

Otimização de Sistemas de Aterramento em Subestações 34,5 / 13,8 kV

A. P. R. Coura, ENERSUL; C. M. V. Tahan; J. A. Jardini; R. P. Casolari; J. G. M. Andrade; M. Lopes, EPUSP/PEA¹

Resumo – O aumento das potências de curto-circuito no sistema ENERSUL, aliado às altas resistividades dos solos existentes na área de concessão, encarecem os projetos de malha de terra das subestações pela necessidade de aumento da área física necessária para atender os critérios do aterramento elétrico. Uma alternativa para diminuir a área da subestação, consiste no desvio de parte da corrente de curto-circuito para fora da subestação. Para atingir esse objetivo, o caminho alternativo deve atuar em paralelo com a malha de terra da subestação, de modo a produzir um baixo valor de resistência de aterramento para o conjunto. As soluções pesquisadas no projeto envolveram o aterramento de estruturas da linha de distribuição que atende a subestação ou a instalação de “fio contrapeso” em uma estrutura dessa linha. Este artigo apresenta as metodologias utilizadas no programa computacional que dimensiona esse sistema de aterramento e apresenta também casos exemplos que ilustram a aplicação dessas metodologias.

Palavras-chave – Estratificação do Solo, Malha de Terra, Linha de Distribuição, Aterramento de Estruturas, Fio Contrapeso.

I. INTRODUÇÃO

O sistema 34,5/13,8 kV da ENERSUL é trifásico a três fios, não possuindo cabos pára-raios ou aterramentos em suas linhas de distribuição, fazendo com que o sistema de aterramento da subestação atue de forma isolada e independente do sistema de aterramento geral.

Considerando os valores elevados de resistividade do solo encontrados no Estado do Mato Grosso do Sul, a evolução dos níveis de curto-circuito no sistema da ENERSUL e a busca da redução dos custos com a infra-estrutura civil e com o aterramento das subestações, o projeto investigou alternativas para o aterramento do sistema elétrico.

Dentre as alternativas, foi pesquisada a redução da corrente de malha através do escoamento de parte da corrente de defeito por caminhos alternativos, de modo a permitir o alívio do sistema de aterramento da subestação e a consequente redução de sua área. Para que isso fosse possível, os caminhos alternativos deveriam atuar em paralelo com a malha de terra da subestação, de modo a produzir um baixo valor de resistência de aterramento para o conjunto.

Desta forma, o projeto foi desenvolvido para otimizar os sistemas de aterramento das subestações 34,5/13,8 kV da ENERSUL, com a pesquisa das alternativas que minimizem

os custos de instalação desses sistemas. Esses custos correspondem à somatória dos custos de aterramento das subestações, instalação de cabo auxiliar ao longo de alguns vãos das LD's e aterramento das estruturas desses vãos.

Neste artigo estão apresentadas as características do sistema de aterramento definido, os critérios e metodologias utilizadas para o dimensionamento do mesmo e o programa computacional desenvolvido para implementar esse sistema.

Os módulos desenvolvidos no projeto permitem:

- Estratificar o solo do local da subestação em 2 camadas (obtenção das resistividades da 1ª e 2ª camadas e espessura da 1ª camada);
- Definir a malha de terra da subestação que atenda os critérios de tensões de toque e passo máximas admissíveis com base nos níveis de curto-circuito esperados para a subestação (malha regular – espaçamento igual entre condutores e malha com potencial constante – espaçamento desigual entre condutores);
- Definir o sistema de aterramento auxiliar (aterramento de estruturas da linha de distribuição ou instalação de “fio contrapeso” em uma estrutura da linha de distribuição), caso a malha de terra não consiga atender aos critérios de segurança;
- Custear as alternativas dos sistemas de aterramento analisados.

Essas metodologias foram implementadas num programa computacional que permite ao usuário analisar de forma rápida várias alternativas para o sistema de aterramento de uma subestação, otimizando dessa forma esse sistema.

II. METODOLOGIA ADOTADA NO PROJETO

A. Estratificação do Solo [1]

O solo da subestação foi estratificado em 2 camadas definidas pelas suas respectivas resistividades e espessura da primeira camada. Para esse cálculo há necessidade inicialmente de serem efetuadas medições da resistência de terra.

As medições devem ser obtidas pelo Método de Wenner (para distâncias padronizadas entre os eletrodos de medições). A partir das resistências medidas, a resistividade do solo, para uma determinada distância (a) entre eletrodos, é dada por:

$$\rho = 2 \times \pi \times a \times R \quad (1)$$

onde:

ρ : resistividade do solo correspondente à distância (a), em ($\Omega \cdot m$);

R: resistência medida correspondente à distância (a), em (Ω);

a: distância entre eletrodos adjacentes (m).

Para cada valor de (a), são feitas medições em algumas direções (eixos) do terreno da subestação. Para cada valor de resistência medida, é calculado um valor de resistividade

¹ A. P. R. Coura (Gerente do Projeto) trabalha na ENERSUL – Energias do Brasil (apribeiro@enbr.com.br)

J. A. Jardini - Prof. Dr. Titular (jardini@pea.usp.br); C. M. V. Tahan – Prof. Dr. (cmvtahan@pea.usp.br) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas da USP

R. P. Casolari; J. G. M. Andrade; M. Lopes (Pesquisadores) trabalham na EPUSP/PEA – Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas da USP

do solo, utilizando a equação (1). São calculadas as resistências médias para cada distância (a).

São expurgados valores individuais de (ρ) com erro superior a 50% em relação à resistividade média correspondente à distância (a).

O erro(ξ) é calculado pela seguinte expressão:

$$\xi = \frac{(\rho_{ind} - \rho_{med})}{\rho_{med}} \times 100 \quad (\%) \quad (2)$$

As novas resistividades médias são calculadas, obtendo-se uma relação entre os valores da resistividade (ρ) e a distância entre eletrodos (a).

Para a estratificação em 2 camadas, a variação de (ρ) com (a) deve obedecer 2 tipos possíveis de curvas, função do valor de K, conforme apresentado na figura 1. O valor de K é dado por:

$$K = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} \quad (3)$$

onde ρ_1 e ρ_2 são as resistividades da 1ª e 2ª camadas, respectivamente.

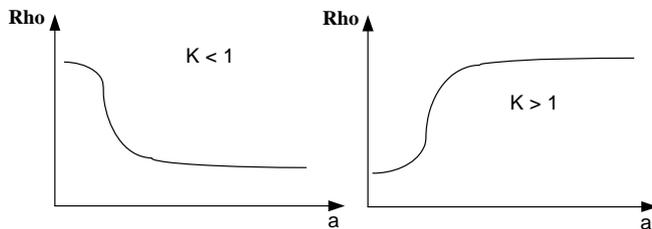


Figura 1 – Estratificação do Solo em 2 Camadas

Através desse gráfico são obtidas as resistividades das 2 camadas e a espessura da primeira camada da seguinte forma:

- O valor da resistividade da 1ª camada é dado pelo valor da assíntota de (ρ) para o menor valor de (a) quando $K < 1$ e pelo valor da assíntota de (ρ) para o maior valor de (a) quando $K > 1$;
- O valor da resistividade da 2ª camada é dado pelo valor da assíntota de (ρ) para o maior valor de (a) quando $K < 1$ e pelo valor da assíntota de (ρ) para o menor valor de (a) quando $K > 1$;
- A espessura da 1ª camada é dada pelo valor de (a) correspondente ao ponto de inflexão da curva.

