
LT 500 kV ESTREITO – FERNÃO DIAS CD

PROJETO BÁSICO

CAPÍTULO 15

SISTEMA DE ATERRAMENTO

CONTEÚDO

1. OBJETIVO
2. DADOS
3. RESISTIVIDADE DO SOLO DA REGIÃO
4. METODOLOGIA DE CÁLCULO DA RESISTÊNCIA DOS CABOS CONTRAPESOS
5. SISTEMA DE ATERRAMENTO PROPOSTO
 - 5.1. Etapas do Sistema de Aterramento Proposto
 - 5.2. Forma de Identificação das Fases de Aterramento no Projeto Definitivo
 - 5.3. Aterramentos Especiais
 - 5.4. Metodologia para Casos Especiais
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

SISTEMA DE ATERRAMENTO

1. OBJETIVO

A redução das resistências de aterramento das estruturas de uma linha de transmissão constitui um dos meios efetivos de controlar as sobretensões provocadas pelas descargas atmosféricas.

Essa redução deve obedecer a um compromisso econômico entre o custo do sistema de aterramento e a performance desejada da LT.

No presente caso o sistema de aterramento das estruturas da LT 500 kV Estreito – Fernão Dias CD deve ser compatível com a taxa de desligamentos de 1 desligamento / 100 km / ano especificada no Edital nº 01/2014 da ANEEL.

Portanto, para a LT em questão, adotou-se uma solução considerada econômica que se aproxima de um desempenho viável.

2. DADOS

- Resistência de aterramento média máxima esperada.....20 Ω
- Cabo contrapeso adotado.....Aço Galvanizado 3/8" SM
- Diâmetro do cabo contrapeso.....9,525 mm
- Profundidade do cabo contrapeso0,80 m (para áreas cultiváveis 1,0 m)

3. RESISTIVIDADE DO SOLO DA REGIÃO

A expectativa é de que a região a ser atravessada pelas linhas de transmissão apresente resistividades elétricas do solo da ordem de 1000 Ω .m.

A seguir são definidas as configurações de aterramento a serem utilizadas.

Na fase do projeto definitivo, deverão ser feitas medições de resistividade em todos os pontos onde serão montadas as torres e, a partir delas e das configurações de aterramento aqui indicadas, deverá ser feita a identificação da fase de aterramento mais adequada para cada torre.

4. METODOLOGIA DE CÁLCULO DA RESISTÊNCIA DOS CABOS CONTRAPESOS

As resistências dos aterramentos, cujas geometrias são citadas a seguir, foram calculadas utilizando-se um método matricial que consiste basicamente na resolução do sistema linear apresentado a seguir.

$$\begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & \dots & R_{1N} \\ R_{21} & R_{22} & \dots & R_{2N} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ R_{N1} & R_{N2} & \dots & R_{NN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_N \end{bmatrix}$$

onde:

- N → número de trechos de condutor em que o sistema de aterramento é subdividido (quanto maior o número de trechos em que um condutor é subdividido melhor a representação do fato da dispersão de corrente não ser uniforme ao longo de seu comprimento);
- R_{ij} → coeficiente de indução do trecho de condutor i em um ponto na superfície do trecho de condutor j (localizado simetricamente em relação às extremidades);
- R_{ij} → coeficiente de indução do trecho de condutor j em um ponto na superfície do trecho de condutor i (localizado simetricamente em relação às extremidades do trecho de condutor i);
- I_i → corrente que fluirá do trecho de condutor i para o solo;
- V_i → potencial imposto ao condutor i , em relação ao terra remoto.

Como todos os condutores estão metalicamente interconectados, para tensões de 60 Hz pode-se assumir que todos eles estão em um mesmo potencial V_m . Para um valor arbitrário de V_m , por exemplo 1,0 pode-se calcular as correntes em cada trecho de condutor. Com isto a resistência do aterramento será dada por :

$$R_{\text{aterramento}} = \frac{V_m}{\sum_{i=1}^N I_i}$$

Os coeficientes de indução R_{ij} são definidos como a elevação de potencial em um ponto i por unidade de corrente injetada no trecho de condutor j . Com isto, tais coeficientes são função dos seguintes parâmetros:

- geometria dos trechos de condutor (raio e comprimento);
- posição relativa de cada trecho de condutor em relação à superfície do solo;
- posição do ponto de cálculo em relação ao trecho de condutor para o qual se está calculando o coeficiente de indução;
- resistividade do solo (ou estratificação do solo em camadas, no caso do solo ser estratificado em duas camadas).

