Por Galeno Lemos Gomes*

SUBESTAÇÕES: CONDUTORES BIMETÁLICOS PARA A REDUÇÃO DA CORRENTE DE MALHA

O uso de condutores bimetálicos como uma alternativa para a redução da corrente de malha (Im) e em consequência da diminuição das diferenças de potencial internas e externas às malhas de aterramento das subestações

Introdução

Subestações localizadas em áreas urbanas densamente povoadas ou em locais em que as suas correntes de defeito (If) (curto-circuito fase-terra) possam provocar, por acoplamento resistivo, não só interferências indesejáveis aos equipamentos, como também elevados valores de diferença de potencial internamente e externamente aos limites da subestação e da própria malha de aterramento causados pela elevação máxima de potencial do próprio sistema de aterramento em relação ao terra remoto, podendo em consequência comprometer a segurança de pessoas e animais. Torna-se por estes motivos importante observarmos durante um defeito típico, curto-circuito fase-terra, como e qual o valor desta corrente de sequência zero que irá retornar à sua fonte por diversos caminhos inclusive pela terra, sendo esta última denominada de corrente de malha (Im), que irá produzir diferenças de potencial não só internamente à subestação mas também externamente a mesma. A Figura 1 nos dá uma ideia das diversas correntes que circulam durante um curto-circuito fase – terra em uma subestação típica. Na Figura 2 estão representadas as diferenças de potencial internas e externas, geradas devido à corrente de malha (Im) circulando pelo solo no sentido de sua fonte, neutro do transformado (Tr1), situado na subestação alimentadora.

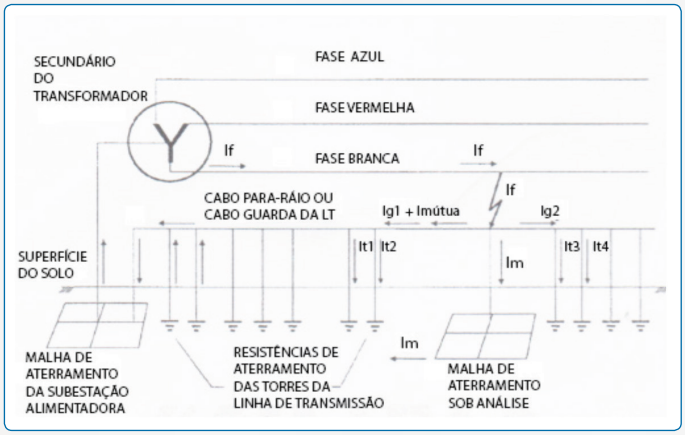

Figura 1- Defeito típico (curto- fase terra) em uma subestação.

Na Figura 1 estão representadas as correntes, total de defeito (If) a corrente de malha (Im) e as correntes que irão circular pelo circuito composto pelos cabos para-raios e torres da linha de transmissão (LT). Cabe observar que devido ao acoplamento magnético entre a fase em condição de defeito e os cabos para-raios, a corrente que irá circular por eles pode ser decomposto em duas parcelas: a parcela devido à indução pelo acoplamento (Imútua) e a corrente devido à impedância dos cabos para-raios multiaterrados (I1) e (I2).

Na Figura 2, as linhas pontilhadas representam as equipotenciais internas e externas à malha de aterramento típica de uma subestação. E na seção transversal (corte A-A) está representado de maneira aproximada a circulação da corrente de malha (Im).