B. Critérios para Cálculo dos Valores Máximos Admissíveis das Tensões de Passo e Toque.

Os valores máximos admissíveis foram calculados pelas seguintes equações, de acordo com [2]:

$$E_{toque} = (R_{CH} + 1,5 \times C_S \times \rho_S) \times I \quad (4)$$

$$E_{passo} = (R_{CH} + 6 \times C_S \times \rho_S) \times I \quad (5)$$

onde:

E_{toque} : tensão de toque máxima admissível;

E_{passo} : tensão de passo máxima admissível;

R_{CH} : resistência do corpo humano. Foi assumido valor de 1.000 Ω ;

C_S : fator de efetividade da camada de brita;

ρ_S : resistividade da camada de brita. Foi assumido valor de 3.000 $\Omega \cdot m$;

I : corrente tolerável no corpo humano (I_{cd} – corrente de curta duração e I_{ld} – corrente de longa duração).

Para o cálculo do fator de efetividade da camada de brita (C_S) foi utilizada a equação baseada em [2]:

$$C_S = 1 - \frac{0,09(1 - \frac{\rho}{\rho_S})}{2 \times h_S + 0,09} \quad (6)$$

onde:

ρ : resistividade da 1ª camada;

ρ_S : resistividade da camada de brita;

h_S : espessura da camada de brita. Foi assumido valor de 0,1 m.

Para “curta duração”, a corrente (I_{cd}) tolerável para uma pessoa com 50 kg é dada por:

$$I_{cd} = \frac{0,116}{\sqrt{t_c}} \quad (A) \quad (7)$$

onde:

t_c : duração da corrente circulante no corpo humano, assumida igual ao tempo para eliminação do curto-circuito.

Para “longa duração”, foi assumida a corrente (I_{ld}) de 10 mA (corrente “let go”).

C. Cálculos Fundamentais

Cálculo das Resistências Própria e Mútua entre Segmentos dos Condutores da Malha de Terra

A metodologia apresentada para o cálculo dos valores da resistência de aterramento foi baseada em [3].

A resistência mútua, entre os segmentos 1 e 2, é a tensão produzida no segmento 2 devido à corrente de 1 A dispersada pelo segmento 1. Simetricamente, ela também é a tensão produzida no segmento 1 devido à corrente de 1 A dispersada pelo segmento 2. Assim, $R_{jk} = R_{kj}$, onde R é a resistência mútua.

A resistência mútua entre 2 segmentos de condutores da malha de terra é dada por:

$$R = \frac{M \times \rho}{(4 \times \pi \times L_1 \times L_2)} \quad (8)$$

onde:

M: valor adimensional, função da posição relativa entre os 2 segmentos;

ρ : resistividade do terreno;

L_1 : comprimento do segmento 1;

L_2 : comprimento do segmento 2.

Para o cálculo do valor final da resistência, dois valores devem ser calculados e somados, um valor com $z = 0$ e outro com $z = 2D$ (sendo D a profundidade da malha, para condutores horizontais coplanares). Basicamente, esses dois valores são obtidos no cálculo de M, conforme será mostrado a seguir.

Segmentos de linha em paralelo, coplanares, não colineares

Seja o gráfico da Figura 2, representativo de 2 segmentos em paralelo (segmentos AB e EF). Para aplicação da fórmu-

la de cálculo de M (e, conseqüentemente, de R) deve ser considerado o eixo x sobre o segmento AB com a origem no ponto A e sendo (x, y, z) as coordenadas do ponto E, lembrando que z corresponde à profundidade dos segmentos.

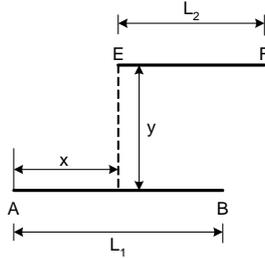


Figura 2 – Segmentos Paralelos

O valor de M é dado pela expressão (9) a seguir, devendo ser lembrado que 2 valores de M devem ser calculados e somados (um valor correspondente a $z = 0$ e outro valor com $z = 2D$, $D =$ profundidade dos segmentos).

$$M = L_1 \times \ln \left(\frac{\sqrt{(x+L_2-L_1)^2 + W^2} + x + L_2 - L_1}{\sqrt{(x-L_1)^2 + W^2} + x - L_1} \right) + \quad (9)$$

$$+ (x+L_2) \times \ln \left(\frac{\sqrt{(x+L_2-L_1)^2 + W^2} - (x+L_2-L_1)}{\sqrt{(x-L_2)^2 + W^2} - (x+L_2)} \right) +$$

$$- x \times \ln \left(\frac{\sqrt{(x-L_1)^2 + W^2} - (x-L_1)}{\sqrt{x^2 + W^2} - x} \right) - \sqrt{(x-L_1)^2 + W^2} - \sqrt{(x+L_2)^2 + W^2} +$$

$$+ \sqrt{(x+L_2-L_1)^2 + W^2} + \sqrt{x^2 + W^2}$$

onde: $W^2 = y^2 + z^2$

A resistência própria de um segmento de comprimento L pode ser obtida de (9), considerando $L_1=L_2=L$, $x = 0$, $y = a$, onde a é o raio do condutor.

Segmentos de linha na perpendicular, coplanares

Seja o gráfico da Figura 3, representativa de 2 segmentos perpendiculares (segmentos AB e EF). Para aplicação da fórmula de cálculo de M (e, conseqüentemente, de R) deve ser considerado o eixo x sobre o segmento AB com a origem no ponto A e sendo (x, y, z) as coordenadas do ponto E, lembrando que z corresponde à profundidade dos segmentos.

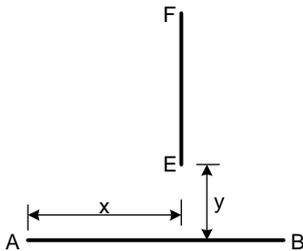


Figura 3 – Segmentos Perpendiculares

O valor de M é dado pela expressão (10) a seguir, devendo ser lembrado que dois valores de M devem ser calculados e somados (um valor correspondente a $z = 0$ e outro valor com $z = 2D$, $D =$ profundidade dos segmentos).

$$M = (L_1 - x) \times \ln \left(\frac{\sqrt{(L_1 - x)^2 + (L_2 + y)^2 + z^2} + L_2 + y}{\sqrt{(L_1 - x)^2 + y^2 + z^2} + y} \right) + \quad (10)$$

$$+ x \times \ln \left(\frac{\sqrt{x^2 + (L_2 + y)^2 + z^2} + L_2 + y}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2} + y} \right) +$$

$$+ (L_2 + y) \times \ln \left(\frac{\sqrt{(L_1 - x)^2 + (L_2 + y)^2 + z^2} + L_1 - x}{\sqrt{x^2 + (L_2 + y)^2 + z^2} - x} \right) +$$

$$- y \times \ln \left(\frac{\sqrt{(L_1 - x)^2 + y^2 + z^2} + L_1 - x}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2} - x} \right) - |U|$$

onde $U = 0$ se $z = 0$.

