

Avaliação e Dimensionamento de Sistemas de Aterramento para Redução de Desligamentos de uma Linha de Transmissão de 138 kV por *Backflashover*

Felipe Mendes de Vasconcellos, Fernando Augusto Moreira
Departamento de Engenharia Elétrica, Escola Politécnica, UFBA, Salvador, BA, Brasil
felipe.vasconcellos@ufba.br, moreiraf@ufba.br

Resumo — As descargas atmosféricas incidentes em linhas de transmissão são uma das principais causas dos desligamentos repentinos no sistema de transmissão de energia. Quando uma descarga atmosférica atinge o cabo para-raios ou diretamente a torre, pode ocorrer um *backflashover*. Esse fenômeno consiste em um arco elétrico entre a cadeia de isoladores e os condutores de fase da linha. Este trabalho apresenta diversas simulações desenvolvidas com a utilização do *software* ATP para avaliação da suportabilidade da cadeia de isoladores em uma linha de 138kV quando atingida por uma descarga atmosférica direta na torre. A partir dos resultados das sobretensões envolvidas é feita a avaliação da eficiência e o dimensionamento de diversos arranjos do sistema de aterramento para assim reduzir as ocorrências de interrupção do fornecimento de energia elétrica por *backflashover*.

Palavras-chaves — Descargas Atmosféricas, Desligamentos, Sistemas de Aterramento, *Backflashover*, ATP, Desempenho de Linhas de Transmissão, Sobretensões.

I. INTRODUÇÃO

As descargas atmosféricas são uma das principais fontes de perturbações causadas em linhas de transmissão no Brasil, gerando sobretensões nas linhas de transmissão que podem levá-las ao seu desligamento. As faltas causadas por descargas atmosféricas causam sérios danos em componentes das linhas, a exemplo das cadeias de isoladores, além de problemas de estabilidade e *blackouts*[1].

As descargas atmosféricas quando atingem diretamente uma fase da linha produzem uma sobretensão ao longo desta, com possibilidade de disrupção ao longo da cadeia de isoladores. Os cabos de blindagem desempenham a função de proteção contra desligamentos de linha devido ao fenômeno de *flashover*, ao evitar a ocorrência da descarga atmosférica diretamente sobre os cabos fase. [1]. Os cabos de blindagem são conectados à terra a partir de estruturas aterradas que são, geralmente, as torres de transmissão. Quando a descarga atmosférica atinge o cabo-guarda ou a torre, a intensidade do campo elétrico em torno da estrutura da torre se eleva significativamente. A partir de um dado instante, o campo elétrico em torno da estrutura pode atingir um valor crítico, causando o rompimento da rigidez dielétrica do ar, gerando um arco elétrico entre o cabo-guarda e a fase ou entre a torre e a

fase, denominado de *backflashover*. Os *backflashovers* exercem importante influência no desempenho de um sistema de transmissão, pois se estima que entre 40% a 70% dos desligamentos de linhas de transmissão são provocadas por tal fenômeno [2]. Para reduzir a ocorrência de *backflashovers*, é necessário dimensionar corretamente a estrutura da torre, prever a instalação de cabos-guarda e garantir a eficiência do sistema de aterramento da linha de transmissão. As sobretensões dependem basicamente da impedância de surto da torre, da impedância dos sistemas de aterramento e da descarga incidente [3]-[5].

Dada a importância do fornecimento ininterrupto de energia e ao grande valor financeiro associado à queima dos equipamentos presentes no sistema elétrico, é imprescindível investir no desenvolvimento de um estudo detalhado do impacto de descargas atmosféricas em sistemas de energia elétrica, buscando uma perfeita adequação dos níveis básicos de isolamentos dos equipamentos. Normalmente, um estudo dessa magnitude envolve intensos cálculos matemáticos e tem sido realizado com auxílio de programas computacionais que trabalham no domínio do tempo, como o ATP (Alternative Transients Program). Assim, neste trabalho serão avaliados os efeitos da variação das características da corrente de descarga e da resistividade do solo no dimensionamento dos sistemas de aterramento das torres de uma linha de 138 kV com o objetivo de manter os níveis de sobretensão nas cadeias de isoladores da torre dentro do valor mínimo do Nível Básico de Isolamento (NBI), que é de 650 kV para essa classe de tensão, e evitar assim a disrupção sobre a cadeia de isoladores.

II. MODELAGEM DOS ELEMENTOS

A análise do desempenho dos sistemas elétricos frente às descargas atmosféricas se inicia pela modelagem adequada de cada elemento (torre de transmissão, linha de transmissão, sistema de aterramento, corrente da descarga atmosférica) considerando os aspectos transitórios inerentes ao fenômeno. Assim, nesta seção será feita uma apresentação sobre os modelos dos elementos citados anteriormente e que foram utilizados nas simulações computacionais objeto deste trabalho.