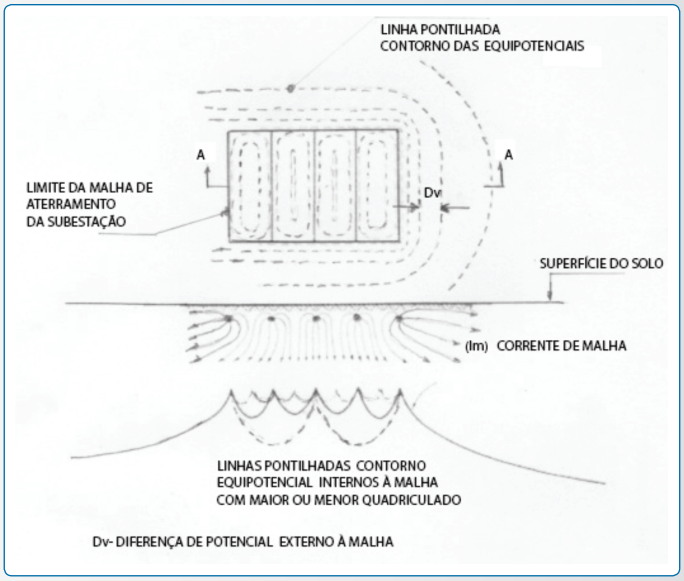

Figura 2- Em pontilhado, as curvas equipotenciais dentro e fora dos limites de uma subestação com defeito típico - curto-circuito fase-terra, malha de aterramento retangular.

O valor em volts da elevação máxima de potencial do próprio sistema de aterramento em relação ao terra remoto, elevações estas fora da malha de aterramento da subestação, normalmente nos projetos usuais não é estabelecido nenhum valor máximo limitador. Esse valor não consta claramente em norma, o que gera um certo descaso em termos de serem sugeridos certos cuidados em termos do que pode acontecer externamente à malha de aterramento da subestação, não só com relação às interferências causadas pelo acoplamento resistivo com elementos metálicos próximos como também com a geração de diferenças de potencial além dos limites em relação às pessoas e animais, principalmente em solos com resistividade de valor elevado.

Questionamentos

Na prática duas questões surgem, sendo a primeira: Como minimizar as diferenças de potencial que surgem externamente à subestação e sua respectiva malha, as quais normalmente causam as interferências indesejadas, ou por acoplamento resistivo a elementos metálicos próximos ou mesmo pelos valores das diferenças de potencial , em certos casos elevados e externos à mesma?

A segunda pergunta que nos vem a mente é: Como manter as diferenças de potencial internamente à subestação menores ou no máximo iguais aos valores máximos admissíveis pelo corpo humano?

Respostas aos questionamentos:

Com relação à primeira pergunta, dentre alguns dos métodos temos um no qual é feita a substituição das cordoalhas de aço galvanizado normalmente utilizadas nos cabos para-raios (cabos guarda) das

linhas de transmissão que chegam na subestação e que normalmente são interligadas à malha de aterramento da mesma, por condutores bimetálicos de aço-cobre ou aço-alumínio. Essa solução nos possibilita a diminuição do valor da corrente de malha (Im), a qual é a principal responsável não só pelas diferenças de potencial externamente às malhas das subestações, como também é um dos parâmetros de proporcionalidade nas equações de cálculo dos potenciais nos pontos mais críticos na própria malha como iremos ver resumidamente nos parágrafos seguintes.

Na norma brasileira ABNT NBR 8449, válida desde 30 de abril de 1984, e confirmada em 18 outubro de 2016 pelo CB- 003 Eletricidade da ABNT [7], consta um método aproximado que nos permite calcular em função da corrente de defeito total (If) as correntes que irão circular pelo cabo guarda (Ig) e pela terra (Im) em função do tipo dos materiais utilizados no cabo para-raios (cabos guarda) das linhas de transmissão que chegam na subestação de interesse.

É importante observar que a determinação exata desta distribuição das correntes envolve cálculos complexos que geralmente exigem o uso de computadores com a consideração de todos os elementos metálicos conectados à malha, tais como além dos cabos para-raios e aterramentos das torres da linha de transmissão, blindagem dos eventuais cabos de energia, neutro multiaterrados de linhas de distribuição, malhas de subestações vizinhas e similares.

O método aproximado citado é aceitável para ilustrar o que está sendo proposto no artigo, que é basicamente o de sugerir uma alternativa visando a diminuição do valor da corrente de malha (Im) mediante a substituição do material utilizado nos cabos para-raios.