Se $z \neq 0$, tem-se:

$$U = z \times \left[\begin{aligned} & \left[\operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{(L_1 - x)(L_2 + y)}{z \sqrt{(L_1 - x)^2 + (L_2 + y)^2 + z^2}} \right) - \operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{(L_1 - x)y}{z \sqrt{(L_1 - x)^2 + y^2 + z^2}} \right) \right] + \quad (11) \\ & \left[\operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{-x(L_2 + y)}{z \sqrt{x^2 + (L_2 + y)^2 + z^2}} \right) + \operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{-xy}{z \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}} \right) \right] \end{aligned} \right]$$

Cálculo da Distribuição de Corrente ao Longo do Condutor

A metodologia para a determinação da distribuição de corrente ao longo do condutor foi baseada em [3].

Para encontrar a distribuição de corrente dispersada pelo condutor, conceitualmente foi dividido o eletrodo de terra em vários segmentos, cada segmento consistindo de um pedaço do condutor do eletrodo. Em cada segmento, a densidade de corrente dispersada foi considerada constante, porém diferente de segmento para segmento.

Após a divisão da malha em segmentos, o próximo passo foi numerar esses segmentos, usando números consecutivos para segmentos que podem ser considerados pela simetria como tendo a mesma corrente de dispersão.

A figura 4 apresenta uma malha de terra retangular. Os condutores da malha foram divididos nos pontos de cruzamento, resultando em 24 segmentos.

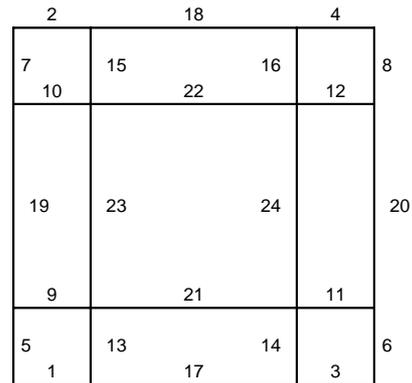


Figura 4 – Malha de Terra Retangular

Pela simetria da malha e da divisão executada, pode-se considerar que existam 4 diferentes valores de densidade de corrente dispersada nesses condutores. Esses 4 valores correspondem às densidades de correntes nos seguintes segmentos:

- Densidade de Corrente 1 (i_1): segmentos de 1 a 8;
- Densidade de Corrente 2 (i_2): segmentos de 9 a 16;
- Densidade de Corrente 3 (i_3): segmentos de 17 a 20;
- Densidade de Corrente 4 (i_4): segmentos de 21 a 24.

Os 4 valores de densidade de corrente podem ser encon-

trados pela solução das 4 equações lineares (12), relacionadas a seguir:

$$\begin{aligned} r_{11} i_1 + r_{12} i_2 + r_{13} i_3 + r_{14} i_4 &= v_1 \\ r_{21} i_1 + r_{22} i_2 + r_{23} i_3 + r_{24} i_4 &= v_2 \\ r_{31} i_1 + r_{32} i_2 + r_{33} i_3 + r_{34} i_4 &= v_3 \\ r_{41} i_1 + r_{42} i_2 + r_{43} i_3 + r_{44} i_4 &= v_4 \end{aligned} \quad (12)$$

Nessas equações, Γ_{jj} é a soma da resistência própria de um segmento tipo j e as resistências mútuas entre o segmento e os outros segmentos do tipo j , e Γ_{jk} é a soma da resistência mútua entre o segmento tipo j e os segmentos do tipo k . Esses valores são calculados através das fórmulas (9) a (11).

As correntes i_j são os valores das correntes dispersadas nos 4 tipos de segmentos. As tensões v_j são consideradas iguais a V (malha equipotencial). Dessa forma, têm-se 4 equações e 5 incógnitas (4 correntes i_j e tensão V).

Uma vez conhecida a corrente total a ser dispersada pela malha, tem-se a quinta equação, conseguindo-se, dessa forma, obter o valor das 4 correntes dispersadas em cada um dos tipos de segmentos e o valor do potencial da malha.

Cálculo do Potencial ao Nível do Solo

A metodologia para cálculo dos potenciais ao nível do solo foi extraída de [4], a qual considera solos de duas ou mais camadas e malhas sem restrição de geometria.

O cálculo do potencial ao nível do solo foi feito pelo método das imagens sendo que o potencial em um ponto M cujas coordenadas são x_o, y_o, z_o (ou u_o, v_o, w_o) pode ser calculado por:

$$V = \frac{\rho_1 \times I}{4\pi L} \times \sum_{j=1}^m \left\{ \psi_j [u_p, u_o, v_o, w_o] + \psi_j [u_p, u_o, v_o, (w_o + 2z_s)] \right\} \quad (13)$$

onde:

ρ_1 : resistividade da primeira camada do solo ($\Omega \cdot m$);

I : corrente no trecho de cabo da malha que está produzindo o potencial (A);

L : comprimento do trecho de cabo da malha (m);

m : número de trechos de cabo da malha de terra.

O valor de ψ é calculado através da expressão (14), devendo ser obtidos dois valores: um valor correspondente à posição original do cabo e outro valor correspondente à imagem do cabo em relação à terra (2 vezes a profundidade da malha):

$$\psi = \frac{\rho_1 \times I}{4\pi} \left[\ln \left(\frac{(u_p - u_o) + \sqrt{(u_p - u_o)^2 + v_o^2 + w_o^2}}{-u_o + \sqrt{u_o^2 + v_o^2 + w_o^2}} \right) + \sum_{n=1}^{\infty} K^n \ln \left(\frac{(u_p - u_o) + \sqrt{(u_p - u_o)^2 + v_o^2 + (2nh + w_o)^2}}{-u_o + \sqrt{u_o^2 + v_o^2 + (2nh + w_o)^2}} \right) + \sum_{n=1}^{\infty} K^n \ln \left(\frac{(u_p - u_o) + \sqrt{(u_p - u_o)^2 + v_o^2 + (2nh - w_o)^2}}{-u_o + \sqrt{u_o^2 + v_o^2 + (2nh - w_o)^2}} \right) \right] \quad (14)$$

$$u_p = (x_p - x_s) \cos \alpha + (y_p - y_s) \sin \alpha$$

$$u_o = (x_o - x_s) \cos \alpha + (y_o - y_s) \sin \alpha$$

$$v_o = (y_o - y_s) \cos \alpha - (x_o - x_s) \sin \alpha$$

$$w_o = z_o - z_s$$

Os condutores da malha de terra estão referenciados através de um sistema de coordenadas (x, y, z).

