

ESTUDO COMPARATIVO DE SOBRETENSÕES ATMOSFÉRICAS EM DIFERENTES MODELOS DE TORRES DE TRANSMISSÃO

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

Resumo: Este trabalho apresenta um estudo comparativo das sobretensões atmosféricas em diferentes modelos de torres de transmissão através do programa ATP. Foram implementados três modelos de torres: o modelo geométrico simples tronco de cone e os modelos de múltiplos estágios sem perdas e de Ishii. Verificou-se que, o modelo geométrico simples apresentou um valor de sobretensão muito elevado em comparação com os demais modelos, e que o modelo de Ishii, apesar de ter sido desenvolvido com base em experimentos em uma torre de 62m e 500kV, obteve ótimos resultados para uma torre de 20m e 138kV.

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

COMPARATIVE STUDY OF LIGHTNING OVERVOLTAGES IN DIFFERENT MODELS OF TRANSMISSION TOWERS

Abstract: This paper presents a comparative study of lightning overvoltages in different models of transmission towers through the ATP program. Three tower models were implemented: the cone trunk geometric model, the no-loss model and the Ishii model. The results have shown that the geometric model presented a very high overvoltage value when compared to the other models, and that the Ishii model, although it was developed based on experiments in a tower of 62m and 500kV, obtained excellent results for the tower under analysis of 20m and 138kV.

Keywords: ATP; Lightning Surge; Transmission Tower; Ishii Model.

1. INTRODUÇÃO

O desempenho de linhas de transmissão frente a surtos atmosféricos é de grande interesse por parte das concessionárias de transmissão de energia elétrica, tendo em vista a possível interrupção no fornecimento de energia às diversas cargas conectadas às linhas, em especial às indústrias. Deste modo, os modelos da torre de transmissão em simulações computacionais devem ser o mais próximo possível da realidade. Estima-se que entre 40 a 70% dos desligamentos de linhas de transmissão são provocados por um fenômeno conhecido como backflashover [1], que 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.

A impedância de uma torre de transmissão vista como um condutor vertical foi estudada por meio de abordagens experimentais [2,3], por meio da teoria de circuitos [4], e pela abordagem eletromagnética [5,6]. A impedância de surto da torre depende da geometria da mesma e da forma e tempo de frente da corrente injetada. Neste trabalho, diferentes modelos de torre de transmissão foram analisados: o modelo aproximado por geometria simples (tronco de cones [7]); o modelo composto por linhas sem perdas [8]; e o modelo de múltiplos níveis de Ishii [3]. No presente artigo é realizado um estudo comparativo das sobretensões atmosféricas em diferentes modelos de torres de transmissão por meio do programa ATP.

2. MODELOS APLICADOS AO ESTUDO DAS SOBRETENSÕES ATMOSFÉRICAS

Nesta seção apresenta-se o programa ATP e os modelos da haste de aterramento da torre e os modelos de torres de transmissão: o modelo aproximado por geometria simples; o modelo composto por linhas sem perdas; e o modelo de múltiplos níveis de Ishii.

2.1. Programa ATP

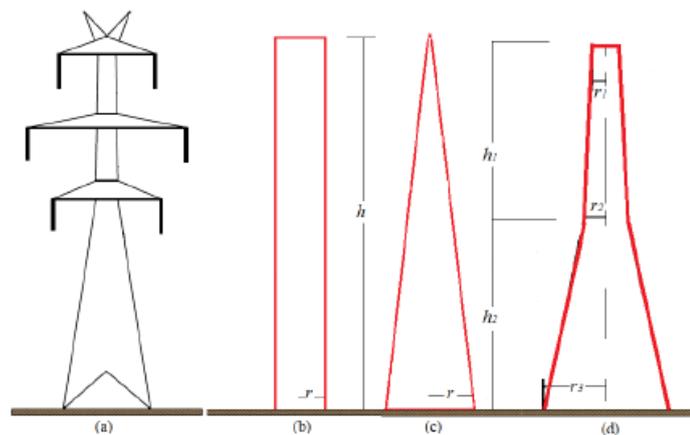
O ATP (Alternative Transients Program) é um programa do tipo EMTP (Electromagnetic Transient Program). É o software mais utilizado entre pesquisadores, pois é robusto e confiável nos estudos de transitórios eletromagnéticos em sistemas elétricos de potência.