De forma geral as equações de cálculo dos coeficientes de indução podem ser escritas de forma semelhante à equação apresentada a seguir, que é específica para o cálculo do coeficiente de indução de um cabo horizontal j em um ponto i de um condutor horizontal, estando os dois condutores instalados na primeira camada de um solo estratificado em duas camadas horizontais.

Cálculo do coeficiente de indução para o caso específico de dois condutores horizontais na primeira camada do solo

$$R_{ij} = \frac{\rho_1}{4\pi L_j} \left\{ \begin{array}{l} \sum_{n=0}^{\infty} K^n [M(2nH + Z_i + Z_j)] + [M(2nH - Z_i + Z_j)] \\ + \sum_{n=1}^{\infty} K^n [M(2nH + Z_i - Z_j)] + [M(2nH - Z_i - Z_j)] \end{array} \right\}$$

onde:

$$K = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} \rightarrow \text{coeficiente de reflexão na interface entre camadas do solo}$$

ρ_1, ρ_2 $H \rightarrow$ estratificação do solo em camadas (resistividade da primeira e da segunda camadas e espessura da primeira camada, respectivamente); (resistividades em $\Omega.m$ e espessura em m)

$L_j \rightarrow$ comprimento do condutor (ou trecho de condutor) j (em m)

$Z_j \rightarrow$ profundidade do condutor (ou trecho de condutor) j (em m)

$Z_i \rightarrow$ profundidade do ponto i na superfície do condutor i (ou trecho de condutor) i (em m)

$$M(z) = \int_{L_j} \frac{1}{r_{ij}} dl_j$$

$z \rightarrow$ diferença de coordenadas z entre a imagem n do condutor j e o ponto i na superfície do condutor i (em m)

$r_{ij} \rightarrow$ distância do elemento infinitesimal dl_j , ao longo de uma imagem do condutor j , e o ponto i na superfície do condutor i (em m)

$n \rightarrow$ se refere ao número de imagens (é utilizado o método das imagens para considerar as reflexões de campo no solo)

Os raios dos condutores são utilizados na especificação dos pontos onde os coeficientes de indução são calculados (superfície dos condutores).

A Ref. [1] apresenta em detalhes as equações que permitem o cálculo dos coeficientes de indução.

5. SISTEMA DE ATERRAMENTO PROPOSTO

O sistema de aterramento consistirá na instalação de 4 ou 6 cabos contrapesos em disposição radial, conforme croquis apresentados a seguir, sendo adotada uma das fases indicadas nas Tabelas 1 e 2 de acordo com as resistividades efetivamente obtidas no local de cada estrutura e o tipo de estrutura (ver Item 5.2).

5.1 Etapas do sistema de aterramento proposto

Para efeito de definição do sistema de aterramento foram analisadas diversas configurações de contrapeso. Em todos os casos considerou-se a utilização das seguintes premissas:

- cabo de aço galvanizado 3/8" SM de diâmetro 9,525 mm;
- profundidade de instalação do cabo: 0,8 m;
- resistividade do solo: 1000 Ω .m (valor utilizado no cálculo da resistência dos aterramentos, para efeito de comparação de valores apresentados por cada um deles);
- configurações conforme croquis das Figuras 1 e 2, a seguir.

Quanto aos comprimentos propostos dos cabos contrapesos para as diversas fases de aterramento, os mesmos acham-se indicados nas Tabelas 1 e 2.

Nas Tabelas 3 e 4 são apresentadas as resistências que as diversas fases de aterramento apresentarão quando instaladas em um solo uniforme de resistividade 1000 Ω .m.

As Tabelas 5 e 6 apresentam os valores de resistividade do solo (uniforme) para os quais as diversas fases de aterramento implicarão em um valor de resistência igual ou inferior a 20 Ω .