No sistema esférico de coordenadas (u, v, w), o referencial é solidário em cada um dos cabos condutores da malha de terra. O comprimento do cabo condutor encontra-se sobre o eixo u .

O índice s corresponde às coordenadas do ponto inicial do cabo condutor e o índice p corresponde às coordenadas do ponto final do cabo condutor.

Cálculo da Corrente de Curto-Circuito no Sistema e Dimensionamento do Condutor da Malha

Para o cálculo da corrente de curto-circuito no sistema com o intuito de dimensionar o condutor, foi utilizado o valor da potência de curto-circuito monofásico $S_{cc1\phi}$. Para um determinado nível de tensão da subestação, a corrente é calculada por:

$$I_{cc1\phi} = \frac{S_{cc1\phi}}{\sqrt{3} \times V} \quad (15)$$

onde:

V : tensão do sistema.

O dimensionamento do cabo condutor da malha de terra é dado por:

$$S_{mm2} = \frac{I_{cc1\phi}}{\sqrt{\left(\frac{TCAP \times 10^{-4}}{t_c \times \alpha_r \times \rho_r} \right) \times \ln \left(\frac{K_0 + T_m}{K_0 + T_a} \right)}} \quad (16)$$

onde:

$I_{cc1\phi}$: corrente eficaz (kA). Foi utilizado, conservativamente, o valor da corrente de curto-circuito sem considerar a resistência da malha de terra;

S_{mm2} : seção transversal do condutor (mm^2);

t_c : duração da corrente (s);

T_a : temperatura ambiente ($^{\circ}C$);

T_m : temperatura máxima permitida ($^{\circ}C$).

Os parâmetros a seguir são dependentes do tipo de condutor:

$TCAP$: capacidade térmica por unidade de volume ($J/cm^3 \cdot ^{\circ}C$);

α_r : coeficiente térmico da resistividade na temperatura de referência T_r ($^{\circ}C$)⁻¹;

K_0 : $1/\alpha_0$ ou $1/\alpha_r - T_r$;

A_0 : coeficiente térmico da resistividade a $0^{\circ}C$ ($^{\circ}C$)⁻¹.

D. Metodologia para Dimensionamento de Malha com Potencial Constante

Para o dimensionamento de uma malha de terra com potencial constante foi utilizada a metodologia apresentada em [5]. A malha de terra com potencial constante pressupõe a existência de espaçamentos desiguais entre os condutores da malha, com uma maior concentração de condutores na direção da periferia da malha de terra.

A partir de uma malha regular (espaçamento igual entre condutores), é definido um fator de compressão (c), variando entre 0,0 e 1,0. O fator de compressão (c) igual a 1,0 corresponde à malha regular. À medida que o fator de compressão (c) vai diminuindo, aumenta a densidade de condutores localizados perto da periferia da malha.

O fator de compressão (c) fornece a relação entre espaçamentos de condutores consecutivos. A partir do condutor central da malha, as distâncias entre os condutores até a periferia estão na razão do fator (c).

A figura 5 ilustra essa descrição, apresentando uma malha irregular com fator de compressão igual a 0,8.

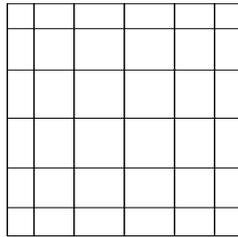


Figura 5 – Malha Irregular com Fator de Compressão Igual a 0,8

O fator de compressão (c) está relacionado à separação máxima entre condutores (d_{\max}), as dimensões da malha e o número de condutores na malha. A distância d_{\max} ocorre no centro da malha. Sendo N o número de condutores na direção da malha perpendicular a um dos eixos da malha, eixo de comprimento L , a distância d_{\max} é dada pelas equações:

$$d_{\max} = \frac{L(1-c)}{1+c-2 \times c^{\left(\frac{N}{2}\right)}} \quad \text{para } N \text{ par} \quad (17)$$

$$d_{\max} = \frac{L(1-c)}{2 \times (1-c^{\left(\frac{N-1}{2}\right)})} \quad \text{para } N \text{ impar} \quad (18)$$

A análise apresentada em [5] foi efetuada para 3 condições de solo: solo com resistividade uniforme, solo estratificado em 2 camadas com resistividade da 1ª camada igual a 10 vezes a resistividade da 2ª camada e solo estratificado em 2 camadas com resistividade da 1ª camada igual a 1/10 da resistividade da 2ª camada.

Os resultados obtidos nessa análise mostraram que:

- Para solo uniforme, os menores valores da tensão de toque ocorreram para um fator de compressão (c) variando entre 0,6 e 0,8;
- Solos não uniformes e com resistividade da 1ª camada superior a da 2ª camada, para espessuras da 1ª camada superiores a 3 m, o fator de compressão (c) deve variar entre 0,8 e 0,9. Para espessuras abaixo de 3 m, o fator (c) deve se situar em torno de 0,6;
- Solos não uniformes e com resistividade da 1ª camada inferior a da 2ª camada, para espessuras da 1ª camada inferiores a 10 m, o fator de compressão (c) deve variar entre 0,2 e 0,3. Para espessuras acima de 10 m, o fator (c) deve variar entre 0,4 e 0,5.

Convém enfatizar que esses valores são válidos para as condições particulares analisadas na referência [5] e devem ser considerados como indicativos da utilização do fator de compressão (c) em função das características do solo da subestação (resistividades do solo).

No projeto ENERSUL, a metodologia utilizada foi a seguinte:

- Inicialmente foi obtida uma malha regular (espaçamento igual entre condutores) que atende os critérios

de tensões máximas de toque e passo. Assim, tem-se o número de cabos condutores em cada eixo da malha;

- A partir dessa malha regular, foi definido um fator de compressão (c), função da estratificação do solo, e foi retirado um condutor de cada lado da malha;
- Com esse novo número de condutores, foi obtida a distribuição dos mesmos ao longo das dimensões da malha (espaçamentos desiguais entre condutores). A seguir foi analisado o desempenho dessa nova malha em relação às tensões de toque e passo máximas admissíveis;
- Caso essa nova malha atendesse os critérios definidos, seria obtido um novo sistema de aterramento com menor custo (menos condutores) em relação à malha original;
- Caso essa configuração não atendesse os critérios, o usuário pode escolher um novo fator de compressão (c) e executar uma nova simulação.

E. Aterramentos Auxiliares

A utilização do sistema de aterramento auxiliar somente será efetivada nos casos em que a área do terreno da subestação não for suficiente para acomodar a malha resultante do dimensionamento a partir dos critérios de potencial de toque e passo.

Desta forma, quando a malha de terra não consegue drenar toda a corrente de curto-circuito do sistema, há necessidade da utilização de aterramentos auxiliares em paralelo com a malha de terra da subestação de modo a conduzir parte da corrente de curto-circuito para fora da subestação.

