorrendo falha no fluxo vital de sangue ao corpo. Mesmo após a interrupção da corrente que causou a fibrilação, o fenômeno ainda continua e, na maioria dos casos, só cessa mediante o uso de um aparelho chamado “desfibrilador”.

Os valores máximos de corrente de choque de longa duração suportados pelos seres humanos são dados na Tabela 1 da ABNT NBR 15751.

Corrente limite de largar de longa duração (I_{chld})		
Porcentagem da população que suporta	Homens	Mulheres
99,5%	9 mA	6 mA
50%	16 mA	10,6 mA

Tabela 1 — Limite suportado pelos seres humanos de corrente elétrica.

CORRENTE DE CHOQUE ELÉTRICO DE CURTA DURAÇÃO (I_{chcd})

A corrente de choque de curta duração é calculada pela seguinte equação:

$$I_{chcd} = \frac{0,116}{\sqrt{t}}$$

Nesta equação, t corresponde à duração do choque. Este valor é estabelecido pela correlação feita com o tempo máximo (t_m) que o dispositivo de proteção leva para eliminar a falta. No caso de haver religamento automático, com um intervalo de tempo (t_r) inferior ou igual a 0,5 s, o tempo a ser considerado deve ser igual à soma dos tempos da falta inicial e das faltas subsequentes. Se o tempo de religamento for superior a 0,5 s, o tempo a ser considerado deverá ser o tempo máximo de uma das diversas faltas.

A Figura 1 mostra como escolher o tempo t :

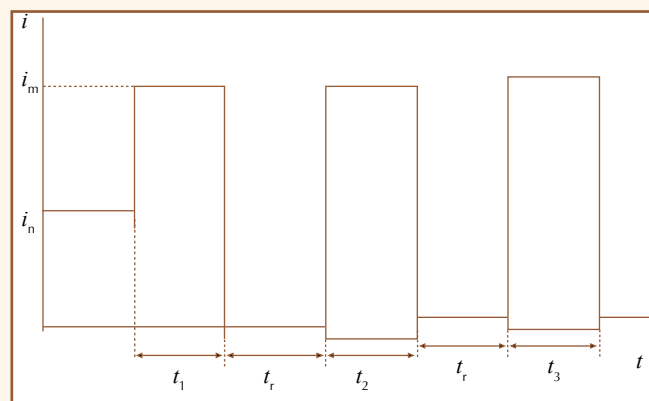


Figura 1 — Defeito com religamento.

Efeito do religamento no tempo utilizado para cálculo das tensões de passo e toque:

$$\text{se } t_r \leq 0,5 \text{ s, então } t_m = t_1 + t_2 + t_3$$

$$\text{se } t_r > 0,5 \text{ s, então } t_m = \max(t_1, t_2, t_3)$$

TENSÃO DE PASSO

Quando ocorre uma falta para a terra, a corrente de curto-circuito flui pelo aterramento. Esta passagem de corrente gera tensões no solo. A malha de aterramento deve ser projetada de tal forma que as tensões de passo na subestação e suas redondezas não atinjam valores superiores aos permissíveis.

A ABNT NBR 15751:2009 mostra a Figura 2 em que uma pessoa é representada por um circuito elétrico equivalente aos parâmetros resistivos envolvidos. A partir deste é apresentada uma equação para se definir a máxima tensão de passo permissível.

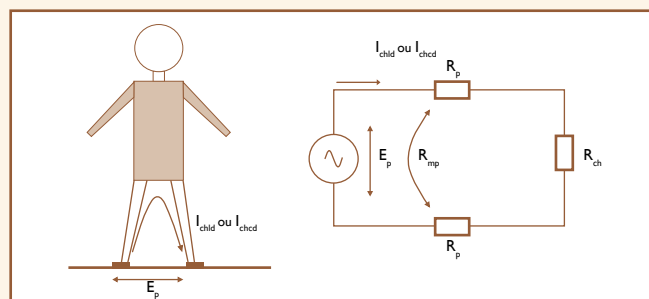


Figura 2 — Conceito de tensão de passo.

