

## Capítulo II

# Projeto de eletrodos de aterramento para subestações de energia elétrica

Jobson Modena e Hélio Sueta \*

O assunto “projeto de eletrodo de aterramento (malhas) em subestações de energia elétrica” é relativamente extenso e será apresentado em mais de um capítulo. Neste, serão mostrados alguns aspectos recomendados pela norma ABNT NBR 15751-2009: Sistemas de aterramento de subestações – Requisitos. Esta norma especifica as condições para dimensionamento do sistema de aterramento de subestações de energia elétrica acima de 1 kV, quando sujeito a solicitações em frequência industrial. Além disso, a norma estabelece os limites de segurança para pessoas e instalações dentro e fora dos limites da subestação.

### *Modelagem do solo*

Um dos primeiros passos para o projeto de aterramento de uma subestação de energia elétrica é a obtenção de dados para a modelagem do solo. De forma geral, a determinação de um modelo matemático equivalente para o solo em uma dada região onde será implantada a subestação exige a realização de diversas medidas, dentre elas a execução de medições para a determinação de um parâmetro conhecido por resistividade do solo.

A resistividade do solo é definida como a resistência entre as faces opostas (ambas metálicas) de um cubo de aresta unitária, preenchido com material retirado do local. A resistividade depende do tipo, da umidade, da temperatura, da salinidade, da contaminação e da compactação do solo, entre outras variáveis. Estas medições, geralmente realizadas com um terrômetro

de quatro terminais (dois externos para corrente e dois internos para tensão), conjuntos de cabos e hastes auxiliares, devem ser realizadas em um período do ano em que a umidade no solo seja a menor possível. É importante também que, preferencialmente, o local já tenha sido terraplanado e compactado, ou seja, esteja no momento exato entre a preparação para receber as instalações e o início das obras. O ideal seria efetuar mais de um conjunto de medições em diferentes épocas do ano.

O método de ensaio mais conhecido para obtenção de valores de resistência por metro que possibilitem calcular a resistividade do solo é o “Método de medição por contato com o arranjo de Wenner”. Este método consta da NBR 7117, cujo projeto deve entrar em votação nacional ainda neste trimestre.

### *Descrição do método de medição por contato (arranjo de Wenner)*

Quatro eletrodos devem ser cravados firmemente no solo, alinhados e dispostos simetricamente em relação a um ponto de origem (A) e espaçados entre si por uma distância (d), todos a uma mesma profundidade (p).

Basicamente, pelos eletrodos externos faz-se circular corrente (I) e, entre os dois eletrodos internos, é medida a tensão (V). A relação (V/I) fornecerá a resistência (R) em ohm ( $\Omega$ ), com a qual é calculada a resistividade do solo até uma profundidade aproximadamente igual à distância (d) entre os eletrodos, segundo a equação:

$$\rho = \frac{4 \cdot \pi \cdot a \cdot \left( \frac{V}{I} \right)}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + 4b^2}} - \frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2}}} \quad (\Omega \cdot m)$$

Se  $p \leq d/10$ , a fórmula pode ser simplificada para:

$$\rho = 2 \cdot \pi \cdot d \cdot R (\Omega \cdot m)$$

Por exemplo, se o espaçamento (d) for de 4 metros e os eletrodos forem cravados a uma profundidade  $p = 20$  cm, a fórmula simplificada pode ser utilizada, mas, se o espaçamento for de 1 metro, haveria que se cravar o eletrodo a 10 cm ou menos, o que, via de regra, não é suficiente para se obter um contato adequado entre o eletrodo de ensaio e o solo.

Um conjunto de leituras na mesma direção (em linha) geralmente tomadas para  $d = 1, 2, 4, 8, 16, 32$  e se o local permitir, até 64 e 128 m, indica como varia a resistividade do solo em função da profundidade. Podem ser utilizadas distâncias intermediárias entre eletrodos desde que repetidas durante todo o ensaio.

Note que a resistência de contato dos eletrodos de potencial pode influenciar nos resultados. Em alguns instrumentos, há compensação automática para tais influências, em outros, podemos ajustar esses valores. Geralmente, os fabricantes dos instrumentos fornecem nos catálogos dos produtos as

informações necessárias.

As medições de resistividade devem cobrir toda a área em que o eletrodo (malha) for instalado. O número de pontos em que deverão ser efetuadas estas medições é função das dimensões do terreno. A nova NBR 7117 trará uma série de configurações permitidas.

A partir da análise dos resultados obtidos no local, podem ser necessárias medições com outras configurações. O maior número de dados possível a respeito do local deve ser fornecido, como tipo do solo (terraplenado, compactado), características da camada (visível), interferências encontradas, umidade do solo, clima em que se deu a medição (chuvoso ou seco); identificação com um croqui o local e as direções em que foram realizadas as medições.

