



XX Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica
SENDI 2012 - 22 a 26 de outubro
Rio de Janeiro - RJ - Brasil

Sandro de Castro Assis	Tarcisio Antonio Santos de Oliveira	Marcio Matias Afonso
CEMIG Distribuição S.A.	Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais	Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais
sandro.assis@cemig.com.br	tarcisio@des.cefetmg.br	marciomatias@des.cefetmg.br

Marco Aurelio de Oliveira Schroeder	Edino Barbosa Giudice Filho	Wesley Edney de Sousa
Universidade Federal de São João del-Rei	CEMIG Distribuição S.A.	CEMIG Distribuição S.A.
schroeder@ufsj.edu.br	edino@cemig.com.br	wes@cemig.com.br

DETERMINAÇÃO DE COMPRIMENTOS ÓTIMOS DE CABOS CONTRAPESOS NOS SISTEMAS DE ATERRAMENTOS DE LINHAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ALTA TENSÃO CONSIDERANDO PARÂMETROS TÍPICOS DE DESCARGAS

Palavras-chave

Comprimento efetivo
Linhas de Transmissão
Parâmetros típicos de descargas
Sistemas de aterramento

Resumo

Este artigo busca realizar uma análise dos sistemas de aterramentos típicos adotados em estruturas de linhas de distribuição de alta tensão e linhas de transmissão, determinando comprimentos ótimos de cabos contrapesos a serem instalados. Estima-se que cerca de 70% dos desligamentos não programados das linhas de transmissão são atribuídos a incidência de descargas. A obtenção de baixos valores de impedâncias de aterramentos se constitui em uma das principais formas de redução do número de desligamentos provocados por descargas atmosféricas em linhas de transmissão de energia acima de 69 kV. Devido às características do estado de Minas Gerais que possui elevado valor de resistividade do solo, bem como uma alta densidade de

descargas atmosféricas, a CEMIG DISTRIBUIÇÃO vem investindo ao longos dos anos em pesquisas, de forma a caracterizar o fenômeno e buscar redução de custos sem prejudicar o desempenho do sistema.

1. Introdução

As descargas atmosféricas são uma das principais causas de interrupções e desligamentos de linhas aéreas de distribuição com tensões nominais até 230 kV, gerando perdas de faturamento e multas para as empresas de energia, bem como prejudicando sua imagem junto aos consumidores. Em regiões de alta resistividade do solo e densidade de descargas atmosféricas, como Minas Gerais e Mato Grosso, a obtenção de índices de desligamentos aceitáveis passa a ser extremamente desafiador.

O crescente desenvolvimento tecnológico e o aumento da demanda de energia elétrica têm exigido maior nível de confiabilidade no fornecimento de energia elétrica, com menor número de interrupções de serviço. Grande parte dos desligamentos são provocados pelas sobretensões geradas pela incidência de descargas nos cabos para-raios ou torre da linha de distribuição e as reflexões obtidas no sistema de aterramento.

O tema aterramentos elétricos tem despertado ao longo do tempo o interesse de diversos pesquisadores. Muito provavelmente, tal interesse está relacionado à importância do aterramento para um bom desempenho do sistema aterrado e devido à questão de segurança de seres vivos. De forma geral, quanto menor o valor do sistema de aterramento, menor a sobretensão gerada sobre as cadeias de isoladores, resultando em menor probabilidade de interrupção do fornecimento de energia.

O comportamento do aterramento elétrico das torres de uma linha possui fundamental importância na determinação das tensões geradas no topo da torre que possam ocasionar o fenômeno de *backflashover* quando da ocorrência de uma descarga atmosférica na torre ou no cabo para-raios. A forma de onda da corrente da primeira descarga apresenta uma amplitude normalmente mais alta do que as descargas subsequentes, apesar de possuírem uma menor taxa de subida.