A. Corrente da Descarga Atmosférica

A descarga atmosférica foi representada utilizando-se uma fonte de corrente conforme modelo proposto por Heidler[6], disponível no ATPDraw e definida por:

$$i_0(t) = \frac{I_0}{\eta} \cdot \frac{\left(\frac{t}{\tau_1}\right)^{\frac{1}{n}}}{1 + \left(\frac{t}{\tau_1}\right)^{\frac{1}{n}}} \cdot e^{-\frac{t}{\tau_2}} \quad (1)$$

onde:

$$\eta = \exp \left[-\left(\frac{\tau_1}{\tau_2}\right) \cdot \left(n \cdot \frac{\tau_2}{\tau_1}\right)^{\frac{1}{n}} \right] \quad (2)$$

e:

I_0 = É a amplitude da corrente de descarga atmosférica (kA);

τ_1 = Constante de tempo de frente de onda (μ s);

τ_2 = Constante de tempo de decaimento da onda (μ s);

η = Fator de correção da amplitude;

n = Fator de inclinação da corrente.

Para ilustrar o comportamento da função de Heidler, exposta anteriormente, é apresentado um exemplo a partir da Fig. 1, cujos valores utilizados foram $I_0 = 45,2$ kA; $\tau_1 = 5,6$ μ s; $\tau_2 = 53,5$ μ s; $\eta = 1$ e $n = 5$. O fator n é estrategicamente escolhido para que, em função de $\tau_2/\tau_1 \gg 1$, garanta-se o valor de $\eta \approx 1$ [6]. Esses mesmos valores dos parâmetros n e η , foram utilizados em todas as simulações deste trabalho.

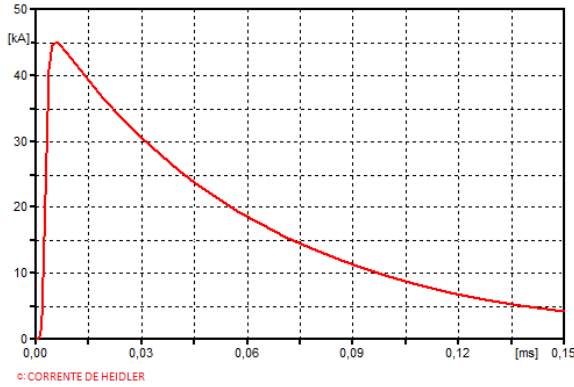


Fig. 1. Comportamento de um exemplo utilizando a função de Heidler.

B. Torres de Transmissão

A torre foi modelada por linhas sem perdas. Nesse modelo a torre de transmissão é composta por linhas curtas sem perdas que representam a impedância de cada trecho da torre. Por sua vez esses valores são calculados em função das dimensões e configurações das torres. O modelo está representado na Fig. 2 [7].

C. Linha de Transmissão

Os vãos da linha de transmissão foram modelados pelo modelo de linha de transmissão Bergeron do ATP, considerando-se parâmetros distribuídos a frequência constante, linha não transposta e efeito pelicular. O acoplamento entre todos os cabos modelados é inerente ao modelo. Para o cálculo dos parâmetros são utilizados os dados físicos de cada um dos cabos, tais como: posição física relativa, diâmetro e resistência ôhmica.

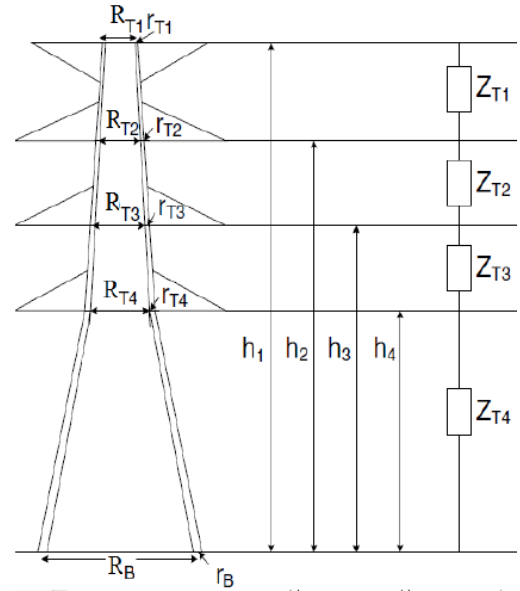


Fig. 2. Modelo da torre de transmissão por linhas sem perdas.