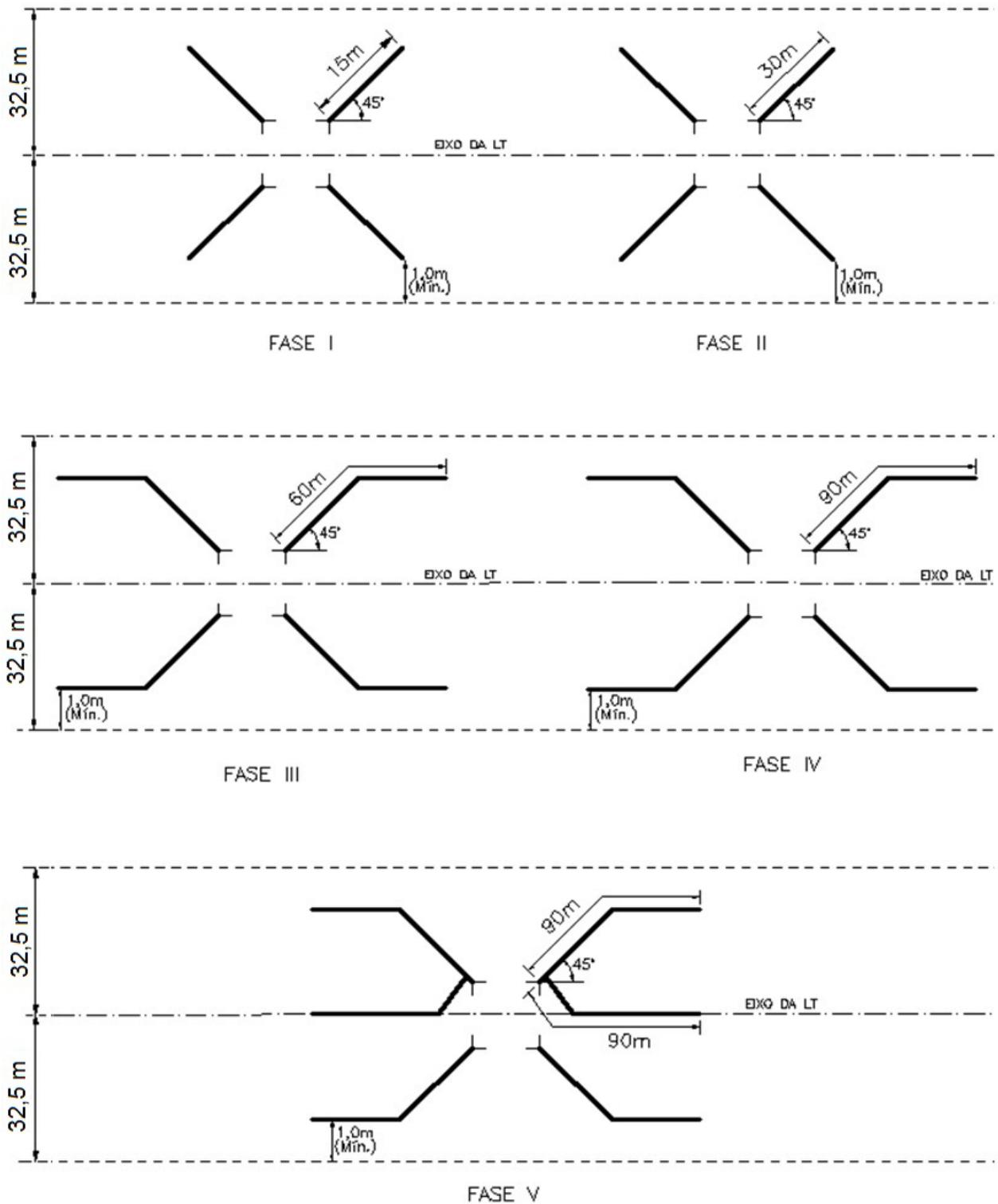


Figura 1 - Esquema das fases de aterramento das estruturas autoportantes (Fase I a V).