A metodologia proposta para utilização de aterramentos auxiliares consiste de:

- Quando a malha de terra sozinha não consegue atender os critérios do projeto, assume-se a máxima malha de terra possível dentro da subestação (malha regular com espaçamento mínimo entre condutores, ou seja, maior número possível de condutores) como parte do sistema de aterramento;
- É calculado o valor da máxima corrente de curto-circuito que, circulando pelos condutores da malha de terra definida acima, atende os critérios de projeto;
- A diferença entre a corrente inicial que deveria circular pela malha de terra e a máxima corrente definida acima, é a corrente que deve ser drenada para fora da subestação;
- Com esse valor de corrente, é calculada a resistência equivalente do aterramento auxiliar. O cálculo é feito através de um divisor de corrente resistivo onde se têm as correntes na malha e no aterramento auxiliar equivalente, e a resistência da malha de terra;
- O cálculo é iterativo uma vez que ao se colocar uma resistência (aterramento auxiliar) em paralelo com a resistência da malha, ocorre uma variação na resistência equivalente do sistema e em consequência, ocorre uma alteração na corrente de curto-circuito a ser drenada pelo sistema;
- Uma vez calculada a resistência equivalente do aterramento auxiliar, é definido esse aterramento, em função da opção escolhida: aterramentos de estruturas das linhas de distribuição ou instalação de “fio contrape-so”;

- No caso de aterramento de estruturas das linhas de distribuição, são calculadas as correntes que circularão nas várias estruturas aterradas e são calculadas as tensões de toque e passo nas imediações da 1ª estrutura mais próxima da subestação (circulação da maior corrente). Esses valores são comparados com os critérios de projeto. Caso os critérios sejam atendidos, o aterramento auxiliar está definido. Caso os critérios não sejam atendidos, uma solução deve ser encontrada (aterrar mais estruturas, alterar o sistema de aterramento de cada estrutura, etc.). O conhecimento do projetista é de extrema importância na análise dessas situações;
- No caso da instalação de “fio contrapeso”, são calculadas as tensões de toque e passo nas imediações da estrutura aterrada através do “fio contrapeso”. Esses valores são comparados com os critérios de projeto. Caso os critérios sejam atendidos, o aterramento auxiliar está definido. Caso os critérios não sejam atendidos, uma solução deve ser encontrada (utilizar comprimento maior de “fio contrapeso”, alterar o sistema de aterramento, etc.). Neste caso também, o conhecimento do projetista é de extrema importância na análise dessas situações;

Divisão de Corrente Entre a Malha da Subestação e o Aterramento Auxiliar

O estudo considerou a divisão da corrente de curto-circuito entre a malha de terra e o aterramento auxiliar um divisor resistivo de corrente.

Assim, da malha de terra tem-se a resistência (R_{malha}) e a corrente da malha (I_{malha}). Do sistema de aterramento auxiliar tem-se a corrente ($I_{auxiliar}$), que é a diferença entre a corrente total do sistema e a corrente na malha. Desta forma, a resistência equivalente do aterramento auxiliar é dada pela seguinte equação:

$$R_{auxiliar} = R_{malha} \times \frac{I_{malha}}{I_{auxiliar}} \quad (19)$$

Com a introdução da resistência do aterramento auxiliar, ocorre uma alteração no aterramento equivalente do sistema, tornando esse processo iterativo até a obtenção do valor final da resistência auxiliar de modo a se obter uma corrente na malha, menor ou igual à corrente que atende os critérios de projeto.

Uma vez obtida a resistência do sistema de aterramento das estruturas ($R_{auxiliar}$) e com a resistência da malha de terra (R_{malha}), calcula-se a resistência equivalente (R_{eq}) do conjunto.

$$R_{eq} = \frac{R_{malha} \times R_{auxiliar}}{R_{malha} + R_{auxiliar}} \quad (20)$$

O cálculo da corrente total no sistema de aterramento foi efetuado a partir dos valores das potências de curto-circuito monofásico e trifásico. Assim, tem-se:

$$s_{cc1\phi} = \frac{S_{CC1\phi}}{S_{base}} \quad (pu) \quad (21)$$

$$s_{cc3\phi} = \frac{S_{CC3\phi}}{S_{base}} \quad (pu) \quad (22)$$

$$r_{eq} = \frac{R_{eq} \times S_{base}}{V_{base}^2} \quad (pu) \quad (23)$$

$$z_1 = z_2 = j \frac{1}{s_{cc3\phi}} \quad (pu) \quad (24)$$

$$z_0 + 2 \times z_1 = j \frac{3}{s_{cc1\phi}} \quad (pu) \quad (25)$$

Das equações (24) e (25), obtém-se os valores de z_1 e z_0 . A corrente total (I_{total}) resulta:

$$i_{total} = \frac{3}{(2 \times z_1) + z_0 + (3 \times r_{eq})} \quad (pu) \quad (26)$$

$$I_{total} = i_{total} \times \frac{S_{base}}{\sqrt{3} \times V_{base}} \quad (kA) \quad (27)$$

As correntes na malha de terra (I_{malha}) e no aterramento auxiliar ($I_{auxiliar}$) são dadas por:

$$I_{malha} = I_{total} \times \frac{R_{auxiliar}}{(R_{malha} + R_{auxiliar})} \quad (kA) \quad (28)$$

$$I_{auxiliar} = I_{total} \times \frac{R_{malha}}{(R_{malha} + R_{auxiliar})} \quad (kA) \quad (29)$$

Aterramento das Estruturas das Linhas de Distribuição

A metodologia utilizada para o dimensionamento do aterramento das estruturas das linhas de distribuição levou em consideração:

- Os aterramentos de cada estrutura são interligados entre si através do cabo auxiliar da linha de distribuição e conectados à malha de terra da subestação;
- O cálculo da impedância equivalente do sistema resultou da resolução de um circuito com PI's em cascata, sem considerar a impedância mútua entre os cabos das fases;
- O número de circuitos PI's em cascata deve ser tal que seja obtida uma resistência equivalente do sistema auxiliar menor ou igual à resistência ($R_{auxiliar}$) obtida em (19). Com esse valor de resistência, foi calculada a divisão de corrente entre o aterramento auxiliar e a malha de terra da subestação;
- Na 1ª torre onde foi instalado o aterramento auxiliar, são calculadas as tensões de toque e passo e comparadas com os valores dos critérios do projeto. Uma vez obedecidos os critérios no local da 1ª estrutura, para as demais estruturas, por apresentarem correntes ligeiramente menores, não são verificadas as tensões de toque e passo.

Aterramento Auxiliar Utilizando o “Fio Contrapeso”

A metodologia utilizada para o dimensionamento do sistema auxiliar de aterramento utilizando o “fio contrapeso” considerou os seguintes aspectos:

- Foi utilizado “fio contrapeso” em uma única linha de distribuição e, caso esse “fio contrapeso” não seja utilizado na 1ª estrutura, há necessidade da instalação de um cabo auxiliar na linha de distribuição para conexão do aterramento auxiliar à malha de terra da subestação;
- A resistência do “fio contrapeso” deve ser menor ou igual à resistência (R_{auxiliar}) obtida em (19). Com esse valor de resistência, foi calculada a divisão de corrente entre o aterramento auxiliar e a malha de terra da subestação;
- Na torre onde foi instalado o “fio contrapeso”, são calculadas as tensões de toque e passo e comparadas com os valores dos critérios do projeto.

