

Melhoria do desempenho de linhas de transmissão de alta tensão através da utilização de malhas de aterramento de baixo valor de impedância

José Osvaldo S. Paulino, Ivan J. S. Lopes, Eduardo N. Cardoso, Alexander B. Lima, Thiago C. Dias
José Renato Simões Machado, Marco Antônio M. Rennó

Resumo – No Brasil, as descargas atmosféricas são responsáveis por 65% dos desligamentos das linhas de transmissão (LT's). Este é um problema a ser enfrentado, pois a cada dia aumenta-se a confiabilidade exigida do sistema elétrico. Este trabalho apresenta uma idéia inovadora para a minimização do número de desligamentos através da redução do valor da impedância da malha de aterramento, com a utilização de malhas especiais que proporcionam um desempenho das LT's similar àquele obtido quando da instalação de pára-raios de linha nas três fases em todas as estruturas e, ainda, de menor custo. Os estudos são baseados em cálculos analíticos e em simulações computacionais do desempenho de LT's de 230kV e 345kV, onde são discutidos o comprimento efetivo do cabo contrapeso, os valores da resistência de aterramento e da impedância impulsiva e seus impactos nos valores das tensões que surgem nas cadeias de isoladores.

Palavras-chave – Aterramento, Desempenho de linha, Descargas atmosféricas, Linhas de transmissão, Proteção.

I. INTRODUÇÃO

O presente trabalho foi financiado por recursos de um Projeto de Pesquisa & Desenvolvimento celebrado entre as empresas TRANSLESTE, TRANSIRAPÉ e a UFMG.

O objetivo básico deste projeto foi detalhar uma solução para a melhoria do desempenho, frente a descargas atmosféricas, de linhas de transmissão de 230 e 345 kV, por meio da aplicação de malhas de aterramento especiais em estruturas "problemáticas". Os resultados de desempenho e os custos da solução proposta foram comparados com os existentes,

quando a solução baseia-se na instalação de equipamentos pára-raios.

Este trabalho foi desenvolvido no âmbito do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico do Setor de Energia Elétrica regulado pela ANEEL e consta dos Anais do VI Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica (VI CITENEL), realizado em Fortaleza/CE, no período de 17 a 19 de agosto de 2011, tendo como autores:

(*) J. O. S. Paulino (josvaldo@cpdee.ufmg.br), I. J. S. Lopes (Ivan@dee.ufmg.br), E. N. Cardoso (nohme@dee.ufmg.br), professores do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais e A.B. Lima (alexlima@cpdee.ufmg.br), aluno do curso de pós-graduação e T. C. Dias (thiagocd89@gmail.com), aluno do curso de graduação, ambos da Universidade Federal de Minas Gerais, Av. Antônio Carlos 6627, Campus Pampulha, Belo Horizonte – MG, Brasil.

(**) J. R. S. Machado (jrenato.machado@transmineira.com.br), M. A. Rennó (marco.renno@transmineira.com.br), membros da Diretoria da Cia. Transleste de Transmissão e da Cia Transirapé de Transmissão.

Os principais produtos gerados no projeto foram:

- determinação dos valores das resistências / impedâncias de aterramento de pé de torre de linhas que proporcionem um desempenho similar àquelas protegidas por pára-raios;
- projetos de malhas de aterramento com valores de impedância inferiores aos especificados para linhas instaladas em solos de resistividade aparente variando de 100 Ωm a 4.400 Ωm .

Este projeto está concluído e recebeu o código ANEEL: PD-4734-0001/2009.

II. VALOR ÓTIMO DA RESISTÊNCIA DE ATERRAMENTO

Os valores das resistências de aterramento das torres de uma linha de transmissão que irão garantir um desempenho frente a descargas atmosféricas similar àquele alcançado por uma linha protegida por pára-raios de linha instalados nas três fases foram determinados utilizando-se programas computacionais, como também por meio de metodologia analítica desenvolvida em [1].

Os estudos das simulações computacionais foram realizados considerando-se uma expectativa de desempenho entre 0,5 e 1,0 desligamentos/100km/ano, para linhas de transmissão de 230kV e 345kV. Os resultados obtidos para os valores médios para as resistências de aterramento, que levariam essas LT's a apresentar desempenhos satisfatórios, situaram-se na faixa de 7 Ω a 12,5 Ω para uma linha de 230 kV e de 19 Ω a 27 Ω para uma linha de 345 kV.

Os valores obtidos em [1], seja pelo método analítico seja pelo probabilístico, estão bem próximos de valores publicados na literatura. Chama atenção, por exemplo, um trabalho publicado recentemente por pesquisadores japoneses [2] onde é sugerido que o valor da resistência de aterramento "ideal" nas faixas de tensão de 275 e 500 kV é de 13 Ω , bem próximo dos valores da referência [1].

No presente estudo foram propostos arranjos de malhas de aterramento que levassem a uma resistência de aterramento máxima de 13 Ω .

III. IMPEDÂNCIA E RESISTÊNCIA DE ATERRAMENTO

Os valores das tensões que aparecem nas cadeias de isoladores da linha em função do valor da resistência de ater-

ramento foram também calculados na referência [1]. Na realidade este cálculo é uma aproximação, pois a tensão na cadeia de isoladores depende do valor da impedância de aterramento e não do valor da resistência.

No domínio do tempo, o comportamento do aterramento frente a ondas de corrente impulsivas de alta frequência normalmente é determinado em termos da impedância impulsiva, Z . Este parâmetro é definido como a razão entre os picos de tensão e de corrente no ponto de injeção de corrente. A despeito da não simultaneidade da ocorrência destes picos, este é um conceito bastante atrativo do ponto de vista prático, tendo em vista que a máxima sobretensão resultante no ponto de injeção pode ser determinada simplesmente pela multiplicação do valor do pico de corrente por Z .