D. Sistema de Aterramento

O sistema de aterramento das torres de transmissão é composto por todos os elementos metálicos que compõem a torre e que mantêm contato com o solo ou com as fundações, inclusive vergalhões, grelhas, parafusos, etc. e qualquer dispositivo de aterramento, tais como: hastes de aterramento, anéis horizontais, contrapesos, ou ainda qualquer combinação destes que estejam enterrados no solo. A resistividade do solo é uma das principais responsáveis pelo desempenho do sistema de aterramento de uma linha de transmissão, sendo este influenciado pelos seguintes fatores: tipo de solo, teor de umidade, temperatura, composição química, concentração dos sais da água retida, estratificação e compactação do solo [8].

As torres de uma linha de transmissão devem ser aterradas de maneira a tornar a impedância de aterramento compatível com o desempenho desejado e a segurança de terceiros.

i. Cabo de Aterramento ou Contrapeso

O modelo elétrico do condutor contrapeso será o modelo π , cujos valores dos parâmetros são obtidos por meio das formulações de Sunde [9]:

$$R = \frac{l}{\pi \cdot r^2} \cdot \rho_c \quad (3)$$

$$G^{-1} = \frac{\rho}{2\pi \cdot l} \cdot \left[\ln \frac{4l}{\alpha} - 1 \right] \quad (4)$$

$$C = 2\pi \cdot \epsilon \cdot \left[\ln \frac{4l}{\alpha} - 1 \right] \quad (5)$$

$$L = \frac{\mu \cdot l}{\alpha} \cdot \left[\ln \frac{2l}{\alpha} - 1 \right] \quad (6)$$

Em que:

R - É a resistência do condutor contrapeso (Ω);

G - É a condutância do condutor contrapeso (Ω^{-1});

C - É a capacitância do condutor contrapeso (F);

L - É a indutância do condutor contrapeso (H);

ρ_c - É a resistividade do condutor contrapeso ($\Omega \cdot m$);

ρ - É a resistividade do solo ($\Omega \cdot m$);

l - É o comprimento do condutor contrapeso (m);

r - É o raio do condutor contrapeso (m);
 α - É $\sqrt{2 \cdot r \cdot h}$ (m);
 h - É a profundidade em que ficará enterrado o condutor contrapeso (m);
 μ - É a permeabilidade magnética do solo (considerada igual à do ar) (H/m);
 ε - É a permissividade dielétrica do solo (F/m).

Cada célula de circuito π utilizado representa uma seção do cabo contrapeso, conforme ilustrado na Fig. 3. A representação generalizada do condutor contrapeso utilizada nas simulações é modelada por n células idênticas, correspondentes cada uma a um metro do referido condutor, como visto na Fig. 4 [10].

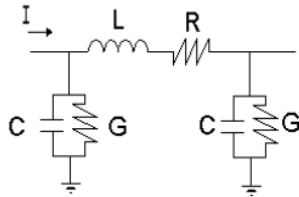


Fig. 3. Modelo de uma célula do cabo contrapeso [10].

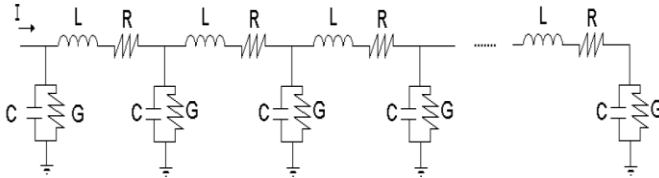


Fig. 4. Representação generalizada do condutor contrapeso [10].

i. Haste de Aterramento

O modelo elétrico da haste de aterramento é o proposto por Sunde [9], conforme a Fig. 5, cujos valores dos parâmetros são obtidos por meio das seguintes equações:

$$R = \frac{\rho}{2\pi \cdot l} \left[\ln \frac{4l}{r} - 1 \right] \quad (7)$$

$$C = 2\pi \cdot \varepsilon \cdot l \left[\ln \frac{4l}{r} - 1 \right]^{-1} \quad (8)$$

$$L = \frac{\mu \cdot l}{2\pi} \left[\ln \frac{2l}{r} - 1 \right] \quad (9)$$

Em que:

R - É a resistência de aterramento da haste (Ω);
 C - É a capacitância da haste (F);
 L - É a indutância da haste (H);
 l - É o comprimento da haste (m);
 r - É raio da haste (m);
 μ - É a permeabilidade magnética do solo (considerada igual à do ar) (H/m);
 ε - É a permissividade elétrica do solo (F/m);
 ρ - É a resistividade do solo ($\Omega \cdot m$);

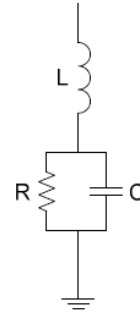


Fig. 5. Modelo da haste de aterramento [11].