F. Custeamento dos Sistemas de Aterramento

O custeamento dos sistemas de aterramento deve incluir o custo da malha de terra e, quando existir, do sistema auxiliar de aterramento.

Custeamento da Malha de Terra

O custo da malha de terra é constituído pela soma dos custos dos cabos condutores da malha, incluindo hastes de aterramento, e das obras civis.

O custo das obras civis é fornecido pela soma das seguintes parcelas: custo da camada de brita, custo da drenagem do terreno, custo do meio-fio e custo do alambrado ou muro.

Custeamento do Aterramento das Estruturas das Linhas de Distribuição

O custo do aterramento das estruturas das linhas de distribuição é constituído pela soma dos custos do cabo auxiliar instalado na linha de distribuição, do cabo condutor dos anéis das estruturas, das hastes de aterramento dos anéis, se existirem, e dos acessórios (isolador roldana + cinta para poste ou isolador pino + pino).

Custeamento do Aterramento Através de “Fio Contrapeso”

O custo do aterramento através de “fio contrapeso” é constituído pela soma dos custos do cabo auxiliar instalado na linha de distribuição, caso necessário, do cabo condutor do “fio contrapeso” e dos acessórios (isolador roldana + cinta para poste ou isolador pino + pino).

III. RESULTADOS OBTIDOS

A. Estratificação do Solo

As medições da resistência de terra, realizadas pelo método de Wenner, estão apresentadas na tabela 1.

Tabela 1 – Medições da Resistência de Terra

Distância entre eletrodos	Resistências Medidas ao Longo de 3 Eixos		
	R1 (Ω)	R2 (Ω)	R3 (Ω)
a (m)			
1	122	163	143
2	61	76	70
4	29,8	32,8	31,5
8	13,6	14,1	11,2
16	5,2	5,3	3,5
32	2,05	2,15	2,1

A figura 6 apresenta a variação da resistividade média do solo (medida) em relação à distância entre os eletrodos de medição.

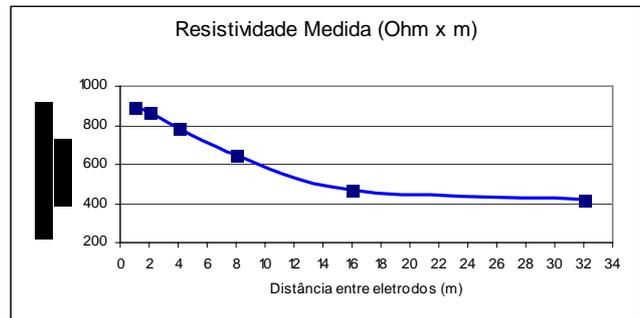


Figura 6 – Resistividade Média do Solo (Medida)

Com esses valores, foram assumidos inicialmente os seguintes valores para a estratificação do solo:

- $\rho_1 = 900 \Omega.m$;
- $\rho_2 = 400 \Omega.m$;
- $h = 4,0 m$.

Com base nesses valores assumidos, na tabela 2 são apresentados os desvios obtidos em relação às resistividades medidas.

Tabela 2 – Desvio nos Valores das Resistividades

Distância entre eletrodos	Valores de Resistividade do Solo		Desvio (%)
	$\rho_{\text{medido}} (\Omega.m)$	$\rho_{\text{calculado}} (\Omega.m)$	
a (m)			
1	896,4	896,3	-0,01
2	867,1	875,1	+0,93
4	788,3	779,3	-1,15
8	651,8	583,3	-10,51
16	469,1	445,9	-4,96
32	422,2	409,5	-3,01

Esses desvios foram considerados aceitáveis, consolidando os valores assumidos na estratificação do solo e que serão utilizados no projeto do sistema de aterramento da subestação.

B. Dimensionamento do Sistema de Aterramento

O sistema de aterramento da subestação foi analisado para 2 áreas de terreno para instalação da malha de terra da subestação: (40 x 40 m) e (20 x 20 m).

Os demais dados utilizados foram os mesmos para as 2 áreas e foram os seguintes:

- Tensão nominal: 13,8 kV;
- Potência de curto-circuito trifásico: 7,07 MVA (90°);
- Potência de curto-circuito monofásico: 8,84 MVA (90°);
- Espessura da camada de brita: 0,1 m;
- Resistividade da brita: 3.000 Ω .m;
- Resistência do corpo humano: 1.000 Ω ;
- Tempo de eliminação da falta: 0,5 s;
- Corrente máxima de longa duração: 15 A;
- Corrente máxima permissível de longa duração: 10 mA;
- Profundidade dos condutores: 0,6 m;
- Espaçamento mínimo entre condutores: 3 m;
- Espaçamento máximo entre condutores: 8 m.

Nessas condições, os valores máximos admissíveis das tensões de passo e toque (critérios de projeto) resultaram:

- V_{passo} (longa duração) = 150,9 V;
- V_{toque} (longa duração) = 45,2 V;
- V_{passo} (curta duração) = 2.475,4 V;
- V_{toque} (curta duração) = 741,9 V.

B.1 Área do Terreno 40 x 40 m

Inicialmente foram analisadas malhas de terra com espaçamento igual entre condutores, cujos resultados estão na tabela 3.

Tabela 3 – Resultados das Simulações (Malha Regular)

	Malhas Analisadas							
	1	2	3	4	5	6	7	8
NC	28	26	24	22	20	18	16	14
Esp(m)	3,077	3,333	3,636	4,0	4,444	5,0	5,714	6,667
V_p (Id)	11,6	11,8	11,9	12,2	12,5	13,0	13,5	14,1
V_t (Id)	19,3	20,3	21,5	22,8	24,3	26,6	29,6	33,6
V_p (cd)	275,9	279,1	283,4	289,3	297,2	306,5	318,2	332,9
V_t (cd)	458,8	482,8	510,6	539,5	575,8	628,5	698,7	790,4
R_m (Ω)	5,95	6,01	6,07	6,15	6,22	6,33	6,47	6,66
$I_{m(c.c.)}$	356,5	356,3	356,0	355,7	355,3	354,8	354,2	353,4

Analisando a tabela 3 verifica-se que:

- Até a malha 7 são obedecidos os critérios de projeto;
- Para a malha 8 foi superado o valor da tensão de toque de curta duração (790,4 V para um valor máximo admissível de 741,9 V).

Desta forma, a malha regular otimizada é a malha 7 com 16 condutores (8 condutores em cada direção), com 5,714 m de espaçamento entre condutores, resistência de malha igual a 6,47 Ω e corrente de curto-circuito de 354,2 A. A figura 7 ilustra a disposição dos condutores dentro da malha.