O valor da impedância impulsiva depende da forma de onda do fenômeno solicitante, sobretudo do seu tempo de frente, [3].

O cálculo da impedância de aterramento requer a utilização de programas computacionais elaborados conforme demonstrado em [3, 4 e 5]. Entretanto, quando o valor do comprimento dos cabos da malha é inferior ao valor do comprimento efetivo, uma aproximação razoável pode ser obtida tomando-se o valor da impedância como sendo igual ao da resistência ($Z/R = 1$).

A referência [5] calcula a impedância de malhas de aterramento de torres de transmissão, considerando a estratificação do solo e a contribuição das grelhas (fundações) das torres nos valores destas. As relações Z/R apresentadas são da ordem de 1,0 e os valores da relação Z/R são maiores do que a unidade, em solos de baixo valor de resistividade. Neste trabalho, o valor da relação Z/R será considerado igual a 1,0, valor este de maior consenso na literatura [3].

Para os casos de utilização de bentonita no aterramento, a referência [6] sugere a expressão (1) que relaciona os valores das resistências/impedâncias da malha com e sem o tratamento químico:

$$\frac{R_{\text{Envolto em bentonita}}}{R} = 0,70 \cdot \quad (1)$$

Para a geometria de malha mostrada na Figura 1, a resistência de aterramento pode ser calculada pelas expressões (2), (3) e (4) retiradas de [3].

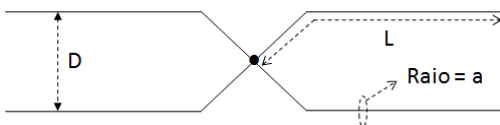


Figura 1 – Geometria da malha constituída de 04 cabos contrapesos.

$$R_L = \frac{\rho}{\pi L} \left[\ln \left(\frac{2L}{\sqrt{2ad}} \right) - 1 \right]; \quad (2)$$

$$R_M = \frac{\rho}{\pi L} \left[\ln \left(\frac{2L}{\sqrt{2Dd}} \right) - 1 \right]; \quad (3)$$

$$R = \frac{R_L + R_M}{4} \cdot \quad (4)$$

Onde:

- R_L – resistência própria do cabo contrapeso (Ω);
- R_M – resistência mútua do cabo contrapeso (Ω);
- R – resistência equivalente do cabo contrapeso (Ω);
- L – comprimento de cada cabo contrapeso (m);
- a – diâmetro do cabo contrapeso (m);
- d – profundidade do cabo contrapeso (m);
- D – distância entre os cabos contrapesos (m);
- ρ – resistividade do solo (Ωm).

Para a geometria de malha mostrada na Figura 2, a resistência de aterramento pode ser calculada pelas expressões (2), (3) e (5).

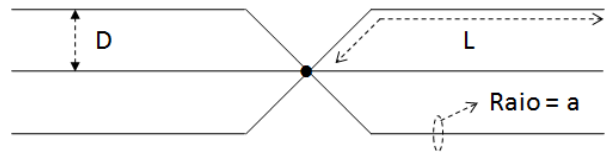


Figura 2 – Geometria da malha constituída de 06 cabos contrapesos.

$$R = \frac{R_L + 2R_M}{6} \cdot \quad (5)$$

IV. COMPRIMENTO EFETIVO

A Figura 3 apresenta um cabo contrapeso de raio “a” e comprimento “l” enterrado a uma profundidade “d” em um solo de resistividade “ ρ ”, e o modelo para sua representação elétrica é apresentado na Figura 4, onde L' é o valor da indutância por metro, G' é o valor da resistência por metro e C' o valor da capacitância por metro.

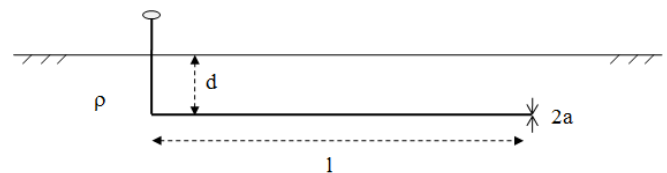


Figura 3 – Cabo contrapeso no solo.

O circuito da Figura 4 pode ser resolvido no domínio do tempo utilizando-se programas computacionais, tais como o PSPICE, ou analiticamente no domínio da frequência.

O aumento do comprimento “l” do cabo sempre leva a uma diminuição do valor da resistência de aterramento. Entretanto, o mesmo não acontece com a impedância. A partir

de um dado comprimento de cabo, valor que depende da resistividade do solo, o valor da impedância fica estabilizado e não mais diminui quando seu comprimento é aumentado. Este comprimento é chamado de comprimento efetivo do cabo contrapeso.

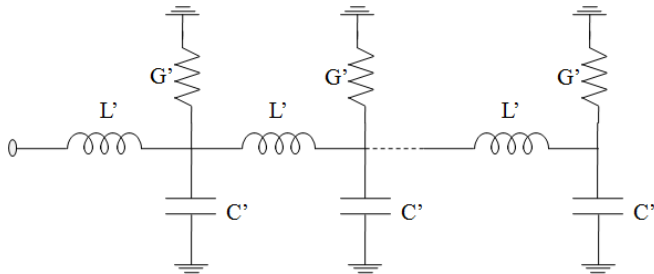


Figura 4 – Modelo de cabo contrapeso.

A explicação para este comportamento reside no fato de que quando uma corrente impulsiva é aplicada a um condutor longo enterrado no solo, a onda eletromagnética correspondente propaga-se ao longo deste guiada pelo condutor. Por essa razão, este sistema se comporta como uma linha de transmissão imersa num meio com perdas havendo, consequentemente, atenuação e distorção da onda aplicada. A atenuação ocorre devido às perdas no condutor para o meio (solo). A distorção por sua vez deve-se às diferentes velocidades de propagação das várias componentes de frequência contidas no sinal impulsivo aplicado. Como resultado, a onda de corrente que propaga ao longo do eletrodo tem sua amplitude atenuada e, além disso, sofre deformações com a redução da inclinação da frente de onda. Esses aspectos são ilustrados na Figura 5.