A figura 3 representa um trecho de uma linha de transmissão típica na saída de uma subestação, onde (Rs) é a resistência de aterramento operativo da malha da subestação e (Rp) são as resistência de aterramento dos pés das torres da citada linha, sendo (r) a resistência do trecho do cabo para-raios (cabo guarda) entre dois suportes adjacentes, normalmente calculado para o vão médio da linha de transmissão.

A norma citada apresenta equações aproximadas para que, em função da corrente de defeito (If), seja executado o cálculo da corrente

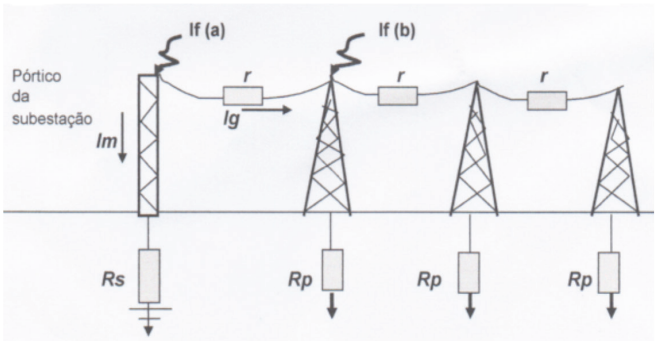

Figura 3 - Trecho de uma linha de transmissão conectada no pórtico metálico de uma subestação.

(Ig) e como consequência (Im) quando de um curto-circuito fase – terra acontecer em um dos seguintes pontos: na subestação, no primeiro suporte (torre) da linha de transmissão e em um ponto médio da linha de transmissão.

O valor em amperes destas correntes variam conforme o ponto que se dá curto-circuito fase-terra e, como normalmente os maiores valores se verificam nas extremidades, isto é, próximo das subestações, analisaremos na presente ilustração somente o caso de um curto-circuito fase-terra no pórtico de entrada da subestação.

Curto-circuito fase-terra no pórtico de entrada da subestação, if (a) na Figuras 3, a Figura 4 representa o circuito equivalente para a respectiva falta (curto-circuito monofásico fase-terra) na subestação:

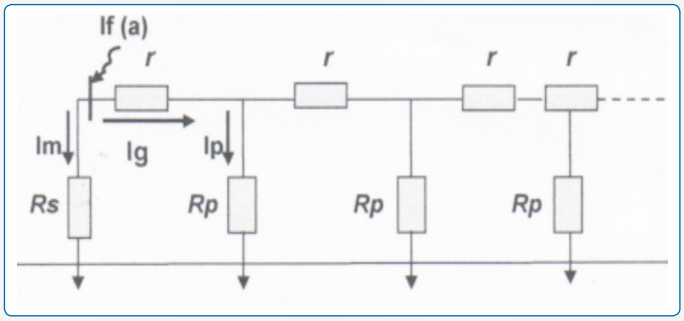

Figura 4 - Curto-circuito monofásico no pórtico de entrada da subestação.

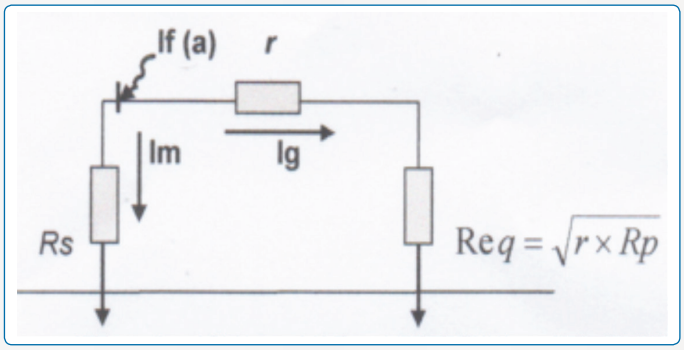

Figura 5 - Circuito equivalente ao circuito da figura 4.

Sendo:

Im= corrente de malha em amperes;

Ig= corrente no cabo para-raios (cabo guarda) em amperes;

If= corrente de curto-circuito monofásico total fase-terra em amperes;

Ip= corrente na primeira estrutura em amperes;

Rs= resistência de aterramento operativa da malha da subestação em ohms;

Rp= resistência de aterramento do pé dos suportes (torres) da linha de transmissão em ohms;

r= resistência do trecho do cabo guarda entre dois suportes da linha de transmissão em ohms, normalmente é calculado para o vão médio da linha sob estudo;

Req= resistência do circuito em cascata equivalente da linha de transmissão visto da subestação em ohms;

n= número de cabos para-raios da linha de transmissão.

