Por Galeno Lemos Gomes*

Análise comparativa da utilização em sistemas de aterramento de condutores de cobre, aço-cobre e aço galvanizado

Parte 1

Atualmente, são utilizados em sistemas de aterramento os seguintes materiais: cobre, aço galvanizado e bimetálicos. O cobre tem sido largamente utilizado por suas excepcionais características, elétricas e mecânicas, enquanto o aço galvanizado utilizado pela sua característica mecânica e por seu baixo custo. Já os elementos bimetálicos aparecem nas hastes de aterramento de aço-cobreado, assim como nos condutores de aço-cobre, oferecendo uma excelente alternativa ao cobre e ao aço galvanizado. Aqui ressalto o desconhecimento de muitos sobre a possibilidade da substituição dos condutores de cobre por condutores aço-cobre, apesar de sua utilização pelas principais concessionárias de energia há décadas. Possivelmente, existe também falta de conhecimento em relação ao dimensionamento dos cabos de aço-cobre e equivalência das seções transversais com relação ao cobre nu.Perguntas constantes entre os projetistas são descritas a seguir:

Se tivermos uma malha de aterramento de uma subestação com seção transversal de 70mm² em cobre, dimensionada para uma determinada corrente de curto-circuito (Icc) e tempo de eliminação da falta de 0,5s (30 ciclos), poderíamos substituir esses condutores por condutores de aço-cobre de mesma seção transversal ou teríamos que aumentá-la devido ao seu núcleo de aço? E como ficam os aspectos relativos à corrosão? Quais seriam as vantagens em substituir o cabo de cobre por aço-cobre?

Espero auxiliá-los nas respostas a estas e outras perguntas, durante a leitura do presente artigo.

Comparação entre cobre, aço galvanizado e aço-cobre

Aspectos elétricos

Para a análise do comportamento dos condutores, hastes e conexões de aterramento, do ponto de vista de solicitações elétricas, devemos considerar dois casos típicos:

1 - As solicitações causadas pelas correntes de curto-circuito (Icc), levando em consideração a amplitude e o tempo de circulação das mesmas;
2 - As solicitações causadas pelas correntes associadas às descargas atmosféricas (raios), também levando em consideração a amplitude, forma de onda e os tempos de atuação.

Inicialmente, iremos analisar as solicitações causadas pelas correntes de curto-circuito. Um dos pontos de fundamental importância, além dos aspectos relacionados à corrosão causada pela heterogeneidade de metais e eletrólitos por ação das correntes dispersas ou por diferença de concentração de oxigênio, é o correto dimensionamento da seção dos condutores de aterramento (determinação adequada da bitola). Portanto, com o objetivo de obtermos um sistema de aterramento confiável quanto à capacidade de condução de corrente e desempenho compatível com os sistemas elétricos atuais, devemos cumprir basicamente as seguintes premissas:

- Ter capacidade adequada de condução de corrente de falta (curto-circuito), isto é, dimensionar a seção transversal com ampacidade adequada, levando em consideração não só a amplitude da corrente, como também o tempo de duração que esta corrente solicita do sistema. E, havendo religamento automático, o que é comum, a respectiva sequência de operações também deve ser criteriosamente considerada no dimensionamento, como será visto em exemplos ilustrativos no decorrer deste artigo;
- Ter um tempo de vida útil compatível com o tempo de vida do sistema elétrico no qual ele está conectado, condição esta dependente do dimensionamento e dos aspectos relativos à resistência à corrosão dos materiais utilizados;
- Proporcionar segurança adequada às pessoas e aos equipamentos que compõem o sistema elétrico no qual está conectado de forma permanente;
- Proporcionar um valor de resistência de aterramento operativa em Ohms calculada, levando em consideração as características

próprias de cada sistema elétrico e as características de cada dispositivo de proteção que está sendo utilizado neste sistema elétrico;

• Um valor de resistência de aterramento operativa, o mais invariável possível, independentemente das condições climáticas.