III. METODOLOGIA E PARÂMETROS UTILIZADOS

Nas simulações a corrente de descarga incidirá diretamente no topo da torre central, considerando duas torres adjacentes, conforme Fig. 6 [12] e com dois “tipos” de corrente de descargas, resultado de medições na estação de Morro do Cachimbo-MG, conforme a Tabela I [13]. As classificações adotadas como mediana e crítica se relacionam com a característica probabilística das medições, na qual “mediana” se refere às medições em que os valores dos parâmetros associados às correntes de descarga são excedidos em 50% dos casos medidos e “crítica” às medições em que apenas 5% dos parâmetros excedem esse conjunto de valores.

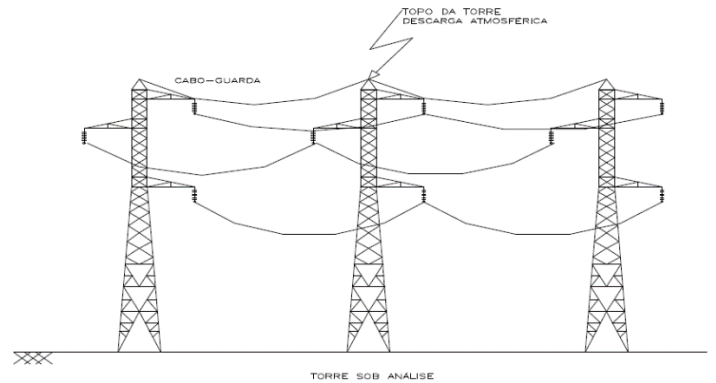


Fig. 6. Ilustração do ponto de incidência da corrente de descarga [12].

TABELA I. PARÂMETROS DA CORRENTE DE DESCARGA

Corrente de descarga (tipo)	I_p (kA)	τ_1 (μs)	τ_2 (μs)
Mediana	45,3	5,6	53,5
Crítica	85,2	9,9	145,2

A Fig. 7 apresenta a configuração da torre de transmissão que será adotada nas análises, além dos valores da impedância de surto Z_t por trecho e da velocidade de propagação da onda de surto implementados nas simulações.

Foi considerada uma linha de transmissão com uma das suas extremidades conectada a uma fonte de tensão de 138 kV entre fases e implementada com comprimento de 20 km nas torres das extremidades para simular uma linha de transmissão infinita (neste caso, as reflexões não retornam antes do fim do tempo total de estudo, não afetando os resultados porque só há interesse nas sobretensões máximas).

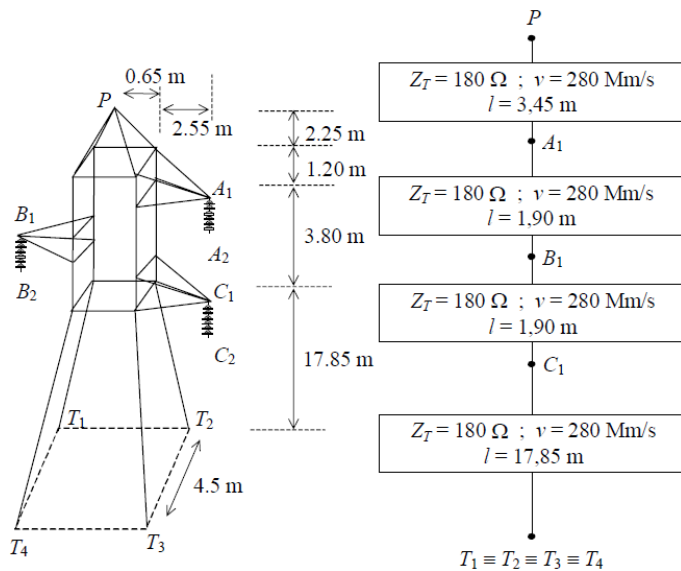


Fig. 7. Configuração da torre da linha de transmissão de 138kV, e circuito equivalente da torre [7].

Os dados físicos dos cabos e da linha de transmissão são apresentados na Tabela II.

TABELA II. DADOS ELÉTRICOS E MECÂNICOS DOS CABOS

Nome do Cabo	LINNET	EHS 3/8"
Tipo	CAA	EHS Classe A
Comprimento do Vão (m)	300	300
Flechas (m)	7	4
Raio Interno (cm)	0,2976	0
Raio Externo (cm)	0,9155	0,476
Resistência em CC ($\Omega \cdot \text{km}$)	0,2032	3,81

Para os sistemas de aterramento, os valores das grandezas que não variam conforme os arranjos, para os casos simulados, são $\varepsilon = 10 \cdot \varepsilon_0$ e $\mu = \mu_0$ [14]. Os valores de comprimento e raio dos cabos contrapeso e hastes de aterramento que variam conforme os arranjos e das resistividades do solo utilizadas nas simulações serão apresentados na próxima seção antes de cada conjunto de resultados.