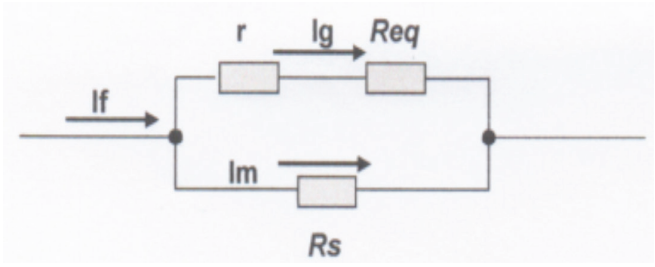

Figura 6 – Circuito equivalente ao da Figura 5.

Equações para o cálculo de (Ig) falta na subestação [If (a) Figura 3]:

$$\mathrm{Re}q = \sqrt{r \times Rp} \qquad \text{Eq. (1)}$$

$$Ig = If \times \left[\frac{Rs}{n(Rs + r + \mathrm{Re}q)} \right] \qquad \text{Eq. (2)}$$

Exemplo ilustrativo: Calcular o valor da corrente de malha (Im) pelo método aproximado, conforme a ABNT NBR 8449:84 "Dimensionamento de cabos para-raios para linhas aéreas de transmissão de energia elétrica".

Dados:

Corrente de falta (If) = 21.700A;

O cabo para-raios (cabo guarda) cordoalha de aço galvanizado com uma bitola de 3/8" HS Classe A cuja resistência elétrica é de 3,51Ω/km;

O vão médio da linha de transmissão de 160 metros = 0,160 km;

A resistência de aterramento do pé de torre (suporte da linha) Rp = 10Ω;

A resistência de aterramento operativo da malha da subestação Rs = 2Ω;

Tempo de desligamento (disjuntores SF6) 0,1 segundo;

Número de cabos para-raios interligados na malha da subestação = 1 (um);

Falta na subestação [If (a) da Figura 3]:

$$r = 3{,}51\Omega / km \times 0{,}160km = 0{,}5616\Omega$$

$$\mathrm{Re}q \cong \sqrt{r \times Rp} = \sqrt{0{,}5616 \times 10} = 2{,}37\Omega$$

$$Ig \cong If \times \left[\frac{Rs}{n \times (Rs + r + \mathrm{Re}q)} \right] = 21.700 \times \left[\frac{2}{1 \times (2 + 0{,}5616 + 2{,}37)} \right] = 8.800{,}39A$$

$$\mathrm{Im} = If - Ig = 21.700A - 8.800{,}39A = 12.899{,}61A \cong 12{,}89kA$$

Agora os mesmos dados, só substituindo o material utilizado no cabo para-raios de uma cordoalha de aço galvanizado de 3/8" por um condutor bimetálico aço-cobre 40% IACS de 35 mm² de seção, cuja resistência é igual a 1,156Ω/km.

Nota: O condutor aço-cobre 35 mm² suporta 18,93kA durante 0,1segundos [5].

Normalmente esta substituição deve ser feita nos primeiros trechos da linha de transmissão que sai da subestação, esta distância deve ser estudada em cada caso, podendo chegar de 8 a 20 quilômetros aproximadamente no caso do uso de condutores de aço-cobre.

Quando se faz esta substituição dos cabos para-raios por condutores com maior condutibilidade devem-se verificar as condições de segurança próximo as torres, devido às elevações de potencial causados pelas correntes (It) que se difundem pelo solo através dos aterramentos das torres a partir da subestação (figura1).

Podemos dizer que os cálculos acima, que foram feitos com base na norma ABNT NBR 8449:84 "Dimensionamento de cabos para-raios para linhas aéreas de transmissão de energia elétrica" são aproximados, porém, com os resultados que podem ser considerados como conservativos.