O presente trabalho busca apresentar parte dos resultados obtidos em projeto de pesquisa e desenvolvimento entre CEMIG DISTRIBUIÇÃO e CEFET-MG e UFSJ, abordando o comportamento do sistema de aterramento das linhas de distribuição de alta tensão frente a variação dos parâmetros do solo (condutividade e permissividade elétricas) com a frequência. Neste trabalho são apresentadas propostas de valores de comprimentos de rabichos de contrapesos a serem utilizados nos sistemas de aterramento de forma a não instalar quantidade material superior ao necessário para a obtenção de desempenho adequado das linhas de transmissão.

Nos últimos anos a Cemig considerava como referência para determinação dos comprimentos máximos a serem adotados nos cabos contrapesos os dados apresentados na Tabela 1 (VISACRO & SOARES & SCHROEDER & CHERCHILIA & CARVALHO, 1997, p. 4) (CEMIG, 2003, p. 5):

Tabela 1 - Valores de comprimento efetivo (m) adotado na Cemig.

Resistividade (ohms.m)	Comprimento por rabicho (m)
< 250	20
500	30
1000	40
2000	50
3000	60
4000	70
5000	80
>5000	90

Estes valores foram obtidos considerando uma onda de corrente com forma dupla exponencial 1,2/50 ms.

Os novos valores de comprimentos máximos de cabos contrapesos utilizados hoje em projetos de sistemas de aterramento foram obtidos considerando formas de ondas de correntes características de descargas observadas no Morro do Cachimbo, em Minas Gerais (SCHROEDER, 2001), (VISACRO & OUTROS 2004) e (VISACRO, 2005).

2. Desenvolvimento

O comportamento do sistema de aterramento das torres da linha é avaliado segundo uma modelagem bastante completa, baseada na solução direta das equações de Maxwell no domínio da frequência por meio da aplicação do Método dos Momentos, conforme descrito em (ALÍPIO, 2008), cujas bases físicas encontram-se em (VISACRO & SOARES, 2005).

Um importante conceito amplamente utilizado dentro da disciplina de projeto de aterramentos de linhas de distribuição de alta tensão e de transmissão é o comprimento efetivo, L_{ef} . Em geral, ele é definido como aquele comprimento do eletrodo a partir do qual um aumento de extensão não implica na redução da

impedância impulsiva de aterramento. A dispersão de corrente para trechos do condutor além do comprimento efetivo é desprezível; portanto, eletrodos de comprimento superior a este praticamente não contribuem para melhoria do desempenho ou redução da impedância impulsiva de aterramento.

A impedância impulsiva (Z_p) pode ser definida como sendo como a razão entre os picos de tensão e da corrente no ponto de injeção.

Foram realizadas diversas simulações buscando determinar os valores de comprimento efetivo utilizando a modelagem apresentada por (ALÍPIO, 2008). Foram consideradas formas de onda de correntes por meio das funções de Heidler, ajustadas para valores medianos das primeiras descargas de retorno e das descargas subsequentes medidas na estação do Morro do Cachimbo, em Minas Gerais (CONTI & VISACRO, 2007).

Foi considerado eletrodos horizontais de comprimentos variáveis de 5m a 90m, enterrados a 0,5 m de profundidade.

Estes comprimentos efetivos foram determinados para diferentes resistividades de solo obtidos no estado sob concessão da CEMIG D. As resistividades aqui apresentadas são 100, 500, 1000, 2400 e 5000 ohms.m. Nestes casos foi assumido a permissividade relativa como sendo igual a 15 e parâmetros constantes na frequência.

A Figura 1 apresenta os resultados de valor da impedância de impulsiva obtidos em função do comprimento do eletrodo para os solos analisados, considerando as ondas de primeira descarga de retorno e subsequente. Adicionalmente, para cada resistividade analisada, é apresentado o valor da resistência de aterramento em função do comprimento do eletrodo.