IV. RESULTADOS

Neste item serão apresentadas as amplitudes das sobretensões desenvolvidas nas cadeias dos isoladores da linha definida anteriormente e a análise da influência dos arranjos de aterramento nesses resultados. Para tanto os arranjos do sistema de aterramento foram representados por hastes de aterramento, cabos contrapeso ou associações desses elementos. No primeiro caso é feita uma avaliação da utilização das hastes de aterramento e da associação destas com os cabos contrapeso. Em todos os casos o objetivo é alcançar os arranjos de aterramento suficientes para manter os níveis de sobretensão abaixo dos 650 kV, valor mínimo do NBI para essa classe de tensão, com o objetivo de evitar a ocorrência de *backflashovers*.

Caso 1 – Corrente de Descarga Mediana e $\rho = 500 \Omega \cdot \text{m}$.

a) Sistemas de aterramento utilizando apenas hastes de aterramento

Foram determinadas as sobretensões utilizando apenas uma haste de aterramento de aço cobreado conectada às torres como sistema de aterramento e comparados os comportamentos utilizando hastes de 3/4" x 1,5m e 5/8" x 2,4m. Observa-se do gráfico da Fig. 8 que o melhor resultado compete a haste de 5/8" x 2,4m, porém ainda muito acima do valor mínimo do NBI da referida linha.

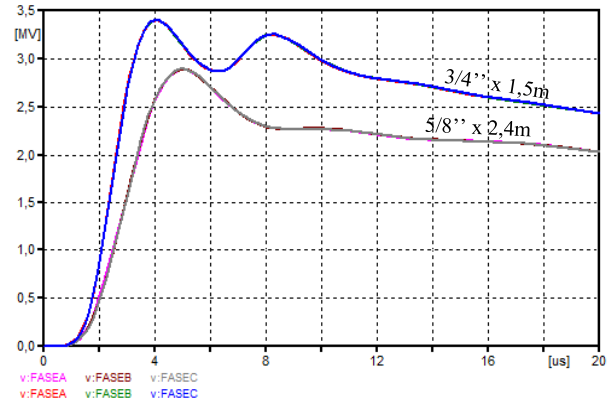


Fig. 8. Comparação entre as sobretensões nas cadeias de isoladores utilizando haste de aterramento de 3/4" x 1,5m e 5/8" x 2,4m

b) Sistemas de aterramento utilizando cabo(s) contrapeso(s) associados ou não a hastes de aterramento

Posteriormente foram determinadas as sobretensões utilizando cabo(s) contrapeso de aço-cobre 4 AWG, enterrados a 60cm da superfície do solo, no sentido longitudinal da linha associado(s) ou não a uma haste de aterramento de aço cobreado de 5/8" x 2,4m como sistema de aterramento e comparados os resultados dessa associação.

- Um cabo contrapeso de 1m (com e sem haste de aterramento)

Foram comparados dois arranjos, ambos apenas com um cabo contrapeso, representado pela Fig. 9, diferenciados apenas pela associação com uma haste de aterramento conectada a extremidade do cabo.

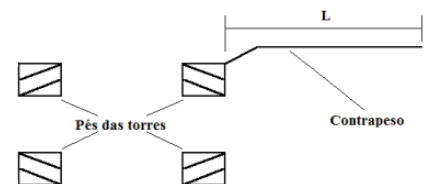


Fig. 9. Representação gráfica da topologia de aterramento descrita. Adaptado de [15].

Observa-se do gráfico da Fig. 10 que a associação de um cabo contrapeso de 1m com a haste de aterramento apresenta melhor resultado que a configuração apenas com o cabo, mas que também essa configuração não é capaz de manter os níveis de sobretensão abaixo de 650 kV.

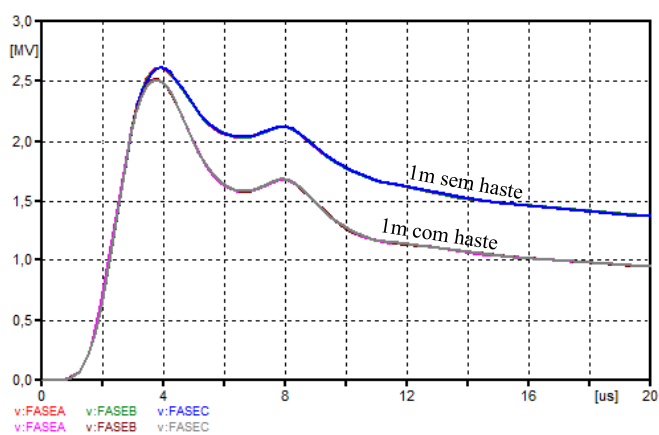


Fig. 10. Comparação entre as sobretensões nas cadeias de isoladores utilizando cabo contrapeso de 1m com e sem haste de aterramento de 5/8''x2,4m.