Cálculo da seção transversal dos condutores em sistemas de aterramento levando em consideração o tipo de material utilizado

O curto espaço de tempo que a corrente de defeito Icc circula pelo condutor de aterramento faz com que praticamente toda elevação de temperatura gerada por efeito joule (I^2 R), fique armazenada na massa do próprio condutor, elevando a sua temperatura. O correto dimensionamento da seção transversal deve considerar principalmente a limitação desta temperatura a valores que não possam causar alterações nas características mecânicas destes condutores. Na equação que será apresentada para o adequado dimensionamento serão considerados os seguintes fatores principais:

a) Temperatura máxima permitida, a qual pode ser alcançada pelo material que é utilizado no condutor para que as suas características mecânicas não sofram alteração (Tm);
b) Tempo de duração da corrente de defeito em segundos e, se houver religamento, os mesmos deverão ser levados em consideração (t);
c) Temperatura inicial (Ti), normalmente a ambiente;
d) Valor da corrente de falha (curto-circuito) em Amperes (I);
e) Tipo de conexão utilizada.

Temperaturas máximas permitidas pelos condutrores em função do material

Testes feitos em laboratório [1] demonstraram que os fios e cabos aço-cobre recozidos podem ser aquecidos por correntes de curto-circuito, sem maiores problemas até 800 °C, perdendo a rigidez mecânica com 850°C, enquanto os condutores de cobre tornam-se moles (perdem a rigidez mecânica) a partir de 450 °C. Na Tabela I estão representados os valores mais usualmente adotados para a temperatura máxima dos condutores. Cabe observar que estes foram obtidos por meio de ensaios laboratoriais na década de 1980-1990. Estamos sugerindo que os mesmos sejam repetidos, com condutores fabricados atualmente e com a utilização de técnicas e materiais atuais.

Tabela I - Valores usualmente adotados para a temperatura máxima dos condutores

MATERIAL	TEMPERATURA MÁXIMA	FATOR LIMITANTE
COBRE	450ºC	PERDA DA RIGIDEZ MECÂNICA
AÇO-COBRE	850ºC	PERDA DA RIGIDEZ MECÂNICA
AÇO GALVANIZADO	419ºC	TEMPERATURA DE FUSÃO DO ZINCO

Tempo de eliminação da falha

Um outro fator determinante no dimensionamento da seção transversal dos condutores de aterramento é o tempo (t) que a corrente de falta (Icc) permanece circulando por estes condutores, pois a temperatura dos mesmos irá se elevar por efeito Joule, sendo que esta elevação de temperatura não poderá ultrapassar a temperatura máxima característica de cada material de que o mesmo é fabricado, para que a sua rigidez mecânica não fique comprometida (Tabela I). Para o dimensionamento teremos que utilizar uma equação que leve em conta este tempo (t), entre outros fatores, como será visto na sequência do artigo.

Cabe observar que levando em consideração que os tempos de resposta da proteção dinâmica dos modernos disjuntores estão na faixa dos 0,05 a 0,1 segundos, e os tempos de resposta da proteção estática são no máximo igual a 0,5 segundos, podemos dizer que na falta de informações mais precisas deste tempo (t) de eliminação da falta fornecida pelos responsáveis pela calibração das proteções, um tempo de eliminação da falta igual a 0,5 segundos pode ser utilizado. Considerando o sistema elétrico possuindo religamento automático, conforme esquematizado na Figura 1.

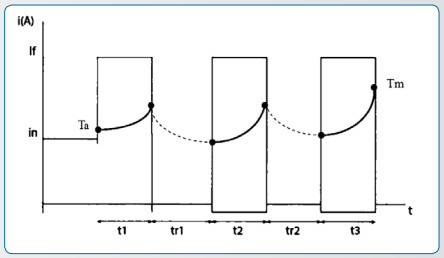

Figura 1 – Defeito com religamento automático [2].

Temos:

Ta = Temperatura inicial, normalmente ambiente assumida igual a 40 °C.