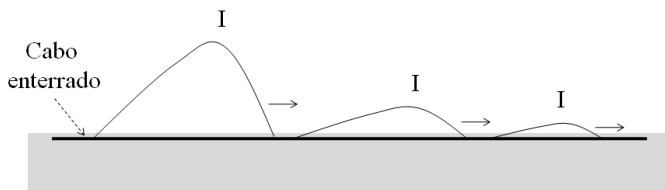


Figura 5 – Atenuação e distorção da corrente ao longo do aterramento.

O valor da impedância de um cabo enterrado em função de seu comprimento para vários valores de resistividade é mostrado na Figura 6, podendo-se perceber que existe um limite para o comprimento do cabo contrapeso.

Portanto, aumentar o comprimento do cabo contrapeso além deste limite provoca uma redução no valor da resistência da malha, mas não promove uma redução no valor da impedância.

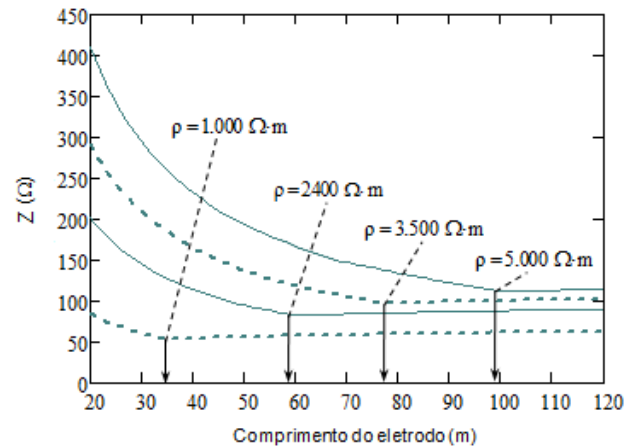


Figura 6 – Comprimento efetivo de um cabo enterrado na horizontal para uma onda de corrente $1,2 \times 20 \mu s$ e para resistividades do solo iguais a 1000, 2400, 3500 e 5000 $\Omega \cdot m$. Retirado de [3].

O efeito do comprimento efetivo do cabo contrapeso pode ser visualizado de forma mais clara analisando-se os valores de tensão no início do cabo em função do seu comprimento. Para um solo de resistividade igual a 1000 $\Omega \cdot m$ e para uma onda de corrente $1,2 \times 20 \mu s$, as tensões no início do cabo são mostradas na Figura 7, retirada da referência [3]. A partir desses gráficos observa-se que, para um pequeno comprimento de cabo enterrado, irão ocorrer reflexões de onda em sua extremidade, acarretando em uma elevação de tensão na extremidade inicial. Neste caso, segundo a referência [3], o comprimento efetivo é igual a 35 m.

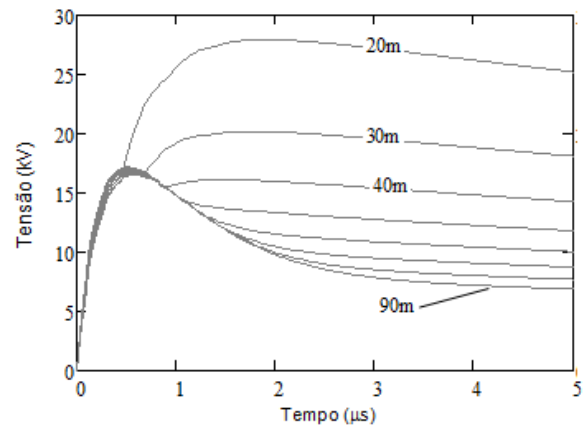


Figura 7 - Tensão no início do cabo contrapeso, enterrado em um solo de 1000 $\Omega \cdot m$ e percorrido por uma corrente com forma de onda $1,2 \times 20 \mu s$. Retirado de [3].

V. CABO CONTRAPESO ALTERNATIVO

Uma idéia inovadora e simples para a redução do valor da impedância da malha de aterramento constituída de cabos contrapesos é mostrada na Figura 8. O conceito proposto, de razoável facilidade de implementação, sugere uma metodologia para contornar o problema de aumentar o comprimento dos cabos além do valor do comprimento efetivo e, por conseguinte, na redução da impedância.

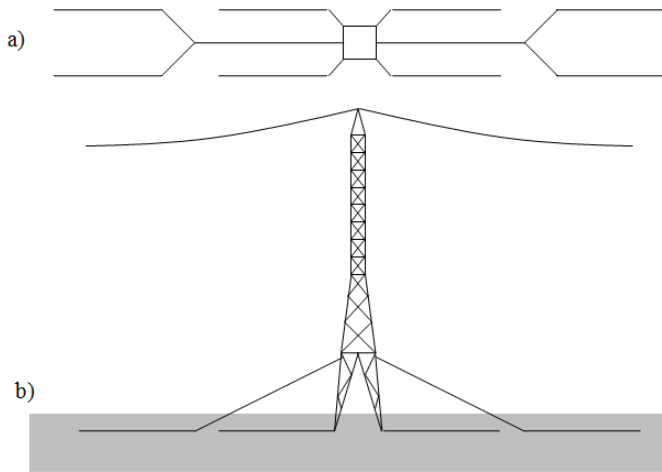


Figura 8 – Aterramento de torre com cabos contrapeso alternativo, a) vista de topo, b) vista lateral.

O arranjo proposto considera duas malhas constituídas de cabos contrapesos, interligadas por meio de um cabo de aço. A primeira malha é ligada diretamente à base da torre e a segunda malha por meio de um cabo de aço aéreo. As duas malhas de aterramento são ligadas em paralelo.