2.2. Modelos Aproximados por Geometria Simples

Nestes modelos, utiliza-se a teoria de campos eletromagnéticos para a obtenção das impedâncias de surto, e a torre é modelada através de formas geométricas simples, como cones, cilindros ou troncos. Foram os primeiros modelos

de torre de transmissão, deste modo, são úteis para a obtenção da tensão de surto da torre (tensão no topo), pois neste modelo, a impedância de surto representa a torre por completo, sem distinção das seções referentes a cada braço da mesma. O modelo utilizado para a representação da torre foi a aproximação por troncos de cone. Este modelo pode ser observado na Figura 1-(d).

Figura 1. (a) Silhueta de uma torre de alta tensão; Aproximações (b) cilíndrica, (c) cônica e (d) por troncos de cone [7].



A equação utilizada para o cálculo da impedância de surto da torre aproximada por troncos de cone é dada por:

$$Z_T = 60 \ln \left(\cot \left(\frac{1}{2} \tan^{-1} T \right) \right) \quad (1)$$

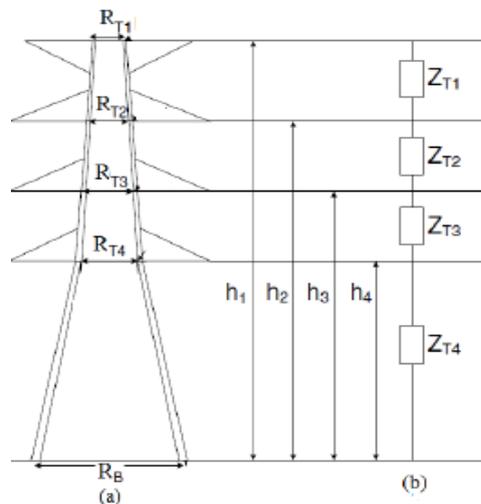
onde T é dado por:

$$T = \frac{r_1 h_2 + r_2 (h_1 + h_2) + r_3 h_1}{(h_1 + h_2)^2} \quad (2)$$

2.3. Modelos Compostos por Linhas sem Perdas

A representação deste modelo pode ser observada através da Figura 2. Neste modelo, a torre de transmissão é segmentada em quatro seções, cada uma representada por uma impedância de surto a parâmetros distribuídos (Figura 2). 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 [7] 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 [9].

Figura 2. (a) Silhueta de uma torre de alta tensão; (b) Impedância de surto para cada trecho.



2.4. Modelo de Torre de Múltiplos Níveis de Ishii

A torre de transmissão é representada por quatro impedâncias de surto a parâmetros distribuídos Z_t , como ilustrado na Figura 3. 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:

$$R_i = \Delta R_i * x_i \quad (3)$$

$$L_i = 2\tau R_i \quad (4)$$

$$\Delta R_1 = \Delta R_2 = \Delta R_3 = \frac{2Z_{t1}}{(h - x_4)} * \ln\left(\frac{1}{\alpha_1}\right) \quad (5)$$

$$\Delta R_4 = \frac{2Z_{t2}}{h} * \ln\left(\frac{1}{\alpha_4}\right) \quad (6)$$

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;

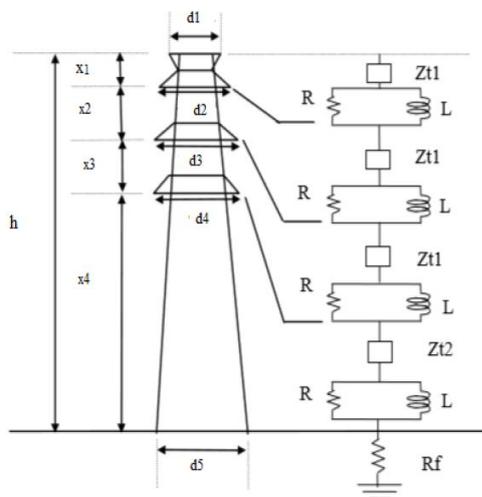
R_f - Resistência de aterramento;

Z_t - Impedância de surto.

