

ESTUDO COMPARATIVO DO DESEMPENHO DE ATERRAMENTO EM TORRES DE TRANSMISSÃO

¹Daniel Travassos Afonso Bomfim (SENAI CIMATEC); ²Guilherme Saldanha Kroetz (SENAI CIMATEC) – guilherme.kroetz@fieb.org.br; ³Raniere Varon Fernandes Mimoso (SENAI CIMATEC) – raniere1994@hotmail.com; ⁴Frederico Ramos Cesário (SENAI CIMATEC) - fredericoc@fieb.org.br.

Resumo: Este trabalho apresenta um estudo do desempenho de sistemas de aterramento de torres de transmissão frente às descargas atmosféricas através do programa ATP. Utilizou-se os modelos de torre sem perdas e o de Ishii para a modelagem da torre de transmissão. Foram analisadas diferentes configurações de sistemas de aterramento, variando-se o comprimento das hastes e contrapesos. Verificou-se que a inserção da haste quando utiliza-se cabo contrapeso de comprimento elevado não é efetivo na redução da sobretensão., e que os modelos de torre sem perdas e de Ishii apresentaram resultados bem próximos entre si.

Palavras-Chaves: ATP; Descargas Atmosféricas; Aterramento; Modelo de Ishii.

COMPARATIVE STUDY OF LIGHTNING OVERVOLTAGES IN DIFFERENT MODELS OF TRANSMISSION TOWERS

Abstract: This work presents a study of the performance of grounding systems of transmission towers against atmospheric discharges through the ATP program. It was used the models of tower without losses and the one of Ishii for the modeling of the tower of transmission. Different configurations of grounding systems were analyzed, varying the length of the rods and counterweights. It was verified that the insertion of the rod when using high-weight counterweight cable is not effective in reducing the overvoltage, and that the Ishii-lossless tower models showed results very close to each other.

Keywords: ATP; Lightning Surge; Grounding; Ishii Model.

1. INTRODUÇÃO

O desempenho de sistemas de aterramento frente a surtos atmosféricos é de grande valia na redução das sobretensões atmosféricas em torres de transmissão, evitando o possível desligamento de linhas de transmissão, o que afeta as diversas cargas conectadas às linhas, em especial as indústrias. Deste modo, o sistema de aterramento em simulações computacionais deve ser o mais próximo possível da realidade. O fenômeno de backflashover ocasiona desligamentos de linhas de transmissão (entre 40 a 70%) [1], e o mesmo ocorre quando a rigidez dielétrica do ar, na incidência de uma descarga atmosférica, é rompida, gerando um arco elétrico entre a torre e a fase. O correto dimensionamento da torre de transmissão e do aterramento reduzem as sobretensões nas cadeias de isoladores, reduzindo assim, a incidência do backflashover. Um eficiente sistema de aterramento reduz a ocorrência deste fenômeno.

A modelagem da impedância de aterramento de uma torre de transmissão é importante neste tipo de estudo. Em baixas frequências, a haste é modelada por uma resistência, já para altas frequências, a mesma é modelada por uma impedância a parâmetros concentrados [2,3]. Neste trabalho, através do programa ATP (Alternative Transients Program), avalia-se o efeito de diferentes configurações de aterramento (haste e cabo contrapeso) nas sobretensões atmosféricas em torres de transmissão.

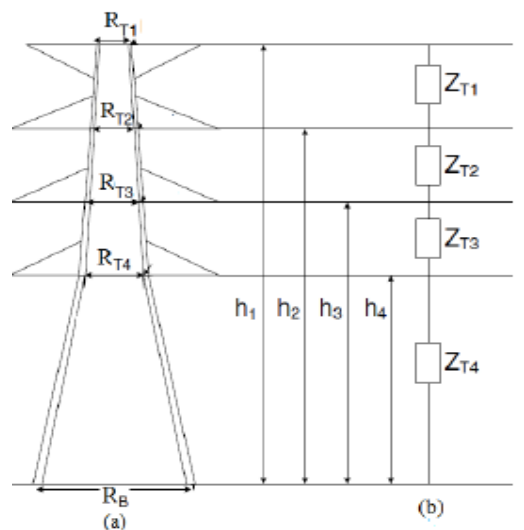
2. MODELOS APLICADOS AO ESTUDO DAS SOBRETENSÕES ATMOSFÉRICAS

Nesta seção serão apresentados: os modelos da torre de transmissão e os modelos da haste e contrapeso de aterramento da torre.