Entretanto como as correntes de descarga são surtos (ondas impulsivas), o tempo de viagem das ondas no cabo de aço que interliga as duas malhas precisa ser considerado. Para avaliar o efeito deste tempo de trânsito foram realizadas algumas simulações no PSPICE.

Os arranjos de malha considerados são mostrados na Figura 9:

- malha A), em arranjo único, constituída de quatro cabos contrapesos de comprimento 100 m, instalada em um solo de resistividade ρ_0 ;
- malha B), constituída de dois arranjos de 04 cabos contrapesos de 100 m de comprimento cada, interligadas por um cabo aéreo de 100 m de comprimento;
- malha C), idêntica à malha A), diferindo apenas no valor da resistividade do solo que foi reduzida à metade ($\rho_0/2$). Naturalmente, o valor da impedância da malha C) deve ser igual à metade do valor correspondente à malha A).

Os cabos das malhas de aterramento foram simulados como linhas de transmissão com perdas (Figura 4), de 100 m de comprimento, com os seguintes parâmetros [3 e 4]:

$$G' = 375 \mu S/m \text{ (para } \rho_0 = 1.000 \Omega m);$$

$$G' = 37,5 \mu S/m \text{ (para } \rho_0 = 10.000 \Omega m);$$

$$C' = 49,7 \text{ pF/m}$$

$$L' = 2,17 \mu H.$$

O cabo de aço aéreo foi simulado como uma linha de transmissão ideal, de 100 m de comprimento, com os seguintes parâmetros:

$$Z_0 = 500 \Omega;$$

$$T_{\text{Trânsito}} = 0,33 \mu s.$$

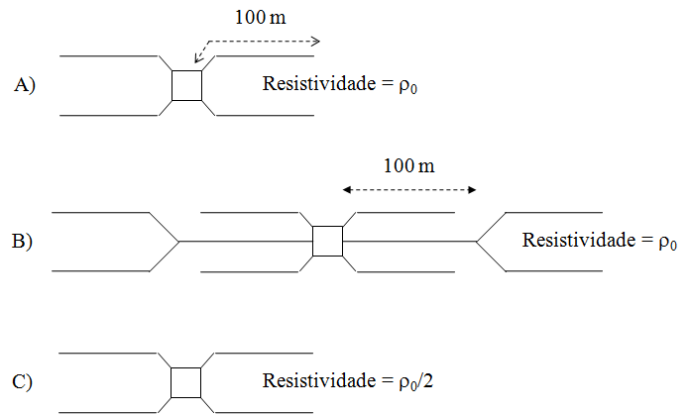


Figura 9 – Arranjos dos aterramentos de torre para simulação no PSPICE.

A Figura 10 mostra as formas de onda de corrente consideradas. Foram utilizadas ondas trapezoidais com tempos de frente iguais a 1 e a 3 μs .

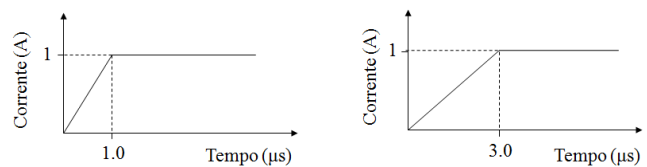


Figura 10 – Formas de onda das correntes utilizadas nas simulações.

As simulações foram realizadas utilizando-se o pacote computacional PSPICE. Os resultados obtidos para os casos de solos com resistividades iguais a 1000 e a 10000 Ωm e com as duas formas de onda de corrente são mostrados nas Figuras 11 a 14.

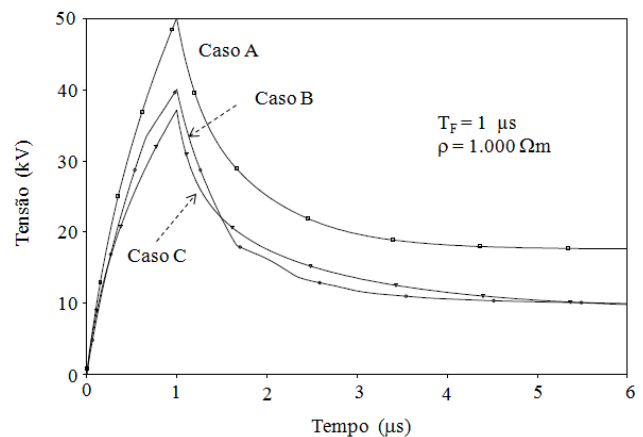


Figura 11 – Tensões desenvolvidas na malha de aterramento para onda de corrente com tempo de frente igual a 1 μs e solo com Resistividade igual a 1000 Ωm . Casos A, B e C.

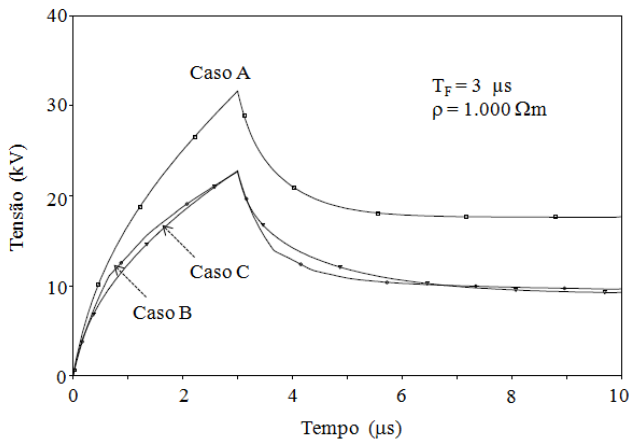


Figura 12 – Tensões desenvolvidas na malha de aterramento para onda de corrente com tempo de frente igual a $3 \mu s$ e solo com resistividade igual a $1000 \Omega m$. Casos A, B e C.