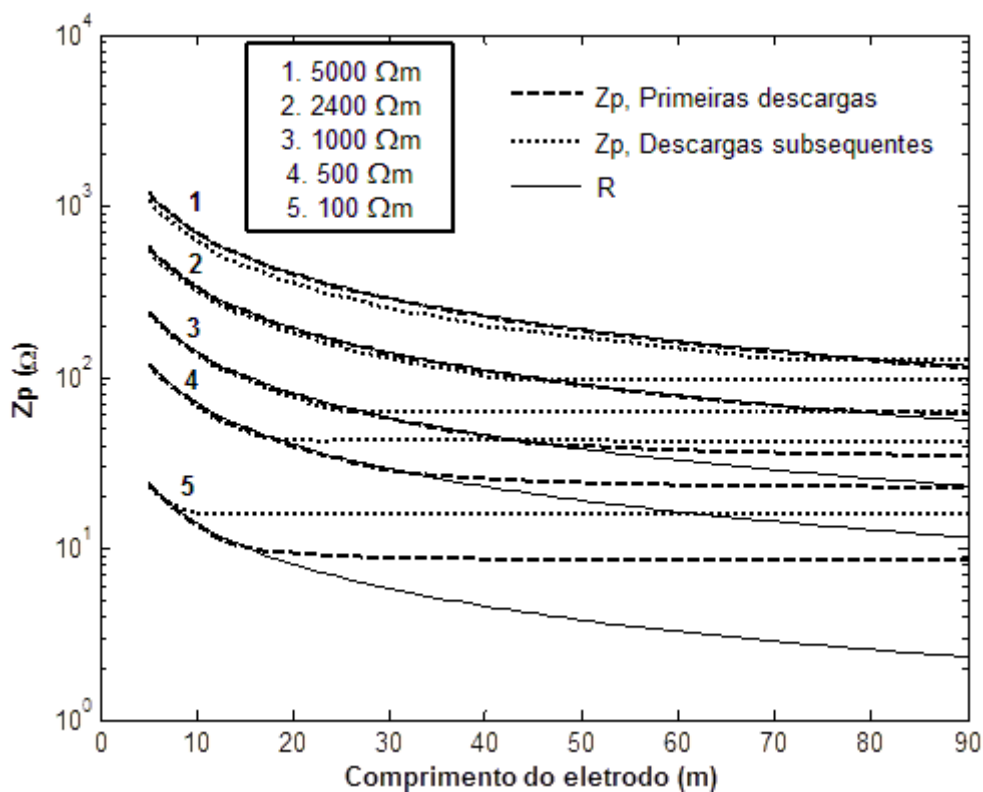


Figura 1 – Impedância impulsiva e resistência de aterramento de eletrodos horizontais de aterramento em função do comprimento para resistividades de 100, 500, 1000, 2400 e 5000 ohms.m.

Em relação aos valores apresentados na Figura 1, além do valor técnico natural de curvas deste tipo,

possuem o destaque de apresentarem dados relativos a condições bastante representativas das descargas atmosféricas que solicitam as linhas de transmissão do estado de Minas Gerais. Adicionalmente, tais curvas podem ser tomadas como uma referência mais confiável para avaliações de desempenho de linhas de transmissão frente a descargas atmosféricas em países situados em regiões tropicais, em contrapartida da adoção de curvas, parâmetros e dados associados às medições de Berger no Monte de San Salvatore na Suíça e (BERGER & ANDERSON & KRÖNINGER, 1975) e (ANDERSON & ERIKSSON, 1980).

Conforme apresentado na Figura 1, a resistência de aterramento apresenta valores elevados para solos mais resistivos e diminui com o aumento do comprimento do eletrodo. As curvas de impedância impulsiva possuem tendência similar e indicam valores altos de Z_p para solos de baixa condutividade (alta resistividade) e reduções de tais valores para acréscimos no comprimento. Todavia, a partir de determinada extensão de eletrodo, Z_p permanece constante, enquanto R continua a decrescer. Assim, o aumento das dimensões do aterramento somente é efetivo na redução da impedância impulsiva até determinado comprimento, definindo o conceito de comprimento efetivo do aterramento para a frequência de interesse, L_{ef} .