Para locais com grandes dimensões, basta dividir esses locais em segmentos e repetir a prática descrita para cada fração de terreno.

Além da área, outros aspectos devem ser observados na determinação do número de medições:

- As variações nas características do solo local, devendo-se medir separadamente a resistividade nos diferentes tipos de terreno existentes;
- As variações entre os resultados obtidos nas diversas linhas de medição para uma mesma distância entre eletrodos;

- Quanto maior a discrepância entre os resultados, maior deve ser o número de linhas de medição;
- Pontos de uma mesma área em que sejam obtidos valores de resistividade com desvio superior a 50% em relação ao valor médio das medições realizadas podem vir a caracterizar uma subárea específica, devendo ser realizadas medições complementares ao seu redor para ratificação do resultado. Se isso não for possível, considerar a conveniência de descartar a linha de medição.

No caso de aterramentos em linhas de transmissão e distribuição e subestações unitárias, as medições devem ser efetuadas nas direções dos seus eixos.

A presença de elementos metálicos enterrados próximo às áreas de medição pode ocasionar erros sensíveis nos valores obtidos. Um dos fatores que indica a presença de interferências externas pode ser caracterizado pela não variação do valor da resistência medida para os diversos espaçamentos.

Devem ser considerados os seguintes critérios na análise de risco prévia ao ensaio:

- Não fazer medições sob condições atmosféricas adversas, tendo-se em vista a possibilidade da incidência de raios;
- Utilizar Equipamentos de Proteção Individual (EPIs) compatíveis com o tipo e o local da medição a ser realizada;
- Evitar que pessoas estranhas e animais se aproximem do local;
- Não tocar nos eletrodos durante a medição.

A interpretação dos resultados obtidos no campo é a parte mais crítica do processo e, conseqüentemente, necessita de maiores cuidados na sua validação. A variação da resistividade do solo pode ser grande e complexa em função da sua heterogeneidade, exceto para alguns casos pode-se estabelecer uma equivalência simples com os valores apresentados a seguir.

Esta tabela é uma fração da existente no texto do projeto da NBR 7117 e apresenta valores típicos de resistividade do solo ( $\rho$ ) em Ohm x metro ( $\Omega \cdot m$ ).

<i>Tipos de solo</i>	<i>Faixa de resistividades estimada (<math>\Omega \cdot m</math>)</i>
Água do mar	Menor do que 10
Lama, limo, húmus	Até 150
Água destilada	300
Argila	300 – 5.000
Calcário	500 – 5.000
Areia	1.000 – 8.000
Basalto	A partir de 10.000
Concreto	Molhado (*): 20 – 100
	Úmido: 300 – 1000
	Seco: 3 k $\Omega \cdot m$ – 2 M $\Omega \cdot m$

(\*) Típica de aplicação em ambientes externos, notadamente fundações e demais aplicações afins. Há que se destacar que valores inferiores a 50  $\Omega \cdot m$  devem ser considerados altamente corrosivos.

## *Estabelecendo a geometria básica da malha*

Particularmente no caso da subestação de energia elétrica, o eletrodo de aterramento é muito importante para a proteção da instalação, principalmente nas condições de falta para terra, em que os desequilíbrios causados pelas correntes de curto-circuito podem comprometer a segurança da rede elétrica, não desligando adequadamente o trecho afetado da rede.

Na subestação, o aterramento do neutro do transformador e das massas metálicas fornece um caminho de retorno de baixa impedância para essa corrente de curto-circuito, o que possibilita a maior segurança na operação da proteção. Dessa forma, o projeto do sistema de aterramento de uma subestação é definido para a condição de falta para a terra, sendo que o dimensionamento do condutor da malha está diretamente ligado à capacidade deste de suportar os esforços térmicos e dinâmicos oriundos das altas correntes de curto-circuito. Além disso, a geometria da malha deve ser adequada para que os potenciais de passo e de toque, causados pelo processo de dissipação das correntes da malha para o solo, estejam dentro de limites toleráveis e definidos pelas normas.

Vale destacar que os termos “topologia, geometria, arranjo” do eletrodo (malha) de aterramento vêm sendo distorcidos ao longo do tempo, comprometendo assim seu conceito primário, por exemplo: o item 5.1.3.1.2 da ABNT NBR 5419:2005 prescreve que “para assegurar a dispersão da corrente de descarga atmosférica na terra sem causar sobretensões perigosas, o arranjo e as dimensões do subsistema de aterramento são mais importantes que o próprio valor da resistência de aterramento. Entretanto, recomenda-se, para o caso de eletrodos não naturais, uma resistência de aproximadamente 10  $\Omega$  como forma de reduzir os gradientes de potencial no solo e a probabilidade de centelhamento perigoso. No caso de solo rochoso ou de alta resistividade, poderá não ser possível atingir valores próximos dos sugeridos. Nestes casos a solução adotada deverá ser tecnicamente justificada no projeto.” (grifo nosso).