Dessa forma, a máxima tensão de passo permitível pelo corpo humano é dada pela equação:

$$E_p = [R_{ch} + 2(R_p - R_{mp})] \times I_{chcd} \text{ (V)}$$

Em que:

R_{ch} - resistência do corpo humano, adotada como sendo 1 k, expressa em ohms (Ω);

R_p - resistência própria de cada pé com relação ao terra remoto (ver definição no Capítulo I deste fascículo), expressa em ohms (Ω);

R_{mp} - resistência mútua entre dois pés, expressa em ohms (Ω);

I_{chcd} - máxima corrente de curta duração admissível pelo corpo humano, expressa em ampères (A).

As resistências próprias de cada pé e mútuas entre os pés são dadas por:

$$R_p = \left(\frac{\rho_s}{4b} \right) \times C \text{ (}\Omega\text{)}$$

$$R_{mp} = \left(\frac{\rho_s}{2 \times \pi \times R_p} \right) \text{ (}\Omega\text{)}$$

Em que:

R_{mp} - resistência mútua entre dois pés, expressa em ohms (Ω);

b - constante igual a 0,083 m (raio de um disco metálico

estabelecido como modelo para representar o pé do ser humano);

d_p - distância padronizada entre os dois pés (1 m);

ρ_s - resistividade do recobrimento da superfície do solo ($\Omega \times m$), conforme Tabela 2.

Material	Resistividade ($\Omega \times m$)	
	Seco	Molhado
Brita n. 1, 2 ou 3		3 000
Concreto	1.200 a 280.000	21 a 100
Asfalto	2×10^6 a 30×10^6	10×10^3 a 6×10^6

Tabela 2 — Resistividade do material de recobrimento (ρ_s).

Caso não haja recobrimento, utilizar resistividade da camada superficial do solo (C).

C - fator de redução que depende da espessura da camada de recobrimento. As equações para determinação deste componente são as mesmas utilizadas para a tensão de toque.

Considerando R_{mp} desprezível quando comparada a R_p , tem-se:

$$E_p = (R_{ch} + 6 \times \rho_s \times C) I_{chcd} \text{ (V)}$$

TENSÃO DE TOQUE

A tensão de toque em uma subestação acontece quando uma pessoa toca um componente energizado (não importando se em um tempo curto ou longo).

A ABNT NBR 15751 apresenta na Figura 3 uma pessoa e um componente energizado representados por um circuito elétrico equivalente com os parâmetros resistivos envolvidos. A partir deste modelo é apresentada uma equação para se definir a máxima tensão de toque permissível.

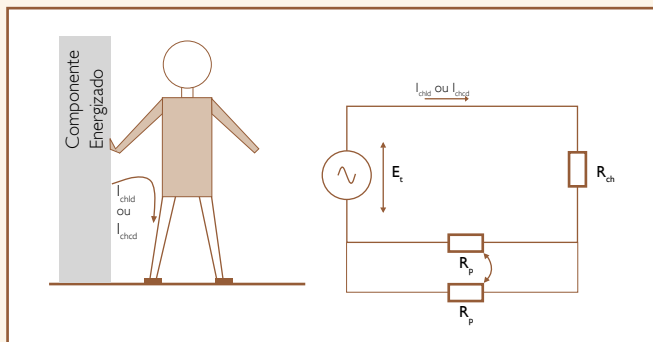


Figura 3 — Conceito de tensão de toque.

A máxima tensão de toque permissível pelo corpo humano é dada por:

- curta duração:

$$E_{tcd} = R_{ch} + \frac{(R_p + R_{mp})}{2} \times I_{chcd} \quad (V)$$

$$E_{tcd} = (R_{ch} + 1,5 \times \rho_s \times C) \times I_{chcd} \quad (V)$$

- longa duração:

$$E_{tld} = R_{ch} + \frac{(R_p + R_{mp})}{2} \times I_{chld} \quad (V)$$

$$E_{tld} = (R_{ch} + 1,5 \times \rho_s \times C) \times I_{chld} \quad (V)$$

O fator de redução C é calculado pela equação completa:

$$C = \frac{1}{0,96} \left[1 + 2 \times \sum_{n=1}^{\infty} \frac{k^n}{\sqrt{1 + \left(\frac{2 \times n \times h_s}{0,08} \right)^2}} \right]$$

ou simplificada:

$$C \cong 1 - a \times \left[\frac{1 - \frac{\rho_1}{\rho_s}}{2 \times h_s + a} \right]$$