- Um cabo contrapeso de 10m (com e sem haste de aterramento)

Do gráfico da Fig. 11 conclui-se que a associação do cabo contrapeso de 10m com a haste de aterramento não gera melhoria significativa e mais uma vez o arranjo se mostrou incapaz de conter a sobretensão abaixo do valor do NBI.

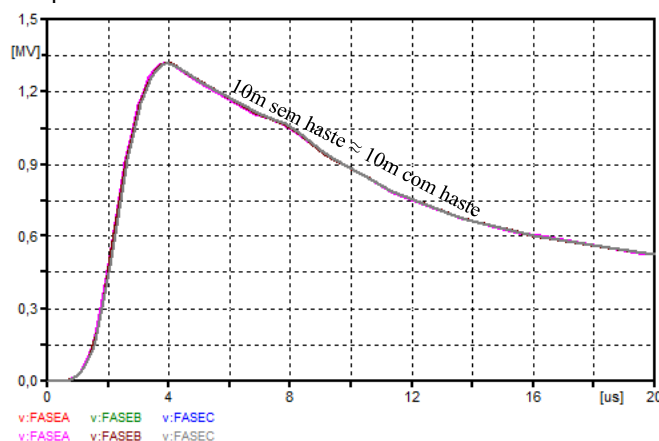


Fig. 11. Comparação entre as sobretensões nas cadeias de isoladores utilizando cabo contrapeso de 10m com e sem haste de aterramento de 5/8''x2,4m.

- c) Sistemas de aterramento utilizando apenas cabo(s) contrapeso(s)

A partir da conclusão do resultado anterior não será mais utilizada a associação de cabo contrapeso com hastes de aterramento.

Foram simulados dois arranjos, um com um cabo de 20m, anteriormente apresentado na Fig. 8 e outro com dois cabos em paralelo de 20m, ilustrado na Fig. 12.

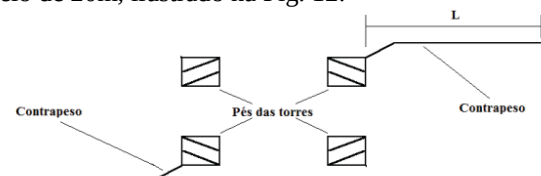


Fig. 12. Croqui do arranjo de aterramento descrito. Adaptado de [15].

Observa-se do gráfico da Fig. 13 os resultados para os dois arranjos, inclusive o arranjo com dois cabos foi o primeiro a apresentar valores de sobretensão menores que 650 kV, sendo assim suficiente para a proteção da linha.

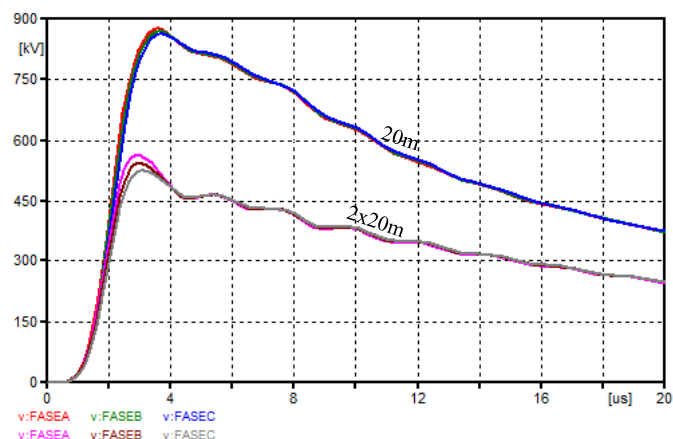


Fig. 13. Comparação entre as sobretensões nas cadeias de isoladores utilizando um e dois cabo(s) contrapeso de 20m.

Caso 2 – Corrente de Descarga Crítica e $\rho = 500 \Omega \cdot m$.

Nesse caso a amplitude da corrente de descarga é quase o dobro da anterior, com a mesma resistividade do solo, então serão simuladas configurações de aterramento com maiores dimensões que no caso 1.

Foram simulados dois arranjos com quatro cabos contrapeso em paralelo, um com 10m e outro com cabos de 20m, conforme a Fig. 14.

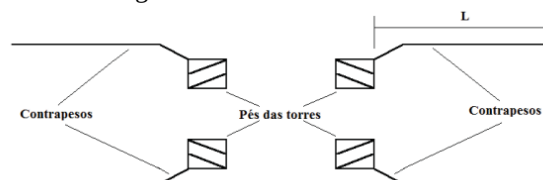


Fig. 14. Ilustração da configuração do aterramento descrito [15].