Como previsto, tivemos uma diminuição na corrente de malha (Im) e consequentemente não só as diferenças de potencial externas à malha irão diminuir, como também as interferências por acoplamento resistivo em outros sistemas de aterramento e materiais metálicos enterrados que estejam dentro do volume de influencia da malha de aterramento sob análise. Haverá também diminuição nas diferenças de potencial de malha (Vt) e de passo na periferia (Vp) que são os pontos mais críticos na própria malha da subestação, conforme pode ser recordado através da Figura 7.

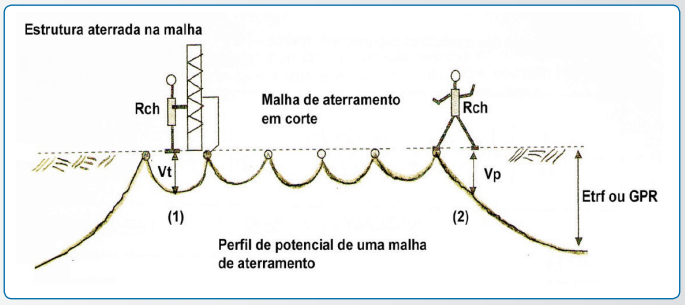

Figura 7 – Representação simplificada do perfil das diferenças de potencial em uma malha de aterramento de uma subestação típica (corte transversal). Sendo indicados os pontos mais críticos em termos de diferença de potencial (Vt) e (Vp) diferenças de potencial de malha e de periferia respectivamente.

As equações de cálculo 3 e 4, exaustivamente constantes em diversos artigos e na própria norma brasileira ABNT NBR 15751:2013, nos mostram que os respectivos valores de (Vt) e (Vp) são diretamente proporcionais ao valor da corrente de malha (Im), o que nos permite dizer que, com a substituição do material utilizado no cabo para-raios da linha de transmissão, também teremos uma certa redução destas diferenças de potencial com consequentes benefícios do ponto de vista econômico no dimensionamento da própria malha de aterramento.

$$(Vp) = \frac{Ks \times Ki \times \rho 1 \times (\mathrm{Im})}{Lt} volts \qquad \text{Eq. (3)}$$

$$(Vt) = \frac{Km \times Ki \times \rho 1 \times (\mathrm{Im})}{Lt} volts \qquad \text{Eq. (4)}$$

Sendo:

(Ks) – Um fator geométrico utilizado nos cálculos da tensão de passo que leva em consideração o espaçamento entre os condutores paralelos da malha s sua profundidade de instalação;

(Ki) – Coeficiente de irregularidade, que é um fator de correção, que leva em consideração não uniformidade de dispersão de corrente pelos condutores da malha, geralmente maior dispersão pelos condutores da periferia, geralmente os quatro mais externos;

(Km) – Coeficiente de malha, que introduz nos cálculos a influência dos seguintes fatores: Profundidade da malha, número de condutores paralelos em uma determinada direção, comprimento total dos condutores, área da malha, diâmetro dos condutores da malha;

(Im) – Corrente de malha em amperes;

(ρ1) - Resistividade da primeira camada em Ω.m;

(Lt) – Comprimento total de condutor enterrado.

Nota: As equações para o cálculo destes coeficientes constam da norma brasileira ABNT NBR 15751:13.

Lembrando aos leitores que para o dimensionamento adequado dos quadriculados componentes da malha de aterramento de uma subestação para que a mesma garanta a segurança teremos que cumprir certos critérios tais como os seguintes:

Primeiro critério de segurança: Não ultrapassar o valor da corrente de choque máxima admissível pelo corpo humano, calculada pela equação 5, que pode circular entre as mãos e pés ou entre os pés num intervalo de tempo entre 0,03 e 3,0 segundos.

$$Ich = \frac{0{,}116}{\sqrt{t}} A \qquad \text{Eq. (5)}$$

Segundo critério de segurança: Cálculo da tensão de toque máxima admissível de curta duração (Etma), a qual não deve ser ultrapassada em nenhum ponto da malha de aterramento, calculada pela equação 6.