Em que:

a é igual a 0,106 m

$$K = \frac{\rho_l - \rho_s}{\rho_l + \rho_s}$$

Legenda:

ρ_1 - resistividade da 1ª camada ($\Omega \times m$);

ρ_s - resistividade do recobrimento da camada superficial ($\Omega \times m$), conforme Tabela 2;

h_s - espessura da camada de revestimento superficial (m).

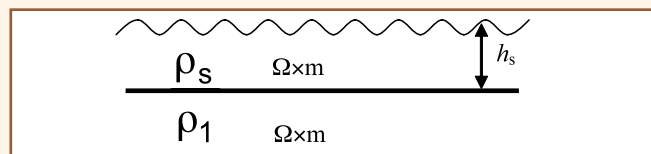


Figura 4 — Resistividade do recobrimento da camada superficial.

O fator C também pode ser determinado graficamente a partir da Figura 5.

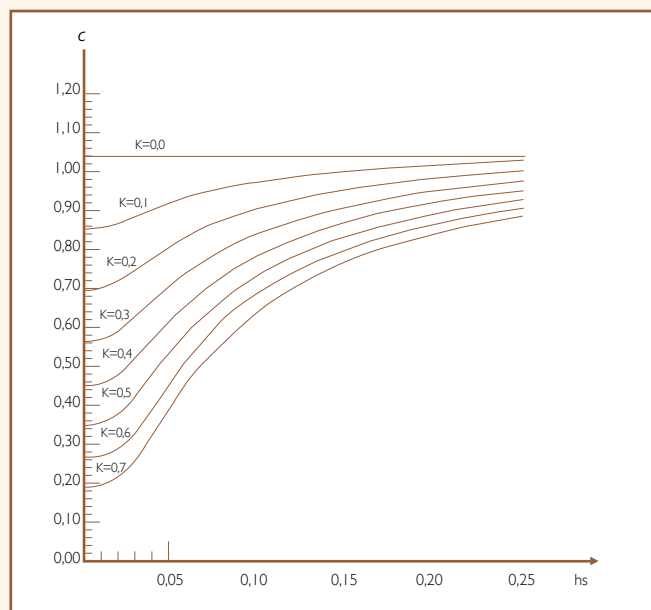


Figura 5 — Determinação gráfica do fator de redução C .

Todos os parâmetros abordados neste capítulo têm extrema importância para a confecção de um eletrodo de aterramento eficiente. Cabe informar que as equações apresentadas, geralmente, podem ser substituídas por modelos matemáticos complexos, executados em softwares que, obviamente, oferecem para quem os manipula corretamente resultados mais completos e abrangentes. Porém, o objetivo deste trabalho é o de apresentar as maneiras de cálculo básicas que cumprem o que prometem, desde que também tenham seus resultados bem interpretados quando confrontados com as diversas condições existentes do local em que a malha será instalada.

JOBSON MODENA é engenheiro electricista, membro do Comitê Brasileiro de Electricidade (Cobei), CB-3 da ABNT, em que participa atualmente como coordenador da comissão revisora da norma de proteção contra descargas atmosféricas (ABNT NBR 5419). É diretor da Guismo Engenharia.

HÉLIO SUETA é engenheiro electricista, mestre e doutor em Engenharia Elétrica, diretor da divisão de potência do IEE-USP e secretário da comissão de estudos que revisa a ABNT NBR 5419:2005.

Continua na próxima edição
Confira todos os artigos deste fascículo em www.osetoreletrico.com.br
Dúvidas, sugestões e comentários podem ser encaminhados para o e-mail redacao@atitudeeditorial.com.br