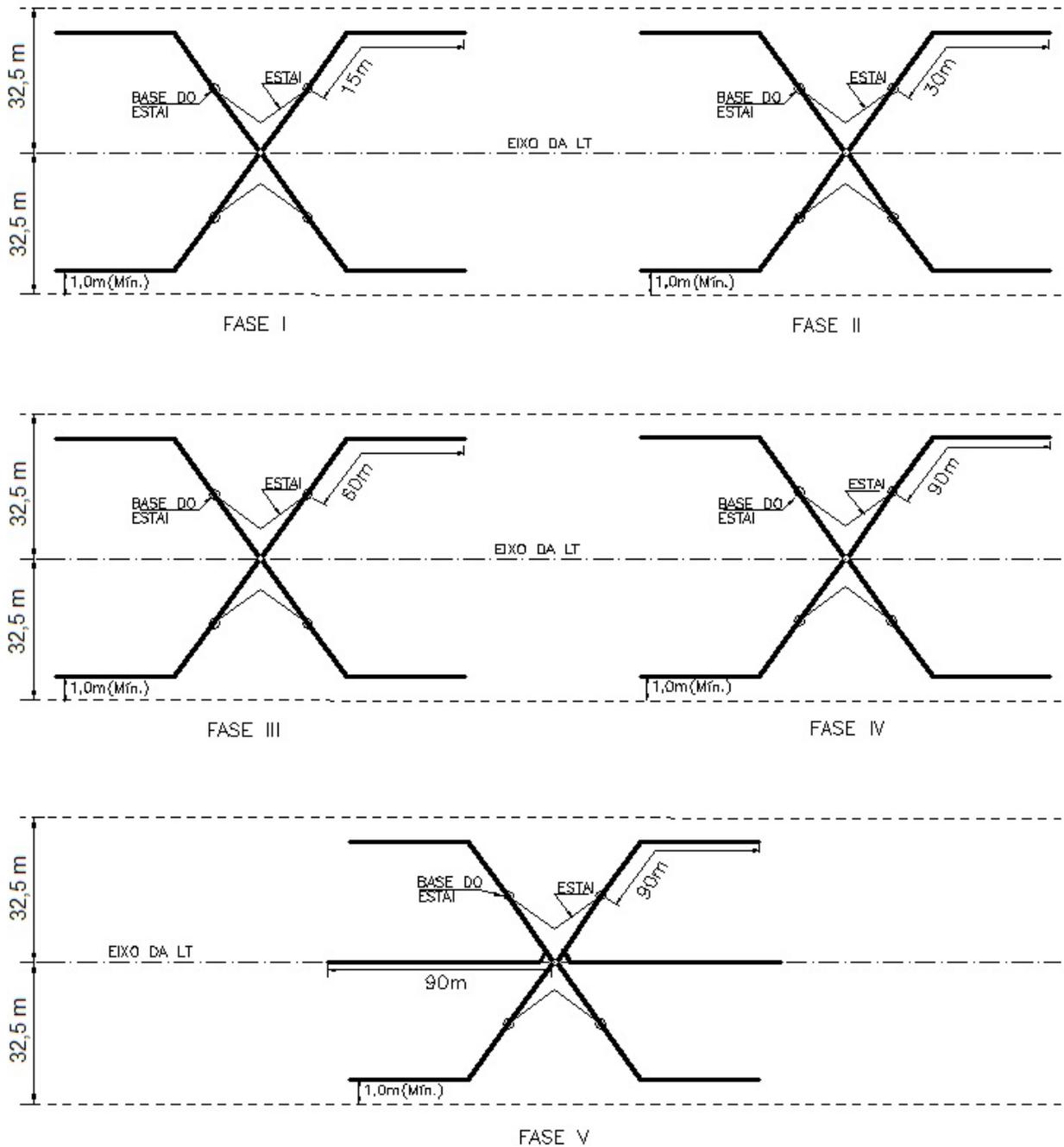


Figura 2 - Esquema das fases de aterramento das estruturas estaiadas (Fase I a V).

Tabela 1: Comprimentos dos cabos de aterramento das fases para as estruturas autoportantes

Fase de Aterramento	Comprimento dos cabos contrapesos
Fase I	4 x 15 m
Fase II	4 x 30 m
Fase III	4 x 60 m
Fase IV	4 x 90 m
Fase V	6 x 90 m

Tabela 2: Comprimentos dos cabos de aterramento das fases para as estruturas estaiadas

Fase de Aterramento	Comprimento dos cabos contrapesos ⁽¹⁾
Fase I	4 x L_{m-e} + 4 x 15 m
Fase II	4 x L_{m-e} + 4 x 30 m
Fase III	4 x L_{m-e} + 4 x 60 m
Fase IV	4 x L_{m-e} + 4 x 90 m
Fase V	4 x L_{m-e} + 6 x 90 m

(1) O comprimento dos cabos de conexão entre os mastros e os estais (L_{m-e}) variará em função da altura das estruturas.