Em um contexto de engenharia aplicada, os autores entendem como mais interessante a definição de um critério para determinação de L_{ef} que siga a seguinte orientação: “O comprimento efetivo é definido como aquele a partir do qual são observadas reduções inferiores a x % no valor da impedância impulsiva de aterramento, para acréscimos de y m de condutor”. Os valores de x e y podem ser escolhidos de forma a tornar o critério mais ou menos conservativo. Após a realização de uma série de simulações e dada a experiência acumulada dos autores no tema, adotou-se um critério em que $x = 0,75\%$ e $y = 1$ m, ou seja: “O comprimento efetivo é definido como aquele a partir do qual são observadas reduções inferiores a $0,75\%$ no valor da impedância impulsiva de aterramento, para acréscimos de 1 m de condutor”.

Tendo em vista o descrito anteriormente e a Figura 1 são apresentados na Tabela 2 os valores de comprimento efetivo para os valores de resistividade considerados, para as primeiras descargas e descargas subsequentes, obtidos de acordo com o critério proposto nomeado como critério dos $0,75\%$.

Vale destacar que os resultados compilados na Tabela 2 desprezam a variação dos parâmetros elétricos do solo com a frequência, mas, ainda assim, são uma boa referência para fins de projeto de aterramentos de linhas de transmissão. Por fim, ainda de acordo com a Tabela 2, pode-se inferir que o L_{ef} aumenta com a resistividade do solo e com o tempo de frente da onda injetada. Tal comportamento está associado aos efeitos de propagação, tendo em vista que a atenuação se acentua com crescimento da condutividade do meio e com a frequência representativa da onda de corrente injetada.

Tendo em conta os dados da Tabela 2 é importante proceder ao seguinte questionamento:

Qual valor de comprimento adotar como valor efetivo no projeto de cabos contrapeso? Aquele referente à primeira descarga ou aquele referente às descargas subsequentes?

A resposta a essa pergunta não é trivial e a definição do comprimento (e do critério para sua definição) deve levar em conta a avaliação de outros parâmetros além do próprio comprimento efetivo.

Em uma análise simplificada, pode-se afirmar que a escolha do comprimento efetivo associado às descargas subsequentes resulta em um critério mais atraente do ponto de vista econômico de instalação de eletrodos (instalam-se menores comprimentos de cabos). Por outro lado, as primeiras descargas correspondem às solicitações mais severas, sendo estas as principais responsáveis pelos desligamentos das linhas, resultando perda de faturamento. Então, do ponto de vista de rigor técnico, a escolha do comprimento efetivo deve seguir os valores obtidos para as primeiras descargas.

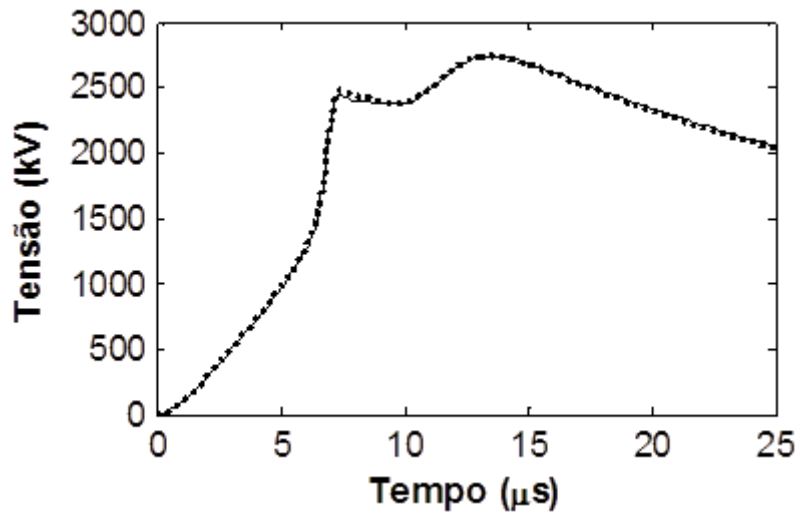
Tabela 2 - Valores de comprimento efetivo (m): Critério dos 0,75%.