2.1. Modelo de Torre sem Perdas

A representação deste modelo pode ser observada através da Figura 1. Neste modelo, a torre de transmissão é segmentada em quatro seções, cada uma representada por uma impedância de surto a parâmetros distribuídos. A torre de transmissão é representada por linhas curtas sem perdas, que representam as pernas, as barras inclinadas e os braços da torre. As tensões obtidas computacionalmente por [4] estão de acordo com as tensões obtidas experimentalmente, deste modo, os autores propuseram uma equação empírica para o cálculo da impedância de surto para cada seção da torre. Neste trabalho, utilizou-se os mesmos parâmetros da torre de transmissão modelada em [5].

Figura 1. (a) Silhueta de uma torre de alta tensão; (b) Impedância de surto para cada trecho.



2.2. Modelo de Torre de Múltiplos Níveis de Ishii

A torre de transmissão é representada por quatro impedâncias de surto à parâmetros distribuídos Z_t , como ilustrado na Figura 2. Para representação da distorção e atenuação da onda viajante, um circuito paralelo RL é inserido em cada seção. Os valores dos resistores e indutores são definidos através das seguintes equações [6]:

$$R_i = \Delta R_i * x_i \quad (1)$$

$$L_i = 2\tau R_i \quad (2)$$

$$\Delta R_1 = \Delta R_2 = \Delta R_3 = \frac{2Z_{t1}}{(h - x_4)} * \ln\left(\frac{1}{\alpha_1}\right) \quad (3)$$

$$\Delta R_4 = \frac{2Z_{t2}}{h} * \ln\left(\frac{1}{\alpha_4}\right) \quad (4)$$

onde

τ - Tempo de propagação ao longo da torre ($\frac{h}{c}$);

h - Altura da torre;

c - Velocidade de propagação da onda na torre;

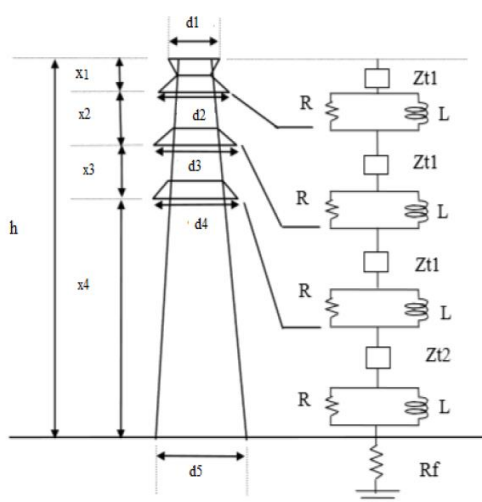
$\alpha_1 = \alpha_4$ - Atenuação ao longo da torre = 0,8;

R_f - Resistência de aterramento;

Z_t - Impedância de surto.

Os valores ótimos encontrados por Ishii, para seu modelo de torre de transmissão foram de 220Ω e 150Ω para as impedâncias de surto Z_{t1} e Z_{t2} respectivamente. Estes valores foram obtidos empiricamente, com o objetivo de se obter os mesmos valores experimentais medidos em uma torre de transmissão de 500kV, com altura de 61,8m. Neste modelo, para diferentes alturas de torres de transmissão, as impedâncias de surto de cada trecho não se alteram, todavia, os parâmetros RL devem ser calculados sempre que a altura for alterada. Ishii considerou um valor mais alto de Z_{t1} devido ao elevado valor da impedância de transferência na cadeia de isoladores quando o cabo-guarda está conectado à torre; e também devido à indução instantânea da tensão no cabo-guarda, o que leva a uma superestimação do efeito de acoplamento entre os cabos-guarda e os condutores fase [7].

Figura 2. Modelo multinível proposto por Ishii [6].



2.3. Modelo da Haste de Aterramento

A haste de aterramento é representada por um circuito RLC e a modelagem matemática é realizada através das equações de Sunde [8].

$$R = \frac{\rho}{2\pi l} * \left[\ln \frac{4l}{r} - 1 \right] \quad (5)$$

$$C = 2\pi\epsilon l * \left[\ln \frac{4l}{r} - 1 \right]^{-1} \quad (6)$$

$$L = \frac{\mu l}{2\pi} * \left[\ln \frac{2l}{r} - 1 \right] \quad (7)$$

onde:

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 ($\Omega \cdot m$);

2.4. Modelo do Contrapeso de Aterramento

O modelo de cabo de contrapeso é representado pelo circuito RLC do tipo π , e seus valores também são obtidos através das expressões de Sunde [8].

$$R = \frac{l}{\pi r^2} * \rho_c \quad (8)$$

$$G^{-1} = \frac{\rho}{2\pi l} * \left[\ln \frac{4l}{\alpha} - 1 \right] \quad (9)$$

$$C = 2\pi\varepsilon * \left[\ln \frac{4l}{\alpha} - 1 \right] \quad (10)$$

$$L = \frac{\mu l}{\alpha} * \left[\ln \frac{2l}{\alpha} - 1 \right] \quad (11)$$

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);