Tabela 3: Resistência dos aterramentos das estruturas autoportantes quando da instalação dos mesmos em um solo de resistividade uniforme de 1000 Ω .m

Fase de Aterramento	Comprimento dos cabos contrapesos	$R_{\text{aterramento}}$ (Ω)
Fase I	4 x 15 m	32,1
Fase II	4 x 30 m	18,8
Fase III	4 x 60 m	10,7
Fase IV	4 x 90 m	7,7
Fase V	6 x 90 m	6,2

Tabela 4: Resistência dos aterramentos das estruturas estaiadas quando da instalação dos mesmos em um solo de resistividade uniforme de 1000 Ω .m

Fase de Aterramento	Comprimento dos cabos contrapesos ⁽¹⁾	R _{aterramento} (Ω)
Fase I	4 x L _{m-e} + 4 x 15 m	16,1
Fase II	4 x L _{m-e} + 4 x 30 m	12,2
Fase III	4 x L _{m-e} + 4 x 60 m	8,4
Fase IV	4 x L _{m-e} + 4 x 90 m	6,5
Fase V	4 x L _{m-e} + 6 x 90 m	5,7

(1) O comprimento dos cabos de conexão entre os mastros e os estais (L_{m-e}) variará em função da altura das estruturas. Para efeito do presente cálculo considerou-se L_{m-e} = 25 m.

Tabela 5: Resistividade de um solo uniforme para a qual cada fase das estruturas autoportantes implicará em uma resistência de aterramento igual ou inferior a 20 Ω

Fase de Aterramento	Comprimento dos cabos contrapesos	Máxima resistividade do solo para se ter R _{aterramento} de até 20 Ω (Ω .m)
Fase I	4 x 15 m	623
Fase II	4 x 30 m	1065
Fase III	4 x 60 m	1869
Fase IV	4 x 90 m	2600
Fase V	6 x 90 m	3226

Tabela 6: Resistividade de um solo uniforme para a qual cada fase das estruturas estaiadas implicará em uma resistência de aterramento igual ou inferior a 20 Ω

Fase de Aterramento	Comprimento dos cabos contrapesos ⁽¹⁾	Máxima resistividade do solo para se ter R _{aterramento} de até 20 Ω (Ω .m)
Fase I	4 x L _{m-e} + 4 x 15 m	1241
Fase II	4 x L _{m-e} + 4 x 30 m	1642
Fase III	4 x L _{m-e} + 4 x 60 m	2380
Fase IV	4 x L _{m-e} + 4 x 90 m	3076
Fase V	4 x L _{m-e} + 6 x 90 m	3509

(1) O comprimento dos cabos de conexão entre os mastros e os estais (L_{m-e}) variará em função da altura das estruturas. Para efeito do presente cálculo considerou-se L_{m-e} = 25 m.

5.2 Forma de identificação das fases de aterramento no projeto definitivo

Na fase do projeto definitivo, a identificação da fase de aterramento a ser adotada será feita da seguinte forma:

- deverão ser feitas medições de resistividade em todos os pontos onde serão montadas as torres;
- para cada local de medição (local de montagem de uma torre) deverá ser feita a estratificação do solo em camadas;
- a fase a ser instalada em um dado local será aquela que apresentar uma resistência igual ou inferior a 20Ω , no solo estratificado do local, e que possua o menor comprimento de cabo (o cálculo da resistência deverá ser feito utilizando-se metodologias de cálculo que impliquem em uma avaliação mais precisa da resistência, como a citada no Item 4).

Além deste processo, recomenda-se que durante a construção da LT, após a instalação das fases identificadas no processo citado acima, sejam feitas medições de resistência de aterramento em cada torre. Caso em uma dada torre seja encontrada uma resistência superior a 20Ω , um comprimento adicional de cabo contrapeso deverá ser instalado, de forma a se passar para a fase seguinte à já instalada (processo a ser feito até se instalar a Fase V).

5.3 Aterramentos especiais

Em solos de altíssimas resistividades ou quando a estrutura for instalada em um maciço rochoso, haverá uma grande dificuldade de se obter valores baixos de resistência de aterramento. Como o aumento do comprimento dos cabos contrapeso acima de 90 m é ineficiente para reduzir a impedância de surto apresentada pelo sistema de aterramento, em tais situações não será viável a obtenção de resistências de aterramento iguais ou inferiores a 20Ω .

Por outro lado, o fato das resistências de aterramento de algumas estruturas apresentarem valores superiores a 20Ω em um pequeno percentual da LT não deverá alterar de forma significativa o desempenho final da mesma, desde que a média se situe abaixo de 20Ω , não podendo ocorrer resistências de aterramento altas para estruturas seqüenciais em trechos longos, bem como para torres localizadas em regiões críticas de incidência de descargas atmosféricas.