Resistividade (ohms.m)	Lef (m)	
	Primeira descarga	Descargas subsequentes
100	25	12
500	39	21
1000	47	26
2400	75	44
5000	>90	71

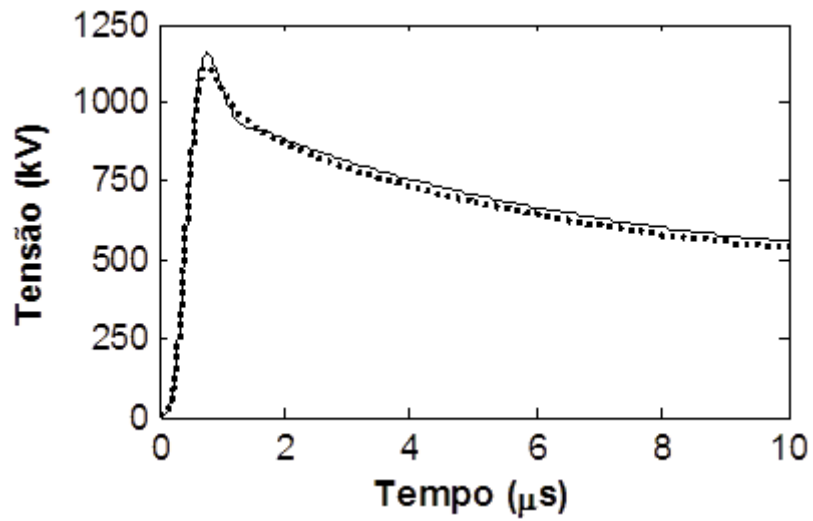
Nas Figuras 2, 3 e 4 são apresentadas as sobretensões no topo da torre (V_T) considerando a injeção de ondas representativas das primeiras descargas e descargas subsequentes quando da ocorrência de uma descarga atmosférica na LT (linha de transmissão). Nesta análise simplificada de incidência de uma descarga atmosférica no topo da torre de um dado sistema de transmissão, os cabos para-raios foram modelados por meio de linhas monofásicas sem perdas com impedância de surto de 500 ohms com casamento de impedância nas extremidades. A torre de transmissão de 30 m é também modelada por uma linha monofásica sem perdas, de impedância de surto 230 ohms. Por simplicidade, na análise que se segue os cabos fase são desconsiderados. O aterramento é composto por um eletrodo horizontal de comprimento 20 m, 40 m e 60 m. O solo apresenta resistividade representativa de 1000 ohms.m e permissividade relativa igual a 15.

O sistema de aterramento é modelado de duas formas:

- possuindo variação dos parâmetros do solo na frequência (curvas contínuas);
- através de uma resistência concentrada com valor igual a impedância impulsiva de aterramento (curvas pontilhadas).



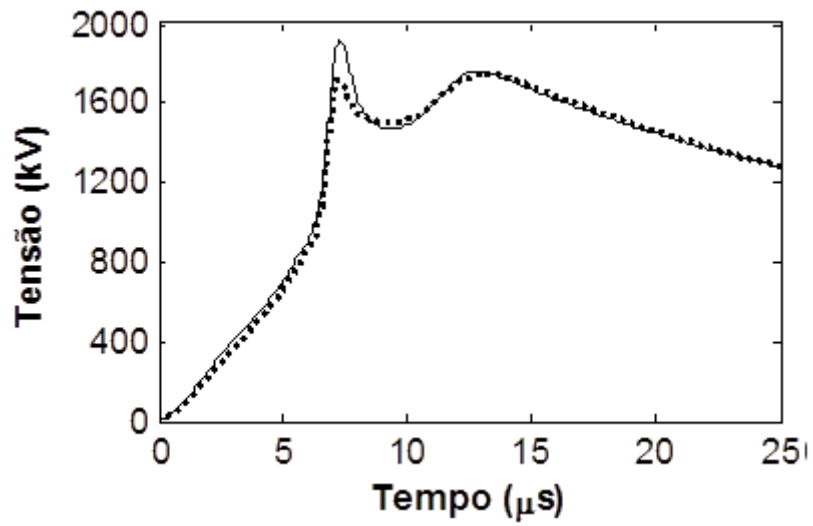
(a)