$$Etma = Ich \times (Rch + \frac{Rpé}{2} \times (C)) = \frac{0{,}116}{\sqrt{t}} (1.000 + 1{,}5 \times (C) \times \rho s) volts \qquad \text{Eq. (6)}$$

Terceiro critério de segurança: Cálculo da tensão de passo máxima admissível de curta duração (Epma), a qual não deve ser ultrapassada em nenhum ponto da malha de aterramento, calculada pela equação 7.

$$Epmd = Ich \times (Rch + Rpé + Rpé \times (C)) = \frac{0{,}116}{\sqrt{t}} \times (1.000 + 6 \times (C) \times \rho s) volts \qquad \text{Eq. (7)}$$

Cabe também lembrar que para que seja computada a resistência efetiva dos pés na presença de um material com elevado valor de resistividade colocado na superfície do solo, com uma espessura finita, foi introduzido nas equações 6 e 7 o fator de correção ©, que pode ser calculado pela equação 8.

$$C = 1 - a \left[\frac{1 - \frac{\rho 1}{\rho s}}{2 \times hs + a} \right] \qquad \text{Eq. (8)}$$

Sendo = a = 0,106

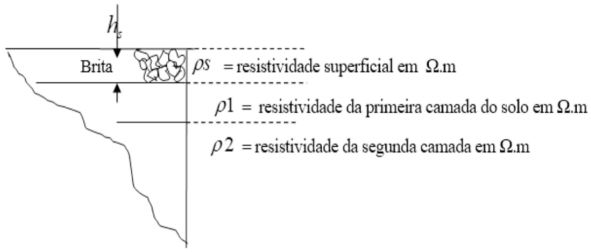

Figura 8 – Representação esquemática do solo de uma subestação com uma camada de 0,15m de brita.

Tabela I – Materiais de recobrimento do solo (ρs).

Material	Resistividade Ω × 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

A camada superficial de brita normalmente colocada sob o solo das subestações tem duas funções básicas importantes: a primeira e a mais importante conforme pode ser visto nas equações para o cálculo das tensões de toque e passo permissíveis pelo corpo humano é a função de segurança. A segunda é praticamente uma consequência da presença da mesma sob a primeira camada de solo natural da subestação, que é a de manter o maior tempo possível a umidade nas camadas de solo sob a mesma. A Figura 9 exemplifica a camada de brita sobre o solo de uma subestação típica.

Figura 9 – Camada de brita em subestação típica de 138/88kV- 40 MVA.

Chamamos a atenção para a importância da presença desta camada mínima sobre o solo devido ao fato de comumente na prática encontrarmos subestações com pouca espessura ou mesmo sem nenhuma camada brita.

Finalmente após todas estas análises podemos responder a segunda pergunta do questionamento que era: "Como manter as diferenças de potencial internamente à subestação menores ou no máximo iguais aos valores máximos admissíveis pelo corpo humano?":

Internamente à subestação ,simplesmente, o que temos que fazer é garantir que as diferenças de potencial nos pontos mais críticos internamente à malha de uma subestação, que, como vimos, são o potencial de malha (Vt) e de passo na periferia (Vp) menores ou no máximo iguais às tensões de toque máxima admissível de curta duração (Etma) e também menor do que a tensão de passo máxima admissível também de curta duração (Epma) calculada através das equações 6 e 7 respectivamente.

Ou seja, devemos fazer com que as equações 9 e 10, seguintes, sejam atendidas:

$$(Vp) \leq (Epmd) \qquad \text{Eq.(9)}$$

$$(Vt) \leq (Etmd) \qquad \text{Eq.(10)}$$

Sendo (Vp) e (Vt) como vimos calculados pelas equações 3 e 4 respectivamente:

vvNaturalmente, para que as equações 9 e 10 sejam atendidas, o dimensionamento dos diversos quadriculados componentes da malha deverá sofrer diversas mudanças em termos de dimensões com base com base na aplicação dos seguintes critérios:

a) Diminuição do espaçamento entre os condutores da malha, quadriculados com dimensões menores;
b) Aumento do comprimento total dos condutores da malha;
c) Aumento da profundidade de instalação dos condutores da mesma;
d) Instalação de hastes de aterramento convenientemente posicionadas na malha, geralmente na periferia da mesma;
e) Diminuição do valor da corrente de malha (Im).