Tm = Temperatura máxima que pode ser atingida pelo condutor após todos os desligamentos e religamentos, a qual deve ser menor do que a temperatura máxima característica de cada material de que é fabricado o respectivo condutor, no caso do cobre Tm = 450 °C, assumir no dimensionamento Tm = 400 °C, para o aço-cobre Tm = 850° C, assumir Tm = 800 °C e finalmente para o aço galvanizado Tm = 419 °C assumir Tm = 369 °C (sugestão do autor: menos 50°C em relação à Tm, temperatura máxima que os mesmos perdem a rigidez mecânica, à favor da segurança).

t1, t2 e t3: São os tempos que a corrente de defeito circula pelo condutor, aquecendo-o.

tr1, tr2 e tr3: São os tempos gastos para os religamentos.

Nota: Os tempos de religamento deveriam ser todos maiores do que 2 segundos, pois este é o tempo que se assume como necessário para que os efeitos perturbadores do primeiro choque sejam atenuados/eliminados nos seres humanos,

permitindo assim uma reação. Porém este intervalo de tempo nem sempre é observado.

O tempo (t) que deveremos considerar como sendo o da duração da corrente de defeito no condutor de aterramento deve obedecer às seguintes regras [2]:

a) Se o intervalo de tempo entre os religamentos (tr) for menor ou igual a 0,5 segundos o tempo (t) a ser considerado para o cálculo da seção transversal dos condutores de aterramento deve ser a soma dos tempos, isto é (t1) + (t2) + (t3).
b) Se os intervalos de tempo antes dos religamentos forem maiores do que 0,5 segundos, o tempo (t) a ser utilizado para o cálculo deverá ser o maior dos tempos durante o qual a corrente de defeito permanece circulando.

Conexões dos componentes de um sistema de aterramento

O tipo de conexão utilizada nos sistemas de aterramento tem influência significativa no cálculo da seção transversal dos condutores deste sistema, detalhe que nem sempre é observado na prática. Ou seja, se em um projeto de aterramento ao invés da utilização de conexões à compressão por meio de ferramenta hidráulica, as mesmas forem executadas por solda tipo oxiacetilênica, a seção dos condutores deverá ser obrigatoriamente aumentada para que não haja a um aquecimento inadequado, e até fusão dos mesmos no caso de um curto-circuito. A tabela II nos informa os limites máximos de temperatura em função do tipo de conexão utilizada.

Equação para o dimensionamento térmico da seção transversal dos condutores de aterramento

Por ser um dos pontos que tem suscitado mais dúvidas quando se pensa em substituir os condutores de cobre pelos de aço-cobre, torna-se necessário e importante apresentar a equação para a determinação das seções transversais dos referidos condutores. A capacidade que um dado condutor de aterramento tem para dissipar para a terra intensidades de corrente de defeito, curto-circuito, é calculada em função do que estabelece o princípio termodinâmico de equivalência entre calor e trabalho. Em face dos tempos desta dissipação serem geralmente muito curtos, praticamente todo o trabalho elétrico gera calor que se armazena integralmente na massa do condutor, elevando a sua temperatura até um valor, considerado de segurança em relação as suas características mecânicas.

A equação 1 permitirá estabelecer a seção transversal na qual a corrente de defeito poderá circular durante determinado tempo, sem que a temperatura ultrapasse o chamado valor de segurança, constantes na tabela III para os condutores que estão sendo comparados.

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

Em que:

S = a seção, expressa em milímetros quadrados (mm^2);

I_t = a corrente de falta fase-terra, expressa em quilo ampères (kA);

t = o tempo, expresso em segundos (s);

α_r = o coeficiente térmico de resistividade do condutor a t °C (°C-1);

P_t = a resistividade do condutor de aterramento a t °C, expressa em ohm x centímetro (Ω × cm);

TCAP = o fator de capacidade térmica, em joule por centímetro cúbico vezes graus Celsius [J/(cm^3×°C)];

T_m = a temperatura máxima suportável, expressa em graus Celsius (°C), conforme Tabela 1;

T_a = a temperatura ambiente, expressa em graus Celsius (°C);

$k_0 = 1/\alpha_0$ ou $(1/\alpha_r) - T_r$;

K_0 = o coeficiente térmico de resistividade do condutor a 0 °C;

Tr = é a temperatura de referência das constantes do material, em graus Celsius.