Esta é uma condição clássica da má interpretação dos termos mencionados anteriormente, quando valores de resistência ôhmica são exigidos em detrimento da geometria do eletrodo (malha) de aterramento e da resistividade do solo em que ele está inserido. A utilização dos termos topologia, geometria ou arranjo de um eletrodo de aterramento deve ser entendida como sendo a configuração geométrica, a quantidade, a direção (horizontal, vertical ou inclinado), o espaçamento e o posicionamento dos condutores de um eletrodo (malha) de aterramento. As características mencionadas são as grandes responsáveis pela diminuição das tensões superficiais (passo e toque) perigosas em um eletrodo de aterramento e seus arredores quando massas metálicas são adequadamente interligadas a ele.

### Dimensionamento do condutor da malha

O condutor da malha de aterramento de uma subestação é dimensionado levando em conta os efeitos térmicos e mecânicos das correntes elétricas que por ele possam passar principalmente as correntes de curto-circuito.

Para o dimensionamento mecânico, a norma ABNT NBR 15751:2009 indica as bitolas mínimas para condutores de cobre e de aço, que, neste caso, devem ser protegidos contra corrosão conforme as normas aplicáveis:

- Para cobre – 50 mm<sup>2</sup>.
- Para aço (protegido contra corrosão) – 38 mm<sup>2</sup> (5/16"). Caso não haja essa proteção, a ABNT NBR 5410:2008 e a ABNT NBR 5419:2005 determinam uma seção transversal mínima de 80 mm<sup>2</sup>.

*Ao adquirir cabos de cobre, especialmente para esta finalidade (corrosão), é necessária uma verificação criteriosa, pois existem no mercado cabos sendo comercializados como "genéricos ou não normalizados", cuja seção transversal real é bem inferior ao prescrito nas normas, por exemplo, para cabos de cobre de seção 50mm<sup>2</sup>. A "versão genérica" possui seção inferior a 32 mm<sup>2</sup>, comprometendo, dentre outros, o quesito tratado.*

Para o dimensionamento térmico, a ABNT NBR 15751 fornece a equação de Onderdonk, que permite o cálculo da seção do condutor.

O condutor da malha de aterramento deve ter uma seção (S) capaz de suportar a circulação de uma corrente máxima (I<sub>f</sub>), em quiloampères, durante um tempo (t) em que a temperatura se eleve acima de um valor-limite suportável (T<sub>m</sub>), considerando uma temperatura ambiente (T<sub>a</sub>) e que toda energia térmica fica retida no condutor devido à pequena duração da corrente de curto-circuito.

A equação de Onderdonk é dada por:

$$S = I_f \sqrt{\frac{t \times \alpha_r \times \rho_t \times 10^4}{TCAP \times \ln\left(\frac{k_0 + T_m}{k_0 + T_a}\right)}}$$

Em que:

- S** é a seção expressa em milímetros quadrados (mm<sup>2</sup>);  
**I<sub>f</sub>** é a corrente de falta fase-terra expressa em quiloampères (kA);  
**t** é o tempo expresso em segundos (s);  
**α<sub>t</sub>** é o coeficiente térmico de resistividade do condutor a t °C (°C<sup>-1</sup>);  
**ρ<sub>t</sub>** é a resistividade do condutor de aterramento a t °C expressa em ohm x centímetro (Ω x cm);  
**TCAP** é o fator de capacidade térmica em joule por centímetro cúbico vezes graus Celsius [J/(cm<sup>3</sup> x °C)];  
**T<sub>m</sub>** é a temperatura máxima suportável expressa em graus Celsius (°C), conforme Tabela 1;  
**T<sub>a</sub>** é a temperatura ambiente expressa em graus Celsius (°C);  
**k<sub>0</sub>** = 1/α<sub>0</sub> ou (1/α<sub>r</sub>) - T<sub>r</sub> ;  
**k<sub>0</sub>** é o coeficiente térmico de resistividade do condutor a 0 °C;  
**T<sub>r</sub>** é a temperatura de referência das constantes do material em graus Celsius (°C).

A norma apresenta ainda a Tabela 1 – Valores dos parâmetros para tipos de condutores mais utilizados em malhas de aterramentos.

Alguns parâmetros e simplificações possíveis dependem das conexões existentes na malha. Um destes parâmetros é T<sub>m</sub> que é obtido na ABNT NBR 15751 – Tabela 2 – Tipos de conexões e seus limites máximos de temperatura.