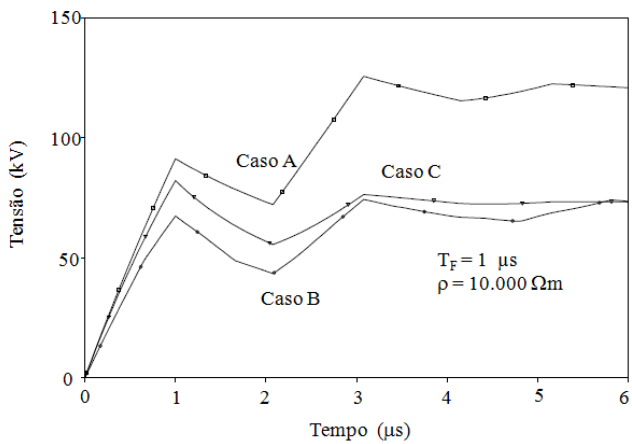


Figura 13 – Tensões desenvolvidas na malha de aterramento para onda de corrente com tempo de frente igual a $1 \mu s$ e solo com resistividade igual a $10.000 \Omega m$. Casos a, b e c.

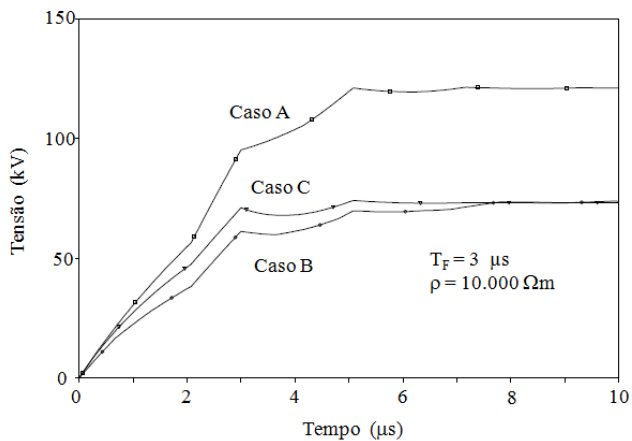


Figura 14 – Tensões desenvolvidas na malha de aterramento para onda de corrente com tempo de frente igual a $3 \mu s$ e solo com resistividade igual a $10.000 \Omega m$. Casos a, b e c.

Em todas as simulações feitas, as curvas mostram que as tensões desenvolvidas na malha B) apresentam um comportamento muito próximo àquelas desenvolvidas na malha C), sendo que em alguns casos os valores de tensão obtidos para o caso B) são menores do que aqueles encontrados para o caso C). Esta semelhança entre os resultados dos casos B) e C) indica que a malha B) pode ser tratada como se fosse a

malha C), ou seja, o seu valor de impedância é igual à metade do valor da impedância do caso A).

O arranjo de malhas mostrado na Figura 8 exige que uma cordoalha de aço seja ligada na estrutura da torre, de forma semelhante a um estai, promovendo a interligação da segunda malha de aterramento à torre. Em algumas situações este cabo poderia apresentar perigo para transeuntes e/ou circulação de máquinas sob a linha. Para contornar este tipo de problema, duas alternativas são apresentadas. Uma primeira mostrada nas Figuras 15 e 16 e uma segunda representada na Figura 17. Em ambas as alternativas, a utilização de postes de concreto permite a manutenção do cabo de aço em altura adequada, conforme normalização técnica específica aplicável, sem comprometer a circulação local.

Esta solução proposta de aterramento é inédita e deverá ser objeto de testes experimentais e de campo para avaliar a sua real aplicabilidade numa próxima etapa de continuidade deste projeto.

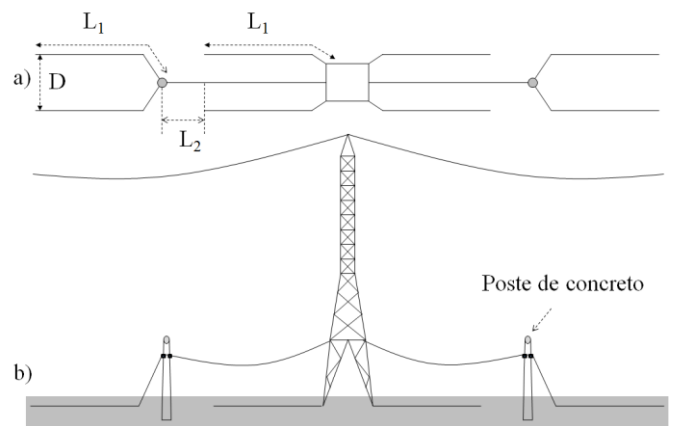


Figura 15 – Aterramento de torre com cabo contrapeso alternativo, utilizando postes de concreto na região central do vão, a) vista de topo, b) vista lateral.

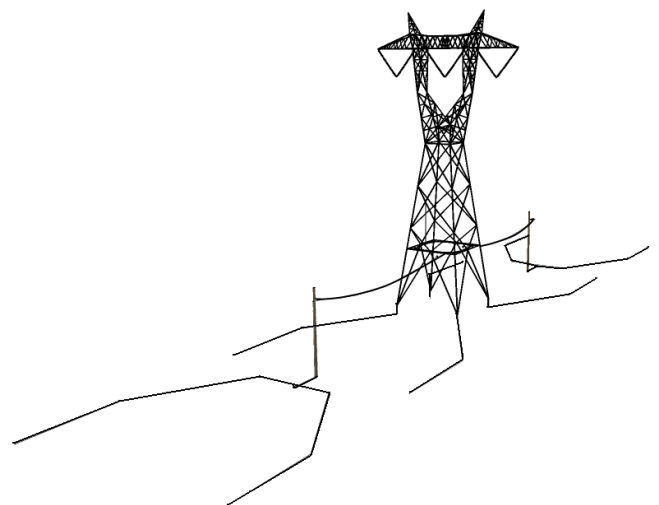


Figura 16 – Aterramento de torre com cabo contrapeso alternativo, vista espacial.