Na Fig. 15 é apresentada a comparação entre as sobretensões nas cadeias dos isoladores referentes a esses dois arranjos, pode-se concluir que apenas o arranjo com quatro cabos de 20m é suficiente para alcançar o objetivo de manter as sobretensões abaixo do valor mínimo do NBI.

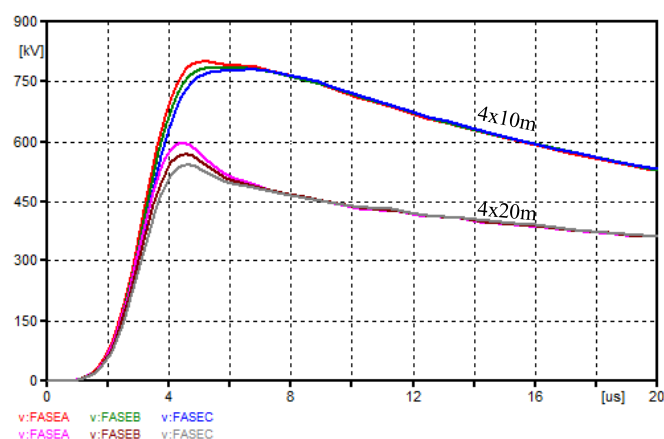


Fig. 15. Comparação entre as sobretensões nas cadeias de isoladores utilizando quatro cabos contrapeso de 10m e 20m.

Caso 3 – Corrente de Descarga Mediana e $\rho = 1000 \Omega \cdot m$

No caso 3 o valor da resistividade do solo é o dobro do que no Caso 1, porém mantendo a mesma corrente de descarga. Assim sendo, serão testados arranjos de aterramento mais robustos que no Caso 1.

Comparados os valores das sobretensões a partir da Fig. 16 para um arranjo com quatro cabos contrapeso de 10m e

outro com 20m, já apresentados na Fig. 13, conclui-se que para alcançar valores abaixo do valor mínimo do NBI é necessário utilizar a topologia com quatro cabos de 20m.

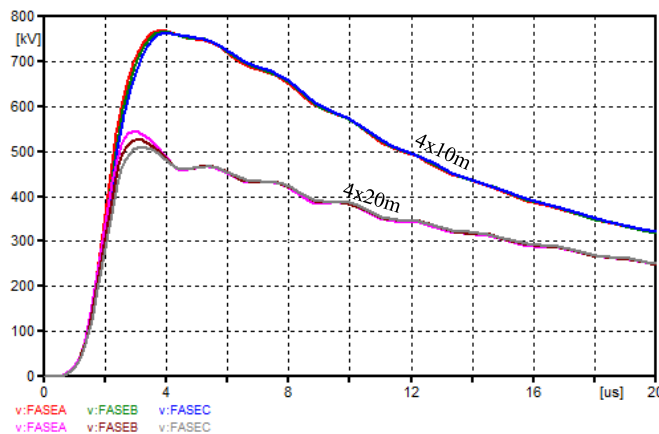


Fig. 16. Comparação entre as sobretensões nas cadeias de isoladores utilizando quatro cabos contrapeso de 10m e 20m.

Caso 4 – Corrente de Descarga Crítica e $\rho = 1000 \Omega \cdot m$.

No último caso a amplitude da corrente de descarga é praticamente o dobro do caso 3 e a resistividade é mantida, portanto serão implementadas topologias de aterramento superiores a esse caso. A partir da leitura do gráfico da Fig. 17 que apresenta os resultados para um arranjo de quatro cabos contrapeso de 30m e 40m, vide Fig. 13, pode-se concluir que são necessários quatro cabos contrapeso de 40m para que o valor máximo das sobretensões não ultrapasse os 650 kV suficientes para proteção da linha.

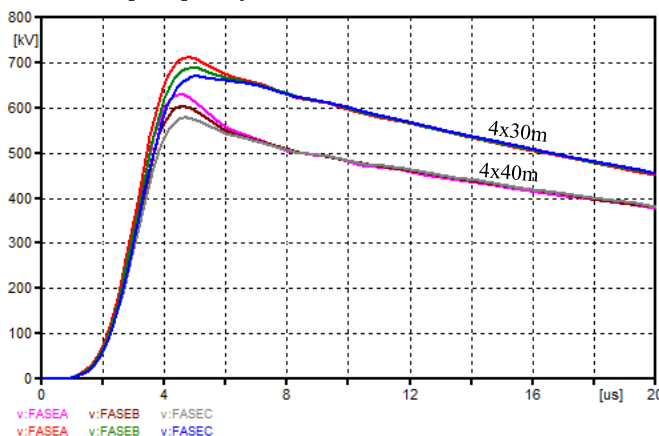


Fig. 17. Comparação entre as sobretensões nas cadeias de isoladores utilizando quatro cabos contrapeso de 30m e 40m.