Tabela II – Tipos de conexões e seus limites máximos de temperatura [2]

CONEXÃO	TEMPERATURA MÁXIMA EM GRAUS CELSIUS (°C)
Mecânica (parafusada ou por pressão)	250
Emenda tipo solda oxiacetilênica	450
Emenda com solda exotérmica	850 (a)
Emenda por compressão	850 (b)

Tabela II – Tipos de conexões e seus limites máximos de temperatura [2]

Tipo do condutor	Condutibilidade	Coeficiente térmico de resistividade		Temperatura de fusão	Resistividade	TCAP
	%	α_0(0°C)	α_r(20°C)	°C	ρ_r(20°C) em (μΩ.cm)	[J/ (cm^3 °C)]
Cobre (macio)	100,0	0,00427	0,00393	1083	1,724	3,422
Cobre (duro)	97,0	0,00413	0,00381	1084	1,777	3,422
Aço-cobre 53%	53,0	0,00408	0,00378	1084	3,318	3,846
Aço-cobre 40%	40,0	0,00408	0,00378	1084	4,397	3,846
Aço-cobre 30%	30,0	0,00408	0,00378	1084	5,862	3,846
Aço-cobre 21%	21,0	0,00408	0,00378	1084	8,374	3,846
Aço carbono zincado	8,5	0,00134	0,00130	419	20,1	3,931

Tabela IV – Condutividade X formação bimetálica

IACS	21%	30%	40%	53%
Área do cobre	14%	25%	35%	49%
Área do aço	86%	75%	65%	51%

Questionamento

"Ao substituirmos os condutores de aterramento de cobre nu por condutores de aço-cobre, precisamos aumentar as seções transversais dos mesmos, calculadas em função da corrente de defeito e dos tempos de eliminação da falta?"

A resposta é: NÃO. Podemos perfeitamente fazer a substituição pelos condutores de aço-cobre sem ter que alterar a seção transversal anteriormente calculada. Objetivando provar através de cálculo, faremos o exemplo ilustrativo:

Em uma subestação cujo sistema de proteção atua na sequência em conformidade com o da Figura 2, calcular a bitola de um condutor da malha de aterramento da referida subestação, utilizando inicialmente cobre macio, com a opção de utilizar nas mesmas condições condutor de aço-cobre. As conexões da malha serão à compressão por ferramenta hidráulica:

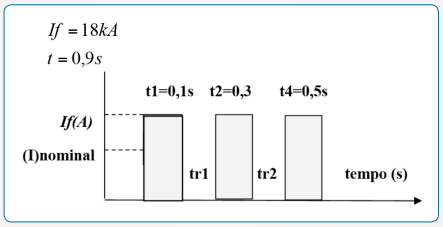

Figura 2 - Defeito com religamento [2].

tr1 = tr2 ≤ 0,5s (Tr = tempo de religamento)

Quando o tempo de religamento (Tr) for menor ou igual a 0,5 segundos, o tempo (t) deverá ser igual à soma dos tempos que o sistema permanece energizado, no caso:

t1+t2+t3 = 0,1+0,2+0,3 = 0,9 s

Cálculo da bitola dos condutores utilizando cobre macio:

$$If = 18kA = 18.000A$$
$$t = 0{,}9s$$
$$\alpha r = 0{,}00393$$
$$\rho r = 1{,}724$$
$$k_0 = 234$$
$$TCAP = 3{,}422$$

O que nos leva à seguinte seção do condutor, com (Tm) = 400 °C:

$$S = 18 \times \sqrt{\frac{0{,}9 \times 0{,}00393 \times 1{,}724 \times 10^4}{3{,}422 \times \ln \frac{234+400}{234+40}}} mm^2 = 82{,}95 mm^2$$

Adotar bitola 95 mm², cobre macio, classe 3, 19 fios (cobre nu).