Para o controle dos potenciais em pontos situados internamente à malha de aterramento, as medidas normalmente mais aplicadas são as citadas nos itens "a" e "d" porém, com a simples mudança do material do condutor utilizado como cabo para-raios de cordoalha de aço galvanizado para condutor bimetálico de aço-cobre, obtivemos a diminuição da corrente de malha (Im) e em consequência também uma diminuição nas diferenças de potencial interna e externamente à malha da subestação, com uma nítida vantagem demonstrada no presente artigo.

Conclusões

1) A substituição das cordoalhas de aço galvanizado por condutores bimetálicos aço-cobre ou aço-alumínio é vantajosa do ponto de vista segurança nas subestações, pois, como foi visto, as diferenças de potencial internamente e externamente à malha diminuem de valor;

2) Os condutores aço-cobre têm performance equivalente ao do cobre, portanto, muito superior ao das cordoalhas de aço galvanizado, sendo que, além deste fato, não possuem valor comercial nos desmanches, o que evita o roubo;

3) O revestimento de cobre dos condutores bimetálicos aço-cobre geram nos mesmos uma durabilidade de 40 a 50 anos, cumprindo desta maneira o item 9.5 da atual norma de projeto de linhas de transmissão, ABNT NBR 5422:85 (atualmente em revisão) que cita "...que os materiais utilizados sejam resistentes à corrosão e compatíveis com a vida útil da linha de transmissão";

4) Normalmente, a substituição dos cabos para-raios deve ser feita nos primeiros trechos da linha de transmissão a partir da subestação. Esta distância deve ser estudada para cada caso, podendo chegar de 8 a 20 quilômetros aproximadamente no caso do uso de condutores bimetálicos de aço-cobre;

5) Quando se faz esta substituição dos cabos para-raios por condutores com maior condutibilidade deve-se também verificar as condições de segurança próximo as torres, devido as eventuais elevações de potencial causados pelas correntes (It) que irão se difundir pelo solo através dos aterramentos das torres a partir da subestação (vide figura 1);

6) No dimensionamento dos cabos para-raios deve-se levar em consideração não só os aspectos elétricos, mecânicos e térmicos, mas também devem ser analisadas outras ocorrências, tais como suportar vibrações eólicas e as correntes de curto-circuito monofásicas durante o tempo em que o mesmo ficar sujeito. Neste particular é importante que sejam considerados a temperatura máxima admissível, os tempos de atuação da proteção, as características de religamento dos disjuntores e relés e as demais condições operativas. Cabe observar que diversas curvas são apresentadas na norma ABNT NBR 8449:1984 que podem ajudar nestas verificações e dimensionamento [7].

7) Convém citar que existem casos em que o cabo para-raios pode não estar interligado na malha da subestação [7].

Referências bibliográficas:

1-ABNT NBR 15749:09 "Medição de resistência de Aterramento e de Potenciais na Superfície do solo.
2-Guide for Safety in Alternating Current Substation Grounding IEEE Publ.80-2000.
3-ABNT NBR 16254-1:2013 "Materiais de Aterramento".
4-Apostila curso de Sistemas de aterramento Projeto, construção, medições e manutenção-ABNT - Engº Galeno L. Gomes.
5-Catálogo Geral de Produtos Grupo Intelli.
6-ABNT NBR 15751:2013- "Sistemas de Aterramento de Subestações Requisitos".
7-ABNT NBR 8449:1984 - "Dimensionamento de cabos para-raios para linhas aéreas de transmissão de energia elétrica" (Norma confirmada em 18/10/2016 pelo ABNT CB-003 Eletricidade).
8-ABNT NBR 5422- Projeto de Linhas Aéreas de Transmissão de Energia Elétrica 1985 (atualmente em revisão).

**Eng. 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.*