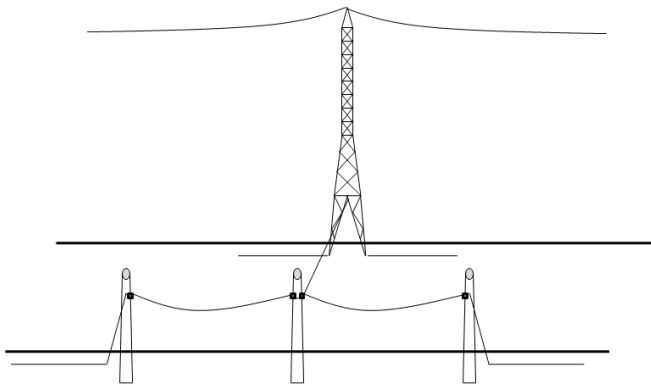


Figura 17 – Aterramento de torre com cabo contrapeso alternativo utilizando postes de concreto na borda da faixa de servidão.

VI. PROJETO DE MALHAS DE ATERRAMENTO DE BAIXA IMPEDÂNCIA

Como dito anteriormente, quando o valor do comprimento dos cabos da malha é inferior ao valor do comprimento efetivo, uma aproximação razoável pode ser obtida tomando-se o valor da impedância como sendo igual ao da resistência de aterramento.

A partir desta consideração, a resistência de aterramento para a malha mostrada na Figura 18, pode ser calculada pelas expressões (6), conjugadas com as expressões (2) e (3). De forma semelhante, para a geometria da malha mostrada na Figura 19, utilizam-se as expressões (7), conjugadas às expressões (2) e (3).

$$R = \frac{R_L + R_M}{8}; \quad (6)$$

$$R = \frac{R_L + 2 R_M}{12}. \quad (7)$$

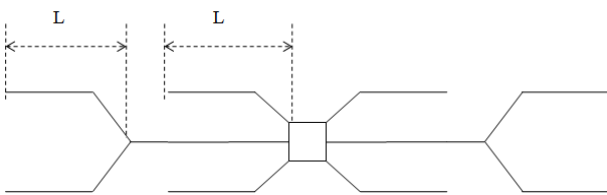


Figura 18 – Geometria da malha alternativa constituída de 04 cabos contrapesos.

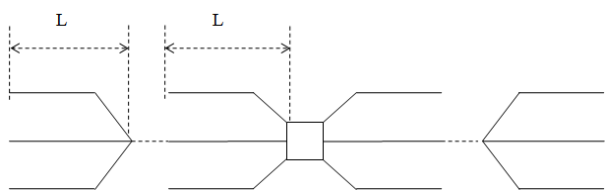


Figura 19 – Geometria da malha alternativa constituída de 06 cabos contrapesos.

De acordo com os resultados apresentados na referência [2], os valores de resistências (impedâncias) de aterramento de torres, que garantem um desempenho da linha similar àquele obtido quando a linha é protegida por pára-raios de linha instalados nas três fases e em todas as estruturas, devem ser inferiores a 13Ω .

Os arranjos de malhas que apresentam valores inferiores a este limite são apresentados a seguir. O cálculo das resistências é feito utilizando-se as expressões anteriormente apresentadas.

A Figura 20 mostra os valores dos comprimentos efetivos para um cabo contrapeso em função do valor da resistividade do solo para uma onda de corrente com tempo de frente igual a $3 \mu s$ [2].

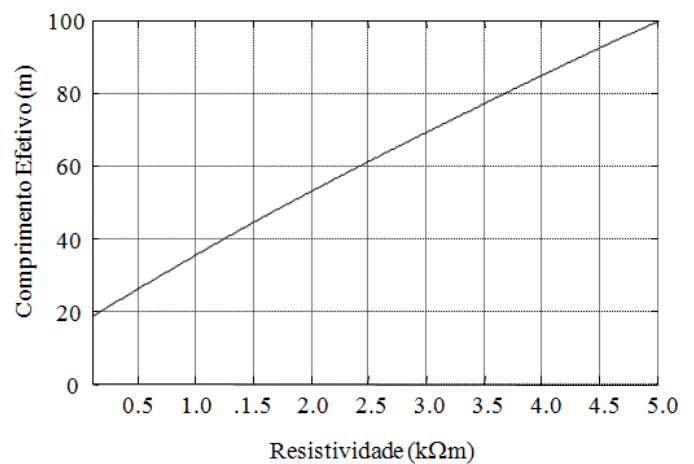


Figura 20 – Comprimento efetivo para um cabo contrapeso em função do valor da resistividade do solo para uma corrente com tempo de frente igual a $3 \mu s$ [3].

Para efeito de comparação, foram escolhidos cinco diferentes arranjos de malhas para estudo, considerando-se em três desses a presença do tratamento químico, conforme mostrado na Figura 21. Estes arranjos foram configurados da seguinte forma:

- 01 malha constituída de 04 cabos contrapesos de 30 m de comprimento;
- 01 malha constituída de 06 cabos contrapesos de 30 m comprimento imersos em bentonita;
- 02 malhas constituídas de 06 cabos contrapesos de 50 m comprimento;
- 02 malhas constituídas de 06 cabos contrapesos de 50 m comprimento imersos em bentonita;
- 02 malhas constituídas de 06 cabos contrapesos de 75 m comprimento imersos em bentonita.

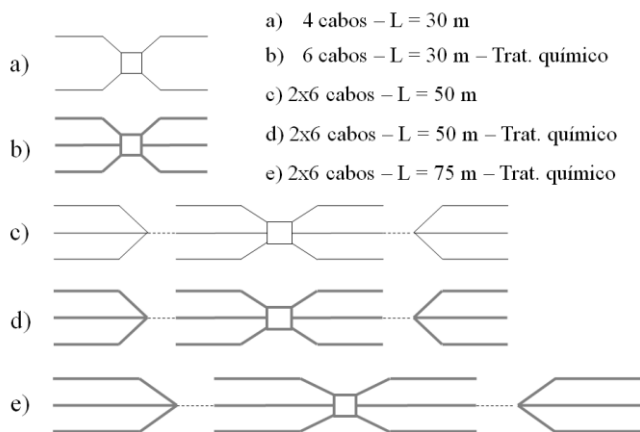


Figura 21 – Arranjos de malhas de aterramento estudados.