3. METODOLOGIA

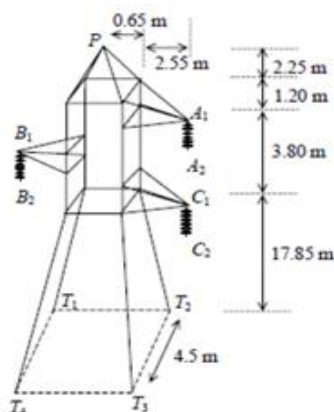
No ATPDraw, as linhas de transmissão foram representadas pelo modelo LCC de Bergeron, ambas de 138kV. A corrente de descarga incide diretamente no topo da torre, e foi representada pela função de Heidler [9] com amplitude de 45,3kA, tempo de frente de 5,6 μ s e tempo de cauda de 72 μ s. A resistividade do solo escolhida foi de 500 $\Omega \cdot m$. Considerou-se uma velocidade de propagação da onda na torre de 280m/ μ s. Os parâmetros da linha de transmissão encontram-se na tabela 1. A configuração da torre de transmissão pode ser observada na Figura 3 [5]. No modelo de aterramento, considerou-se uma haste de 5/8"x2,4m; cabo contrapeso de aço-cobreado 4AWG enterrado a 60cm; permissividade relativa do solo de 10 e permeabilidade relativa do solo unitária.

Tabela 1. Parâmetros da linha de transmissão.



Tipo	Fase	Guarda
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 (Ω .km)	0,2032	3,81

Figura 3. Configuração da torre do modelo de linhas sem perdas.



4. RESULTADOS

Esta seção apresenta as tensões calculadas nas cadeias de isoladores a partir da simulação dos arranjos de aterramento. Como a tensão nas fases são muito próximas, para efeito de análise, apenas as tensões na fase A estão inseridas. Primeiramente, analisou-se as sobretensões no modelo de Ishii (Figuras 4 e 5) e, em seguida, comparou-se os resultados obtidos nos dois modelos de torre de transmissão (Figura 6).

Como pode ser observado na Figura 4, com o aumento do diâmetro e do comprimento da haste, ocorre uma diminuição da sobretensão atmosférica. O menor valor de sobretensão ocorreu para a haste $\frac{3}{4}$ "x3m, como esperado. É possível observar também, de acordo com a Figura 5 que a inserção de uma haste no aterramento com contrapeso de 1m contribui na diminuição do valor da amplitude e da cauda da sobretensão, o mesmo não ocorre quando o cabo contrapeso apresenta um comprimento elevado. Outro fato é que a inclusão da haste quando utiliza-se cabo contrapeso de comprimento elevado não é efetivo na redução da sobretensão, em concordância com os resultados obtidos por [10]. O atraso da onda no modelo de Ishii em relação ao do modelo sem perdas ocorre em decorrência da inclusão do fenômeno da dispersão.

Figura 4. Sobretensões atmosféricas para diferentes comprimentos e bitolas de haste, utilizando o modelo de Ishii.