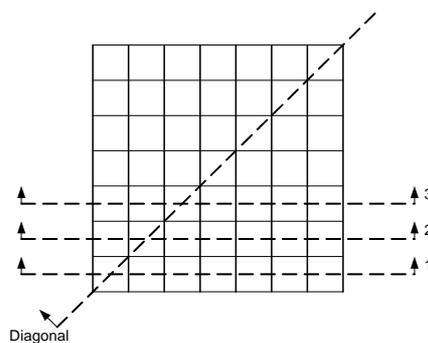


Figura 7 – Malha de Terra Regular com 8 condutores em cada Direção

As figuras 8 a 10 apresentam os potenciais de malha e as tensões de toque e passo ao longo dos eixos da malha (vide figura 7).

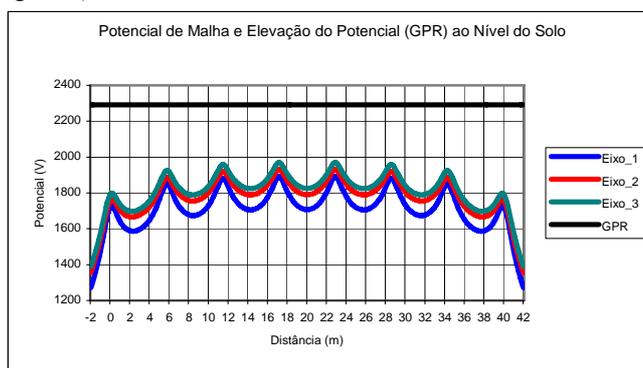


Figura 8 – Potencial de Malha e Elevação do Potencial ao Nível do Solo

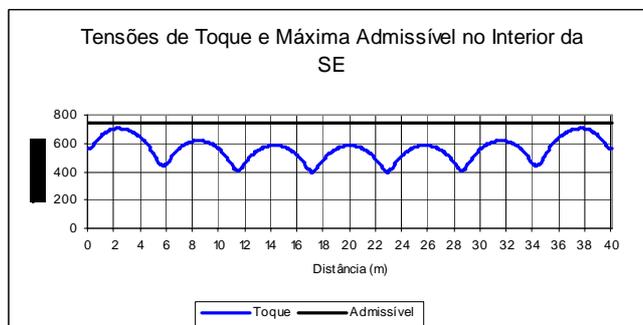


Figura 9 – Tensões de Toque (Eixo 1) e Máxima Admissível

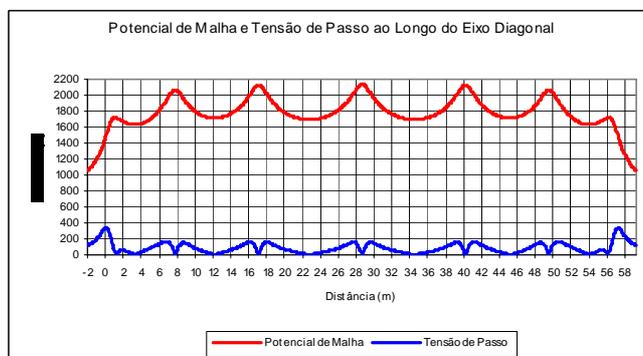


Figura 10 – Potencial de Malha e Tensão de Passo – Eixo Diagonal

A partir do resultado obtido para a malha 7, foi pesquisada uma malha de terra com espaçamento não uniforme entre condutores (malha irregular).

Foi utilizado fator de compressão (f_c) igual a 0,8 (devido aos valores da resistividade do solo). Foram pesquisadas 2 malhas de terra: com 7 e com 6 condutores em cada direção. Somente com a malha com 7 condutores foram atendidos os critérios de projeto (figura 11).

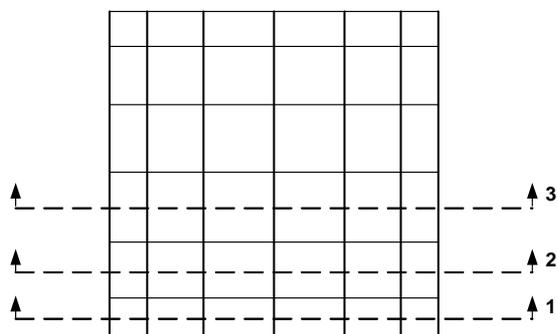


Figura 11 – Malha de Terra Irregular com 7 condutores em cada direção ($f_c=0,8$)

Os resultados para a malha com 7 condutores estão apresentados nas figuras 12 e 13 (potencial de malha e tensão de toque):

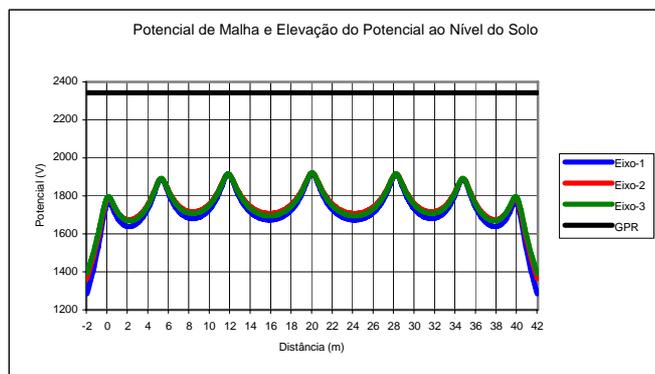


Figura 12 – Potencial de Malha e Elevação do Potencial ao Nível do Solo

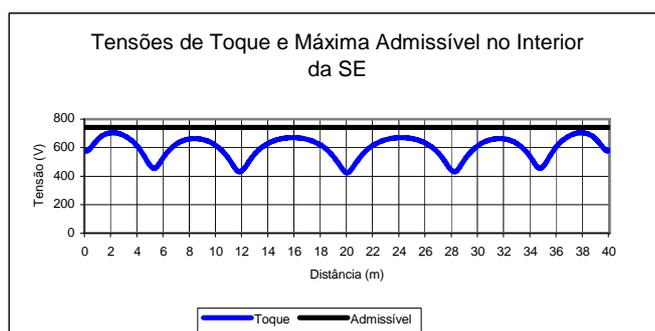


Figura 13 – Tensões de Toque (Eixo 1) e Máxima Admissível

Desta forma verificou-se que para uma área de terreno 40 x 40 m não houve necessidade da drenagem de parte da corrente para fora da subestação. As 2 soluções encontradas foram:

- Malha regular: 8 condutores em cada direção.
Custo: R\$ 115.575,68, correspondente a R\$ 100.160,00 (obras civis) e R\$ 15.415,68 (cabos condutores);
- Malha irregular: 7 condutores em cada direção.

Custo: R\$ 113.648,72, correspondente a R\$ 100.160,00 (obras civis) e R\$ 13.648,72 (cabos condutores).

B.2 Área do Terreno 20 x 20 m

Nessa condição, a malha com espaçamento mínimo de 3 m entre condutores (7 condutores em cada direção espaçados de 3,333 m), não atendeu os critérios de tensão de toque de curta e longa duração. Os valores obtidos foram:

- V_{passo} (longa duração) = 33,6 V;
- V_{toque} (longa duração) = **56,0 V** (tolerável: 45,2V);
- V_{passo} (curta duração) = 696,9 V;
- V_{toque} (curta duração) = **1.161,3 V** (tolerável: 741,9V).