Assim, na fase de projeto definitivo, só se justificará o projeto de sistemas de aterramento especiais para algumas torres (onde não seja possível obter valores aceitáveis de resistência) caso se identifique que, ao se instalar apenas as fases de aterramento citadas nos itens anteriores, não será obtido um valor médio de resistência abaixo de 20Ω ao longo da LT.

É importante observar que na presente fase dos estudos (projeto básico), trabalha-se com uma resistência média de aterramento de 20Ω . No que se refere ao comportamento do sistema de aterramento a impulso, para o caso de solos de alta resistividade, deve ser levada em conta a natureza do fenômeno. Para avaliação da taxa de desligamento, os fenômenos envolvidos são de natureza atmosférica. O

mecanismo fundamental é o da incidência de raios por descargas diretas na torre (“back-flashover”). De acordo com a literatura sobre o assunto, as solicitações no topo da torre, advindas das ondas trafegantes causadas pela descarga, atingem o sistema formado pelos cabos para-raios/torre/sistema de aterramento e conduzem a uma sobretensão de surto com duração de cerca de 1,5 μ s. Aplicada sobre as cadeias de isoladores, essa sobretensão poderá acarretar uma descarga, propiciando condição para a ocorrência de um defeito, seguido do desligamento da linha. Desta forma, é de fundamental importância que o valor a ser considerado para o sistema de aterramento, no modelo do circuito para as ondas trafegantes, seja determinado para um tempo da ordem de 1,5 μ s.

Cabe assinalar que o programa utilizado para a simulação de cálculo do desempenho da linha frente a descargas atmosféricas (Flash) utiliza modelagem simplificada, tanto para as torres como para os sistemas de aterramento destas. Apesar de tudo, a prática tem demonstrado que esse programa tem apresentado resultados satisfatórios.

5.4 Metodologia para casos especiais

Conforme citado no Item 5.3, ao se utilizar o processo indicado no Item 5.2, caso se identifique que a resistência de aterramento média da LT não será igual ou inferior a 20 Ω , será necessário realizar estudos e cálculos específicos, considerando as resistividades elétricas medidas e que tenham levado a valores muito elevados de resistência, especialmente se estiverem concentrados numa região mais extensa.

A partir das resistividades medidas (ou estimadas) para cada uma das torres e utilizando programa especialmente desenvolvido para tal fim, poderão ser determinados novos arranjos e calculados os comprimentos de contrapesos para que seja atingido o valor médio de 20 Ω para a resistência de aterramento. Os dados obtidos poderão permitir que sejam definidas algumas faixas para a resistividade do solo às quais se associem diferentes esquemas de instalação de contrapesos.

Em adição, poderá ser considerado o uso de hastes ou poços de aterramento profundo com o objetivo de reduzir a resistência de aterramento de torres localizadas em solos de altos valores de resistividade em sua primeira camada.

Dentro do contexto de casos especiais enquadram-se também aquelas estruturas que se encontram em regiões urbanas ou regiões com trânsito intenso de pessoas, podendo-se nestas circunstâncias utilizar arranjos em anel com hastes de aterramento, de forma a se garantir níveis de tensão de passo e toque que atendam aos requisitos de segurança.

O processo aqui descrito visa a obtenção de valores de resistência abaixo de 20 Ω na maioria das estruturas, bem como a obtenção das resistências mais baixas possíveis em situações críticas (onde a obtenção de valores próximos de 20 Ω for inviável por questões de custo), de forma que a resistência média da LT seja igual ou inferior a 20 Ω .

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] - Dawalibi, F. and Mukhedkar, D. - “Optimum Design of Substation Grounding in Two Layer Earth Structure; Parte I - Analytical Study”, IEEE Trans. on PAS, vol. PAS-94, No. 2, 1975 - pp. 252-272.

- [2] - Heppe, R.J. - “Computation of Potential at Surface Above na Energized Grid or Other Electrode, Allowing for Non Uniform Current Distribution”- IEEE Trans. on PAS, vol. PAS-98, Dec. 1979. pp-1978-1989.

- [3] - Ewy. A. K. & Smolleck, H. A. – “A Graphical Explanation of The Resistance and Surface-Potential Calculations For Grounding Systems in Two-Layer Earth” – IEEE Trans. on PAS, vol. PAS-103, No. 3, Mar. 1984 . pp. 631-639.