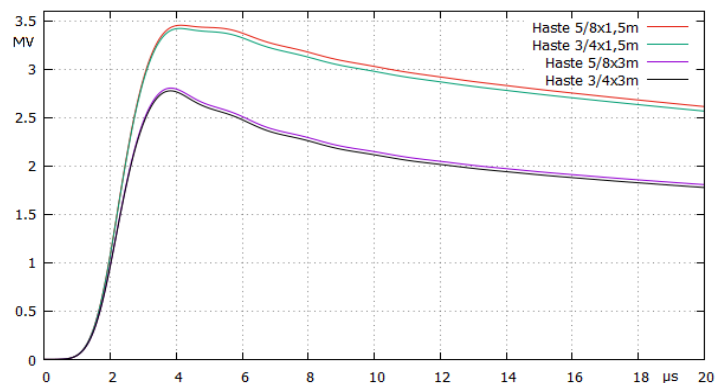


Figura 5. Sobretensões atmosféricas de diferentes arranjos de aterramento

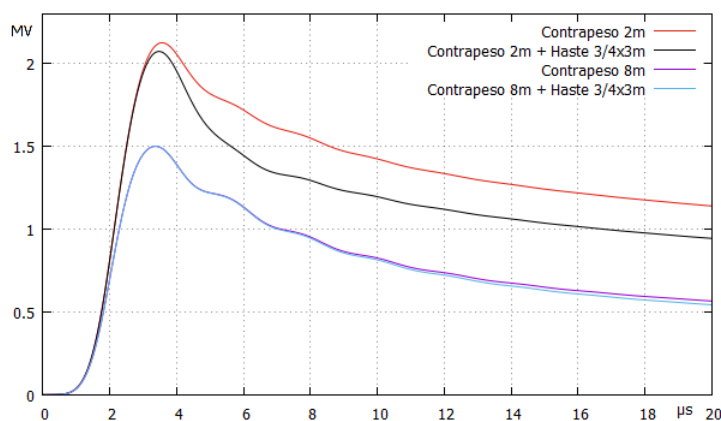
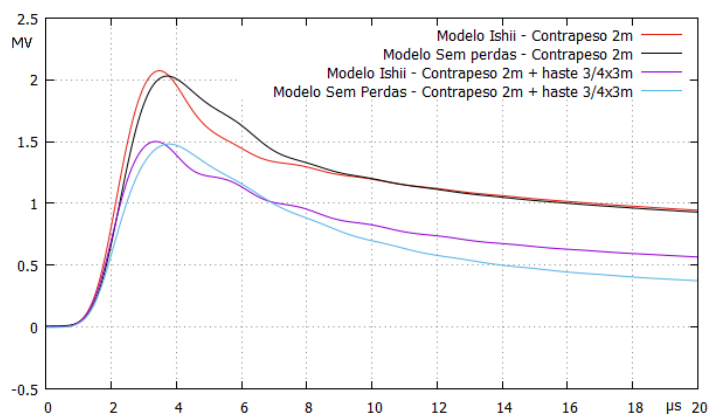


Figura 6. Sobretensões atmosféricas nos modelos sem perdas e de Ishii para diferentes arranjos de aterramento



A Figura 6 apresenta as sobretensões atmosféricas nos modelos sem perdas e de Ishii em duas configurações de aterramento, uma com cabo contrapeso de 2m e outra com cabo contrapeso de 2m e haste 3/4"x3m. É possível observar que as amplitudes são próximas, diferindo apenas na cauda quando a haste é inserida.



5. CONCLUSÃO

Este trabalho analisou o desempenho de diferentes tipos de aterramento em dois modelos de torres de transmissão (Ishii e linhas sem perdas) frente às descargas atmosféricas. Foram simulados no programa ATP os modelos de haste e de contrapeso, alterando-se o comprimento dos mesmos. Verificou-se que o sistema de aterramento apenas com a haste apresenta um valor de sobretensão muito elevado em comparação com os demais tipos, como esperado. É possível observar também, que a inserção de uma haste no aterramento com contrapeso de 1m contribui na diminuição do valor da amplitude e da cauda da sobretensão, o mesmo não ocorre quando o cabo contrapeso apresenta um comprimento elevado (maior que 8m). Outro fato é que a inclusão da haste quando utiliza-se cabo contrapeso de comprimento elevado não é efetivo na redução da sobretensão. É importante salientar também que os modelos de torre sem perdas e de Ishii apresentaram resultados bem próximos entre si.

6. REFERÊNCIAS

- ¹SHUWEN, W. e WENXIN, S. **Backflashover protection performance analysis of 220kV double circuit transmission line**. APPEEC, 2011.
- ²GRCEV, L. **Grounding systems modeling for high frequencies**. Proceedings of the IEEE Bologna Powertech Conference, Bolonha, Junho, 2003.
- ³ALIPIO, R. S. et al. **A discussion of circuit equivalentes of a vertical ground rod**. Proceedings of International Conference on Grounding and Earthing and 3rd International Conference on Lightning Physics and Effects, Forianopolis, 2008.
- ⁴CHISHOLM, W.A., CHOW Y. L. e SRIVASTAVA K. D. **Lightning Surge Response of Transmission Tower**. IEEE Trans., vol. PAS-102, 1983
- ⁵VASCONCELLOS, F. M. e MOREIRA, F.A. **Avaliação e Dimensionamento de Sistemas de Aterramento para Redução de Desligamentos de uma Linha Transmissão de 138kV por Backflashover**. XII Conferência Brasileira de Qualidade de Energia Elétrica, 2017.
- ⁶ISHII, M et al., **Multistory transmission tower model for lightning surge analysis**, IEEE Trans. Power Delivery, vol. PWRD-6, no. 3, p. 1372, Jul. 1991.
- ⁷KROETZ, G. S., MOREIRA, F. A. e NOVO, M. S. **Estudo Comparativo de Sobretensões Atmosféricas em Linhas de Transmissão Devido às Descargas em Torres por meio do Método FDTD e do Programa ATP**. SBSE 2016 – Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, 2016.
- ⁸SUNDE, E. D. **Earth Conduction Effects in Transmission Systems**, 1949.
- ⁹HEIDLER, F. **Calculation of Lightning Current Parameters**, IEEE Trans. 1999.
- ¹⁰VASCONCELLOS, F. M. e MOREIRA, F.A. **Avaliação e Dimensionamento de Sistemas de Aterramento para Redução de Desligamentos de uma Linha Transmissão de 138kV por Backflashover**. XII Conferência Brasileira de Qualidade de Energia Elétrica, 2017.