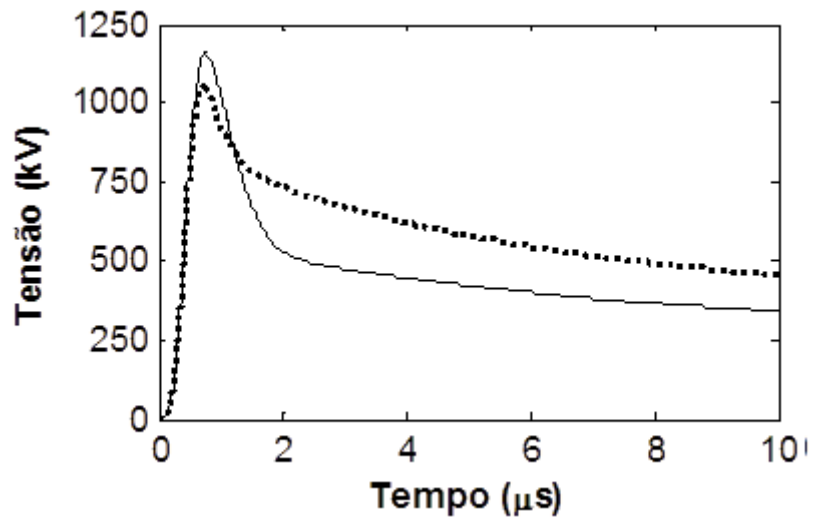
(b)

Figura 2 – Sobretensões no topo da torre. Eletrodo de 20m. Solo de 1000 ohms.m.

(a) Primeira descarga (b) Descarga subsequente.



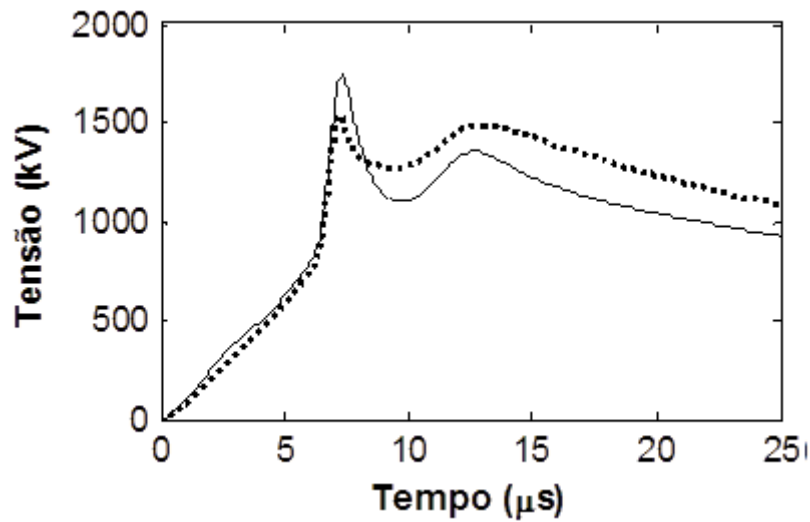
(a)