Cálculo da seção transversal dos condutores utilizando aço-cobre 53%, conforme a tabela IV.

$$If = 18kA = 18.000A$$
$$t = 0{,}9s$$
$$\alpha r = 0{,}00378$$
$$\rho r = 3{,}318$$
$$k_0 = 245 = \frac{1}{0{,}00408}$$
$$TCAP = 3{,}846$$
$$S = 18 \times \sqrt{\frac{0{,}9 \times 0{,}00378 \times 3{,}318 \times 10^4}{3{,}846 \times \ln \left[\frac{(245+800)}{(245+40)}\right]}} mm^2 = 85{,}55 mm^2$$

Adotar bitola 95mm², aço-cobre 53% IACS

Aspectos mecânicos

Os condutores utilizados em sistemas de aterramento, além do dimensionamento térmico, devem ser escolhidos em termos de seção transversal considerando as solicitações mecânicas. Como há bem pouco tempo não existia nem uma norma brasileira ou um critério uniforme caracterizando a bitola mínima de condutores de aterramento considerando as condições mecânicas, diversas bitolas eram utilizadas como mínimas, tais como 1/0 ou 2/0 AWG para o cobre com conexões soldadas ou mecânicas respectivamente. Posteriormente constatou-se que grande parte da indústria adotava bitola 4/0 AWG para o cobre.

Atualmente, na norma ABNT NBR 15751:2013 [2], temos as bitolas mínimas que por razões mecânicas devem ser observadas como as seguintes:

- Cobre - 50mm²
- Aço (protegido contra à corrosão de acordo com as normas aplicáveis) - 38mm² (5/16").

Sugestão do autor: como bitolas mínimas em sistemas de aterramento:

- Cobre – 50 mm²
- Aço-cobre - 50 mm²
- Aço galvanizado - 70 mm².

Cabe observar que quaisquer que sejam os critérios adotados, se houver possibilidade de reduzir a bitola ao substituir os condutores de cobre por aço-cobre não haverá prejuízo da resistência mecânica, conforme comprovam as Tabelas V e VI. Observa-se que condutores aço-cobre se comportam melhor perante o esmagamento e ao cisalhamento em comparação com os de cobre.

Tabela V – Dureza Brinnel

MATERIAL	RECOZIDO	DURO
Cobre	45	100
Aço	150	400

Tabela VI Cizalhamento (kg/mm²)

MATERIAL	RECOZIDO	DURO
Cobre	16	20
Aço	37	47

Referências

[1] - "Aplicação de fios e cabos Copperweld em sistemas de aterramento" – Companhia Energética de São Paulo – CESP - (DEP/P-634 - Engº José A. M. Leon.

[2] - ABNT NBR 15751:13 – Sistemas de aterramento de subestações – Requisitos.

[3] - "Dimensionamento de prumadas de aterramento em redes e distribuição" Roberval Rodrigues da Copperico Bimetálicos.

[4] -Revista Setor Elétrico /outubro de 2019- CINASE-TEC "Análise da qualidade dos materiais utilizados em sistemas de aterramento de linhas de transmissão, com úteis aplicações dos condutores bimetálicos" pp73-77 - Eng. Galeno Lemos Gomes.

[5] - "Análise comparativa da utilização dos cabos Copperweld em malhas de terra de subestações" CESP/Copperico.

[6] -Revista Mundo Elétrico- set.1981- pp 41-44 "Fios contrapeso de aço revestido de cobre para linhas de transmissão" – Copperico.

Galeno Lemos Gomes é engenheiro eletricista e de segurança do trabalho, MsD em Educação Técnica pela Universidade de Oklahoma (USA) e Sócio Gerente Técnico da Empresa Galeno Gomes Engenharia Consultoria e treinamento Ltda. É ainda professor dos cursos: Sistemas de Aterramento Projeto, construção, medições e manutenção (ABNT), Aterramento e Sistemas de proteção Contra Descargas Atmosféricas e de equipamentos Eletromecânicos Sensíveis (ETI). (aterramento@galenoengenharia.com.br)

Este artigo continua na próxima edição.