Demais valores obtidos:

- R_{malha} = 13,89 Ω ;
- $I_{\text{malha (c.c.)}}$ = 310,82 A.

Para que sejam atendidos os critérios de projeto, a corrente de malha de curto-circuito deve ser, no máximo, igual a 188,65 A. Desta forma verificou-se a necessidade de drenar parte da corrente de curto-circuito para fora da malha de terra da subestação.

Foram pesquisados 2 tipos de aterramento auxiliar: aterramento de várias estruturas da linha de distribuição e instalação de “fio contrapeso” em uma estrutura da linha.

Como critério de projeto, foi assumido que as estruturas das linhas de distribuição são “não metálicas” e que não são permitidas instalações metálicas próximas aos postes das linhas. Desta forma, neste exemplo, os critérios a serem obedecidos referem-se, unicamente, às tensões de passo.

Fora da subestação, sem a existência da camada de brita, os valores máximos admissíveis para as tensões de passo foram:

- V_{passo} (longa duração) = 64,0 V;
- V_{passo} (curta duração) = 1.049,6 V.

B.2.1 Aterramento de Estruturas da LD

Foi utilizado o aterramento de estrutura mostrado na figura 14, constituído de um anel de 2m de raio e 4 hastes. O aterramento individual de cada estrutura resultou igual a 57,05 Ω .

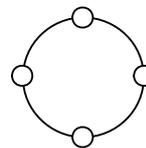


Figura 14 – Aterramento de Estrutura (Anel e Hastes)

Para que a corrente na malha de terra da subestação não superasse o valor máximo de 188,65 A, houve necessidade da instalação desse aterramento auxiliar em 8 estruturas da linha de distribuição.

Nessas condições, resultaram os seguintes valores:

$$I_{\text{malha}} = 180,05 \text{ A (menor que } 188,65 \text{ A);}$$

$$I_{\text{aterramento auxiliar}} = 344,44 \text{ A;}$$

$$I_{1^{\text{a}} \text{ estrutura}} = 43,84 \text{ A.}$$

A 1ª estrutura é a que drena a maior parcela de corrente e nessa estrutura deve ser avaliada a tensão de passo, cujo perfil está apresentado na figura 15.

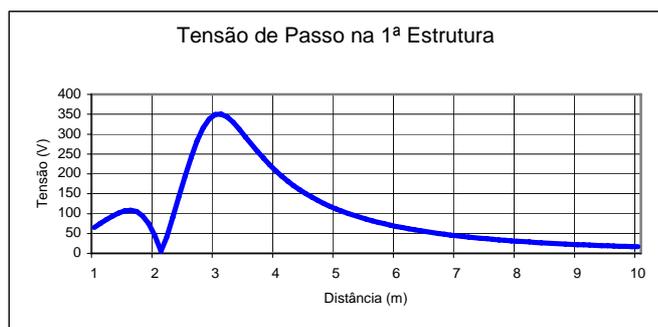


Figura 15 – Tensão de Passo na 1ª Estrutura Aterrada

O valor máximo da tensão de passo atingiu a 350,3 V (valor máximo = 1.049,6 V), atendendo os critérios de projeto.

B.2.2 Instalação de “Fio Contrapeso”

Foi utilizado o “fio contrapeso” simples, constituído de um cabo condutor cujo ponto central está situado no poste da linha de distribuição. Esse condutor foi assumido instalado na 3ª estrutura.

Para que a corrente na malha de terra da subestação não superasse o valor máximo de 188,65 A, houve necessidade da instalação de 230 m de cabo, resultando numa resistência de aterramento de 7,43 Ω .

Nessas condições, resultaram os seguintes valores:

$$I_{\text{malha}} = 187,98 \text{ A}$$

$$I_{\text{aterramento auxiliar}} = 331,39 \text{ A}$$

A tensão de passo na estrutura onde está colocado o “fio contrapeso” está apresentada na figura 16.



Figura 16 – Tensão de Passo na Estrutura com “Fio Contrapeso”

A tensão de passo máximo atingiu o valor de 300,1 V (valor máximo = 1.049,6 V), atendendo os critérios de projeto.

Desta forma verificou-se que para uma área de terreno 20 x 20 m houve necessidade de se drenar corrente para fora da subestação. As 2 soluções encontradas foram:

- Malha de terra regular com 7 condutores em cada direção do terreno e aterramento de 8 estruturas da linha de distribuição (anel de 2 m com 4 hastes).
Custo: R\$ 41.110,36, correspondente a R\$ 35.384,36 (malha de terra) e R\$ 5.726,00 (aterramento de estruturas);
- Malha terra regular com 7 condutores em cada direção do terreno e utilização de 230 m de “fio contrapeso” (simples) na 3ª estrutura da linha de distribuição a partir da subestação.

Custo: R\$ 40.706,36, correspondente a R\$ 35.384,36 (malha de terra) e R\$ 5.322,00 (aterramento de estruturas).

IV. CONCLUSÕES

O artigo apresentou uma metodologia para otimização do dimensionamento de sistemas de aterramento de subestações, composto de malha de terra da subestação e de aterramentos de estruturas das linhas de distribuição.

Desta forma, o projetista pode, de forma expedita, analisar várias alternativas de sistemas de aterramento, podendo decidir pelo sistema mais adequado, para a empresa, em termos técnicos e econômicos.

As características principais merecedoras de destaque dessa metodologia são:

- O solo é estratificado em 2 camadas, diferentemente da aproximação da Norma IEEE80, que considera solo homogêneo, com uma resistividade aparente.
- Os condutores da malha de terra são subdivididos em segmentos, sendo calculadas as resistências própria e mútua entre segmentos.
- Em função da consideração anterior, é calculada a distribuição de corrente dispersada ao longo do condutor, sendo assim levada em consideração a maior densidade de corrente que ocorre na direção da periferia da malha.
- Permite dimensionamento de malha de terra com perfil de potencial constante ao longo dos eixos da malha.
- Otimização do sistema de aterramento selecionado.

V. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Aterramento Elétrico (Livro) – Geraldo Kindermann e Jorge Mario Campagnolo
- [2] “IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding” – IEEE Std 80-2000.
- [3] “Computation of Potential at Surface Above an Energized Grid or Other Electrode, Allowing for Non-Uniform Current Distribution” – Robert J. Heppel – IEEE Transactions on PAS, Nov./Dec. 1979, pp. 1978 – 1989.
- [4] “Optimum Design of Substation Grounding in a Two Layer Structure – Parts I, II and III” – Farid Dawalibi, Dinkar Mukhedkar – IEEE Transactions on PAS, March/April 1975, pp. 252 – 272.
- [5] “Efficient Ground Grid Designs in Layered Soils” – Hyung-Soo Lee, Jung-Hoon Kim, Farid Dawalibi, Jinxi Ma – IEEE Transactions on Power Delivery, July 1998, pp. 745 – 751.