Conexão	T <sub>m</sub> °C
Mecânica (aparafusada ou por pressão)	250
Emenda tipo solda oxiacetilênica	450
Emenda com solda exotérmica	850 <sup>a</sup>
Emenda à compressão	850 <sup>b</sup>

<sup>a</sup> Solda exotérmica, conhecida como aluminotermia, cuja conexão é feita através da fusão obtida pela ignição e combustão de uma formulação em um molde.  
<sup>b</sup> Obtida por meio de conectores com compressão por ferramenta hidráulica.

**ABNT NBR 15751 – Tabela 2 – Tipos de conexões e seus limites máximos de temperatura.**

Tipo do condutor	Condutância	Coeficiente térmico de resistividade		Temperatura de fusão <sup>a</sup> (°C)	Resistividade (20 °C)	TCAP [J/(cm <sup>3</sup> x°C)]
	%	α <sub>0</sub> (0 °C)	α <sub>t</sub> (20 °C)			
Cobre (macio)	100,0	0,004 27	0,003 93	1 083	1,724	3,422
Cobre (duro)	97,0	0,004 13	0,003 81	1 084	1,777	3,422
Aço cobreado 40%	40,0	0,004 08	0,003 78	1 084	4,397	3,846
Aço cobreado 30%	30,0	0,004 08	0,003 78	1 084	5,862	3,846
Haste de aço cobreado <sup>a</sup>	20,0	0,004 08	0,003 78	1 084	8,62	3,846
Fio de alumínio	61,0	0,004 39	0,004 03	657	2,862	2,556
Liga de alumínio 5005	53,5	0,003 80	0,003 53	660	3,222	2,598
Liga de alumínio 6201	52,5	0,003 73	0,003 47	660	3,284	2,598
Aço-alumínio	20,3	0,003 88	0,003 60	660	8,480	2,670
Aço 1020	10,8	0,001 65	0,001 60	1 510	15,90	3,28
Haste de aço <sup>b</sup>	9,8	0,001 65	0,001 60	1 400	17,50	4,44
Aço zincado	8,5	0,003 41	0,003 20	419	20,1	3,931
Aço inoxidável 304	2,4	0,001 34	0,001 30	1 400	72,0	4,032

<sup>a</sup> Aço cobreado baseado em uma espessura de 254 µm de cobre.  
<sup>b</sup> Aço inoxidável baseado em 508 µm no 304 de espessura sobre o aço 1020.

**ABNT NBR 15751 – Tabela 1 – Valores dos parâmetros para tipos de condutores mais utilizados em malhas de aterramentos.**

A norma apresenta também a Tabela 3 – Constantes  $K_f$ , que mostra os valores deste parâmetro para as conexões mais utilizadas e que possibilita uma simplificação da equação de Onderdonk.

Dessa forma, pode-se utilizar a seguinte equação para a determinação da seção do condutor:

$$S = I_f \times K_f \times \sqrt{t}$$

Em que:

$K_f$  é a constante para materiais considerando temperatura ambiente ( $T_a$ ) de 40 °C.

Conexão	$k_f$
Mecânica (aparafusada ou por pressão)	11,5
Emenda tipo solda oxiacetilênica	9,2
Emenda com solda exotérmica	7,5
Emenda à compressão*	7,5

\* Obtida por meio de conectores com compressão por ferramenta hidráulica.

#### ABNT NBR 15751 - Tabela 3 – Constantes $K_f$

As equações para o dimensionamento dos condutores indicam a corrente de curto-circuito plena ( $I_p$ ). Na ocorrência de uma falta para terra, esta corrente irá circular pelo condutor de aterramento (rabicho) no ponto de ocorrência do curto-circuito e, ao chegar à malha, se subdividirá pelos diversos ramos da malha, proporcionalmente às resistências equivalentes no ponto de injeção da corrente. Dessa forma, existe a possibilidade de utilização de condutores de malha

dimensionados para correntes inferiores à corrente de curto-circuito plena.

Nos casos em que a temperatura de fusão da conexão for inferior à temperatura de fusão do condutor, utiliza-se a temperatura da conexão no cálculo da constante  $K_f$ . Na Tabela 3 encontramos os valores de  $K_f$  para o cobre, considerando o limite de fusão da conexão.

Uma vez calculada a seção do condutor, tanto considerando o efeito mecânico como o térmico, deve-se utilizar o maior valor encontrado, sempre a favor da segurança.

O tempo  $t$  deve ser escolhido de forma conservativa. Ele corresponde ao tempo de eliminação do defeito e influi diretamente nos potenciais toleráveis de passo e toque.

Como se pode notar, o assunto tratado neste fascículo terá complementação em diversas ramificações descritas em fascículos futuros. Até lá.

*JOBSON MODENA é engenheiro eletricista, membro do Comitê Brasileiro de Eletricidade (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 eletricista, 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](http://www.osetoreletrico.com.br)  
Dúvidas, sugestões e comentários podem ser encaminhados para o e-mail [redacao@atitudeeditorial.com.br](mailto:redacao@atitudeeditorial.com.br)