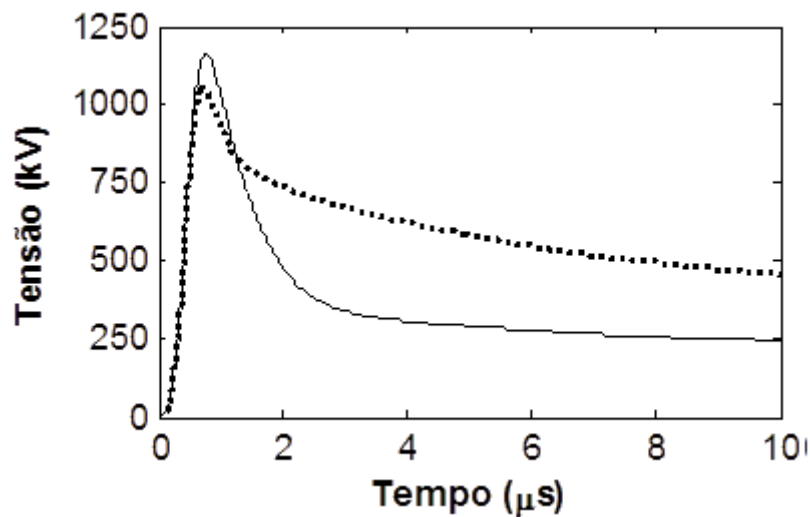
(b)

Figura 3 – Sobretensões no topo da torre. Eletrodo de 40m. Solo de 1000 ohms.m.

(a) Primeira descarga (b) Descarga subsequente.



(a)



(b)

Figura 4 – Sobretensões no topo da torre. Eletrodo de 60m. Solo de 1000 ohms.m.

(a) Primeira descarga (b) Descarga subsequente.

De uma forma geral, a máxima sobretensão resultante no topo da torre apresenta diferenças dependendo do modelo adotado para o aterramento. Essas diferenças são mais ou menos significativas tendo em conta o comprimento do eletrodo e a onda de corrente injetada, sendo esse aspecto mais bem explorado no comentário a seguir.

De acordo com os resultados, tendo como referência a variação do sistema de aterramento com a frequência, o modelo de resistência (igual a Z_p) gera resultados razoavelmente bons para a tensão no topo da torre, em termos de valores numéricos e forma de onda, para eletrodos de comprimento até o efetivo, referente a onda de corrente injetada. Isso pode ser verificado nos resultados para o eletrodo de 20 m e injeção de onda

representativa das primeiras descargas (Figura 2a) e das descargas subsequentes (Figura 2b) e nos resultados para o eletrodo de 40 m e injeção de onda representativa das primeiras descargas (Figura 3a). Para comprimentos de eletrodo além do efetivo são observadas diferenças importantes, em termos numéricos e na forma de onda resultante, entre os resultados obtidos para modelos do tipo resistência simples e variáveis na frequência. Isso pode ser verificado nos resultados para o eletrodo de 40 m e injeção de onda representativa das descargas subsequentes (Figura 3b) e para o eletrodo de 60 m e injeção de ondas representativas das primeiras descargas e das descargas subsequentes (Figura 4). Tendo em conta as análises anteriores pode-se inferir, que, para aterramentos cuja extensão não ultrapassa o comprimento efetivo, o modelo de resistência concentrada com valor igual a Z_p fornece bons resultados para a tensão no topo da torre. Para comprimentos além do efetivo, porém, o modelo simples de resistência não é capaz de representar adequadamente os efeitos reativos e de propagação nos eletrodos de aterramento, o que resulta em ondas de tensão com amplitudes e defasamentos incorretos.

3. Conclusões

Conforme apresentado, um correto dimensionamento do sistema de aterramento de linhas de transmissão buscando um desempenho frente a descargas atmosféricas adequado, garantindo a disponibilidade da linha, passa pelo respeito ao comprimento efetivo dos rabichos de aterramento. O aumento do comprimento dos cabos contrapeso reduz o valor de impedância de aterramento e contribui para minimização das sobretensões na torre devido à incidência de descargas. A redução da impedância de aterramento se dá para aumentos do cabo até um comprimento definido como comprimento efetivo, a partir do qual não são observadas reduções adicionais significativas (critério dos 0,75%).