Os valores das resistências de aterramento obtidos para os arranjos escolhidos são mostrados na Figura 22.

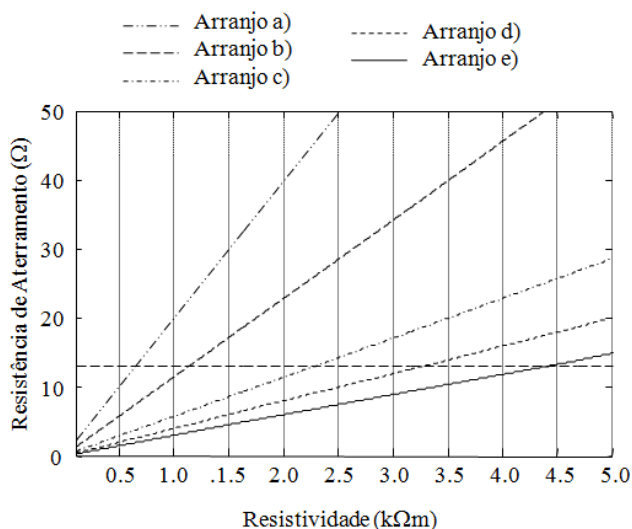


Figura 22 – Valores das resistências de aterramento dos arranjos mostrados na Figura 21.

Para os arranjos analisados, os resultados obtidos para os valores de resistências de aterramento são mostrados na Figura 22. Identificando-se nesta Figura os valores inferiores ao valor mínimo recomendado de 13 Ω e conjugando-os com os valores dos comprimentos dos cabos contrapesos inferiores ao valor do comprimento efetivo, apresentados na Figura 20, obtém-se as seguintes associações para valores de resistividade do solo, comprimento efetivo e resistividade:

- a) $R < 13 \Omega \Rightarrow L_{\text{efetivo}} = 29 \text{ m} \Rightarrow \rho \leq 670 \Omega \cdot \text{m}$;
- b) $R < 13 \Omega \Rightarrow L_{\text{efetivo}} = 37 \text{ m} \Rightarrow \rho \leq 1100 \Omega \cdot \text{m}$;
- c) $R < 13 \Omega \Rightarrow L_{\text{efetivo}} = 58 \text{ m} \Rightarrow \rho \leq 2300 \Omega \cdot \text{m}$;
- d) $R < 13 \Omega \Rightarrow L_{\text{efetivo}} = 74 \text{ m} \Rightarrow \rho \leq 3300 \Omega \cdot \text{m}$;
- e) $R < 13 \Omega \Rightarrow L_{\text{efetivo}} = 91 \text{ m} \Rightarrow \rho \leq 4400 \Omega \cdot \text{m}$.

Conjugando-se, então, os resultados obtidos com os valores da resistividade aparente do solo em Minas Gerais, mostrados na Figura 23,

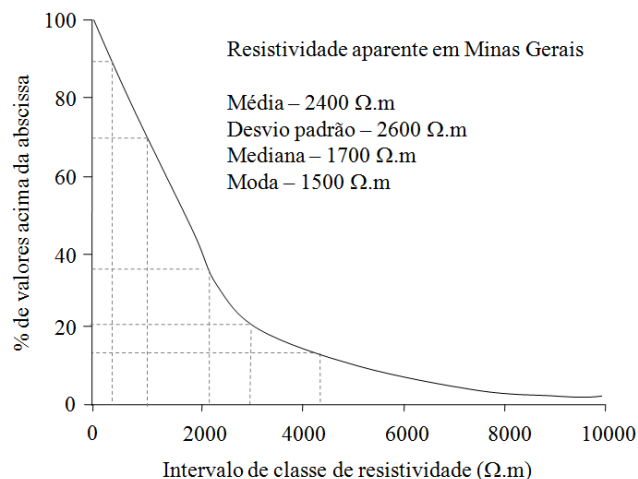


Figura 23 – Valores das resistividades aparentes do solo em Minas Gerais [7].

pode-se inferir que, para este Estado específico, a aplicabilidade dos arranjos analisados seria a seguinte:

- a) atende o critério de $R < 13 \Omega$ em cerca de 10% dos casos;
- b) atende o critério de $R < 13 \Omega$ em cerca de 30% dos casos;
- c) atende o critério de $R < 13 \Omega$ em cerca de 62% dos casos;
- d) atende o critério de $R < 13 \Omega$ em cerca de 80% dos casos;
- e) atende o critério de $R < 13 \Omega$ em cerca de 88% dos casos.

VII. ANÁLISE ECONÔMICA

O valor de 4400 Ωm para a resistividade aparente é o limite técnico para a utilização de malhas de aterramento constituídas de cabos contrapesos. Para torres instaladas em solos com valor de resistividade aparente superior a 4400 Ωm a solução é instalar pára-raios e aterrar a torre com malha de aterramento convencional.

Para valores de resistividade do solo inferiores a 4400 Ωm, o custo da malha de aterramento de baixo valor de impedância deve ser considerado e comparado com os investimentos necessários à instalação de equipamentos pára-raios e, sem perder de vista a compatibilidade, a alternativa de menor custo deve ser adotada. Em princípio, como será demonstrado a seguir, o custo da malha de aterramento de baixa impedância é inferior àqueles correspondentes à instalação de pára-raios, apresentando-se como uma alternativa concreta de menor investimento para a solução do problema.