IV. CONCLUSÕES

Neste trabalho foram apresentados os resultados de estudos da avaliação da eficiência e dimensionamento de sistemas de aterramento para reduzir os desligamentos de uma linha de transmissão provenientes de *backflashovers*, bem como foi realizada uma revisão dos modelos dos elementos envolvidos para a simulação deste fenômeno transitório.

Devido à natureza probabilística das descargas atmosféricas e dos diferentes valores de resistividade do solo encontrados em diferentes regiões, os estudos foram realizados através de várias simulações de transitórios eletromagnéticos utilizando o ATP. Este processo serve para definir a topologia ideal e o dimensionamento adequado de forma a atender o desempenho da linha ao requerido pelo projeto ou legislação em diversas realidades.

Considerando uma linha de 138 kV típica, foram realizadas diversas simulações variando os valores dos parâmetros da corrente da descarga atmosférica e da resistividade do solo. Os resultados comprovam que, para os casos estudados, ao aumentar o comprimento do cabo contrapeso, reduz-se a impedância de aterramento das torres e consequentemente atenua-se as sobretensões nos isoladores.

Também foi verificado, que à medida que o comprimento dos cabos contrapeso aumenta, a influência das hastes de aterramento torna-se insignificante, corroborando assim as configurações usuais das concessionárias de energia, pois estas não apresentam tais associações.

Em suma, conclui-se que, para os casos analisados, as linhas de transmissão precisam ter o comprimento dos cabos contrapeso aumentados quando expostas a correntes de descarga com altos valores de amplitude e/ou instaladas em locais com solos que apresentam alta resistividade, para se atingir o objetivo de redução dos desligamentos em decorrência de *backflashover*.

V. REFERÊNCIAS

- [1] S. Visacro, "Descargas Atmosféricas: Uma Abordagem de Engenharia", Ed. ArtLiber, São Paulo, 2005.
- [2] W. Shuwen; S. Wenxin, "Back flashover protection performance analysis of 220 kV double circuit transmission line", Proc. Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), Wuhan, China, Março 2011.
- [3] W. A. Chisholm; Y. L. Chow; K. D. Srivastava, "Lightning Surge Response of Transmission Towers," IEEE Trans., vol. PAS-102, pp.3232–3242, 1983.
- [4] H. Motoyama; H. Matsubara, "Analytical and experimental study on surge response of transmission tower", IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 15, no 2, pp. 812-819, abril, 2000.
- [5] Y. Baba; M. Ishii, "Numerical electromagnetic field analysis on measuring methods of tower surge impedance", IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 14, no 2, pp.630-635, abril, 1999.
- [6] F. Heidler, J. M. Cvetic, B. V. Stanic, "Calculation of lightning current parameters", IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 14, no 2, pp.399-404, abril, 1999.
- [7] J. C. Salari, C. Portela, "A methodology for electromagnetic transients calculation – an application for the calculation of lightning propagation in transmission lines", IEEE Transactions on Power Delivery, v. 22, n. 1, pp. 527-536, Jan. 2007.
- [8] G. Kindermann, J.M. Campagnolo, "Aterramento Elétrico", Editora Sagra, DCLuzzatto, Porto Alegre, 1995.
- [9] E.D. Sunde, "Earth Conduction Effects in Transmission Systems" (Dover Publ. New York, 1949)
- [10] N.D. Hatziaargyriou, M. Lorentzou, "Grounding Systems Design Using EMTF", 23rdEuropean EMTF Users Group Meeting, Barcelona, 9-11 November 1997
- [11] R.S. Alipio, "Modelagem eletromagnética de aterramentos elétricos nos domínios do tempo e da frequência". Dissertação de Mestrado, CEFET-MG, Minas Gerais. 2008.
- [12] J. C. C. Viana, "Estudo de aplicação de para-raios ZnO em linhas de transmissão em regiões de nível cerâmico e resistência de aterramento elevados". Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, 2009.
- [13] S. Visacro, A. Soares Jr. and M. A. O. Schroeder et al. "Statistical analysis of lightning current parameters: Measurements at Morro do Cachimbo station," J. Geophys. Res. (109), D01105, doi:10.1029/ 2003JD003662, 2004.
- [14] A. B. Lima, "Método para cálculo da impedância de malhas de aterramento de torres de linhas de transmissão". Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, 2010.
- [15] B.L. Berardo, "Estudo do aterramento dos pés de torres de linha de transmissão frente Às descargas atmosféricas". Dissertação de Mestrado, UNESP, São Paulo. 2012.