O respeito aos comprimentos efetivos se torna uma solução econômica, visto que a instalação de cabos acima destes comprimentos não gera efetiva redução da impedância de aterramento, bem como sobretensões no topo da torre.

O critério de projeto de aterramentos de linhas de transmissão da CEMIG DISTRIBUIÇÃO foram adequados para respeitar os comprimentos efetivos apresentados na Tabela 2, obtidos com os parâmetros medianos de descargas atmosféricas medidas na Estação do Morro do Cachimbo relativos aos parâmetros típicos da primeira descarga, uma vez que constatou-se que, a despeito do maior tempo de frente em relação às descargas subsequentes, as primeiras descargas correspondem às solicitações mais severas em linhas de transmissão (considerando uma incidência direta). Isso se deve ao valor de pico das primeiras descargas, que é cerca de três vezes superior aquele associado às descargas subsequentes.

Desde que respeitados os comprimentos efetivos, a simulação dos sistemas de aterramento como sendo uma resistência com valor igual à impedância impulsiva, os valores de sobretensão no topo da torre apresentam bons resultados, quando comparados aos aterramentos variando na frequência.

Agradecimentos

Os autores agradecem à CEMIG-D, ao CEFET-MG e à UFSJ pelo suporte financeiro (CEMIG-D) e em termos de estrutura (CEFET-MG e UFSJ). Adicionalmente, agradecem ao Eng. Rafael Silva Alípio pelas importantes e essenciais discussões técnicas realizadas ao longo do processo de elaboração deste artigo.

4. Referências bibliográficas

VISACRO, Silvério & SOARES, A. & SCHROEDER, Marco A. O. & CHERCHILIA, L. C. L. & CARVALHO, A. M. Investigação sobre o aterramento de torres do sistema de transmissão da Cemig para melhoria de desempenho de linhas frente a descargas atmosféricas. SIPDA, 1997.

ER/LT-3368a - Instrução para aterramento de estruturas de linhas de transmissão de 69 a 500 kV, Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG), 2003.

VISACRO, Silvério & SOARES, A. HEM: A Model for Simulation of Lightning-Related Engineering Problems. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 20, nº2, pp. 1206-1207, 2005.

SCHROEDER, Marco A. O. Modelo eletromagnético para descontaminação de ondas decorrente de descargas atmosféricas: aplicação às medições da estação do Morro do Cachimbo, Tese de doutorado, Centro de Pesquisa e Desenvolvimento em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais (CPDEE/UFMG), março de 2001.

VISACRO, Silvério & SOARES, A. & SCHROEDER, Marco A. O. & CHERCHILIA, L. C. L. & SOUSA, V. J. Statistical Analysis of Lightning Current Parameters: Measurements at Morro do Cachimbo Station. Journal on geophysical research, Vol. 109, D01105, pp. 1-11, 2004.

VISACRO, Silvério. Descargas atmosféricas: uma abordagem de engenharia. Artliber, São Paulo, 2005.

CONTI, A. & VISACRO, Silvério. Analytical representation of single- and double-peaked lightning current waveforms. IEEE Trans. Electromagnetic Compatibility, vol. 49, no. 2, pp. 448–451, May 2007.

ALÍPIO, Rafael S. Modelagem eletromagnética de aterramentos elétricos nos domínios do tempo e da frequência, Dissertação de mestrado, Programa de Pós-Graduação em Modelagem Matemática e Computacional do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (PPMMC/CEFET-MG), dezembro de 2008.

BERGER, K. & ANDERSON, R. B. & KRÖNINGER, H., “Parameters of lightning flashes,” *Electra*, nº 41, pp. 23-37, Jul., 1975.

ANDERSON, R. B. & A. J. ERIKSSON, “Lightning parameters for engineering application,” *Electra*, nº 69, pp. 65-101, Mar., 1980.