Conforme mostrado na referência [8], o custo total de instalação de 03 pára-raios de 192 kV em uma linha de 230 kV é de R\$ 36.000,00 (trinta e seis mil reais), custo esse correspondente aos equipamentos e à mão obra necessária.

Para efeitos de comparação, o custo do do arranjo e) constituído de duas malhas de 12 cabos de 75 m de comprimento cada será estimado. A estimativa do custo da malha

de aterramento baseada nesse arranjo é feita com dados de custos obtidos na Internet.

Como numa linha convencional a torre sempre será aterrada, este aspecto será considerado no cálculo do custo e levará em conta um aterramento já existente, compreendendo uma malha constituída de 06 cabos de 75 m de comprimento cada. Por conseguinte, será orçada apenas a segunda malha, também constituída de 06 cabos de 75 m de comprimento, acrescido do custo dos postes de concreto e da cordoalha de aço para interligação das duas malhas conforme mostrado na Figura 14.

Para o cálculo do volume necessário de bentonita utilizou-se a geometria de vala mostrada na Figura 24.

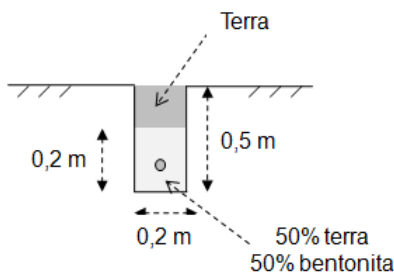


Figura 24 – Arranjo para tratamento químico com bentonita.

As estimativas de custos obtidas para uma das malhas do arranjo *e*) são mostrados na Tabela 1.

Tabela 1- Custos estimados para uma das malhas do arranjo *e*.

Insumo	Quantidade	Custo unitário (R\$)	Custo Total (R\$)
Poste de concreto duplo T – 150 kgf	02 unidades	250,00	500,00
Cabo de aço 3/8 EHS	150 m	1,00	150,00
Fio de aço-cobre (Coperweld) 21,15 mm ²	450 m	2,00	900,00
Bentonita	180 sacos de 50 kg	30,00	5.400,00
Abertura de vala	450 m	7,00	3.150,00
Total	---	---	10.100,00

Registra-se que mesmo quando computados os custos das duas malhas, o que corresponderia a 12 cabos para a proposta de arranjo *e*), o custo total do sistema de aterramento atingiria R\$ 20.200,00, ainda inferior aos R\$ 36.000,00 correspondente à instalação de equipamentos pára-raios. Cabe ainda observar que o arranjo *e*) é o mais elaborado e, portanto o de maior custo.

VIII. CONCLUSÕES

Atualmente, várias empresas adotam valores elevados para as resistências de aterramento de torres de linhas de 230 kV ($R=30 \Omega$). No presente trabalho foi proposto um valor bem mais baixo ($R=13 \Omega$), que irá melhorar significativamente o desempenho das linhas, tornando-o similar ao de

uma linha com todas as estruturas protegidas por pára-raios de linha em todas as fases.

Foram propostos projetos de malhas de aterramento com valores de resistências e impedâncias inferiores a 13Ω . Um estudo econômico que demonstra a viabilidade de utilização das malhas propostas com custos inferiores ao da adoção de pára-raios em todas as fases da linha de transmissão foi também discutido e apresentado.

As soluções propostas para malhas de aterramento de baixo valor de impedância são inéditas e atendem aos objetivos do projeto de pesquisa. Entretanto, estas soluções precisam ser avaliadas em campo e também em laboratório para que as conclusões do estudo teórico possam ser confirmadas e validadas. Estes estudos estão previstos para uma segunda etapa do projeto.

Durante o estudo realizado, algumas questões mereceram atenção devido à sua importância e também devido ao fato de não serem consenso na comunidade científica. Dentre essas questões, destacam-se a metodologia para calcular o comprimento efetivo dos cabos contrapesos e a relação entre os valores das impedâncias e resistências (Z/R) que merecem ser estudadas e pesquisadas em maior profundidade.

IX. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] T. C. Dias, I. J. S. Lopes, A. B. Lima, J. O. S. Paulino, E. N. Cardoso; Melhoria do desempenho de linhas de transmissão frente a descargas atmosféricas - Uma proposta de critério para aterramento de linhas de 230 kV. *Transmission & Distribution Latin America*, São Paulo, Novembro 2010.
- [2] Hayashi, T.; Mizuno, Y.; Naito, K.; "Study on Transmission-Line Arresters for Tower With High Footing Resistance"; *Trans. on Power Delivery*, Vol.23, Issue 4, pp.2456-2460, 2008.
- [3] Alexander Barros Lima, Método para cálculo da impedância de malhas de aterramento típicas de torres de linhas de transmissão. Dissertação de mestrado. Programa de pós-graduação em Engenharia Elétrica da UFMG, 16 de setembro de 2010.
- [4] A. B. Lima, J. O. S. Paulino, I. J. S. Lopes, T. C. Dias; Modelo para malhas de aterramento de torres de linhas de transmissão submetidas a descargas atmosféricas. *Transmission & Distribution Latin America*, São Paulo, Novembro 2010.
- [5] Paulo José Clebicar Nogueira. Influência da Estratificação do Solo na Impedância Impulsiva de Aterramentos de Linhas de Transmissão. 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais.
- [6] Youping Tu; Jinliang He; Rong Zeng; Lightning impulse performances of grounding devices covered with low-resistivity materials. *IEEE Transactions on Power Delivery*. Volume 21, Issue 3, July 2006, p.1706 – 1713. DOI 10.1109/TPWRD.2006.874110.
- [7] Resistividade média dos solos de Minas Gerais - 02.118-COPDEN-0346 – Arquivo Tecnológico da CEMIG, código 21233176, Fevereiro de 1994.
- [8] Júnio César C. Viana. Estudo de aplicação de pára-raios zno em linhas de transmissão em regiões de nível cerâmico e resistência de aterramento elevados. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Minas Gerais.