Os valores ótimos encontrados para o modelo de torre de transmissão de Ishii 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 [10].

Figura 3. (a) Silhueta de uma torre de alta tensão; (b) modelo multinível proposto por Ishii [3].



A haste de aterramento é representada por um circuito RLC e a modelagem matemática é realizada através das equações de Sunde [11].

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 [12] com amplitude de 45,3kA, tempo de frente de 5,6 μ s e tempo de cauda de 53,5 μ s. A resistividade do solo escolhida foi de 500 Ω .m. Considerou-se uma velocidade de propagação da onda na torre de $280 \cdot 10^6$ m/s. Os parâmetros da linha de transmissão encontram-se na tabela 1. A configuração da torre de transmissão pode ser observada na Figura 4 [9]. No modelo de aterramento, considerou-se uma haste de $\frac{3}{4}$ "x1,5m, permissividade relativa do solo de 10 e permeabilidade relativa do solo unitária.

O valor calculado da impedância de surto do modelo de geometria simples, para a torre da Figura 4, foi de 201 Ω . O modelo de torre sem perdas foi utilizado para validação, pois [9] utilizou o mesmo modelo de torre e a mesma configuração de linha de transmissão. A impedância utilizada para este modelo foi de 180 Ω para cada seção. Já no modelo de torre de Ishii, foram utilizadas impedâncias de surto Z_{t1} e Z_{t2} de 220 Ω e 150 Ω , respectivamente. Foi simulado também o modelo de torre de Ishii com $Z_{t1} = Z_{t2} = 180\Omega$. É válido ressaltar que alterando Z_i , altera-se, no modelo de Ishii, os parâmetros RL.

Figura 4. Configuração da torre do modelo de linhas sem perdas [9].

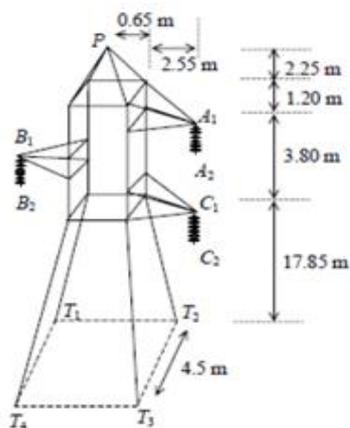


Tabela 1. Parâmetros da linha de transmissão.

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

4. RESULTADOS

Esta seção apresenta as tensões calculadas no topo da torre de transmissão e nas cadeias de isoladores dos diferentes modelos de torres de transmissão. Como a tensão nas fases são muito próximas, para efeito de análise, nas Figuras 5 e 6, apenas as tensões na fase A estão inseridas. A comparação entre os resultados pode ser melhor visualizada através da tabela 2, onde *1: $Z_{t1} = 220\Omega$ e $Z_{t2} = 150\Omega$; e *2: $Z_{t1} = Z_{t2} = 180\Omega$.

O erro entre os valores de sobretensão no topo da torre do modelo sem perdas em relação ao calculado em [9] foi de 1,74%, validando a simulação. O modelo de geometria simples, apresentou a maior sobretensão atmosférica, chegando a 4,15MV, ultrapassando em aproximadamente 1,2MV o valor de [9]. Este valor elevado ocorre, pois o modelo geométrico simples não leva em consideração os braços da torre, aumentando sua impedância de surto. É possível observar também, de acordo com a Figura 5 e 6, que os valores de pico (valores de interesse do presente artigo) das sobretensões no topo da torre e na fase A do modelo sem perdas e de Ishii atingiram valores próximos. O valor mais elevado de Ishii se deve ao fato do mesmo utilizar impedâncias de surto Z_{t1} maiores que a do modelo de torre sem perdas. 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 5. Sobretensões atmosféricas no topo das torres de transmissão.

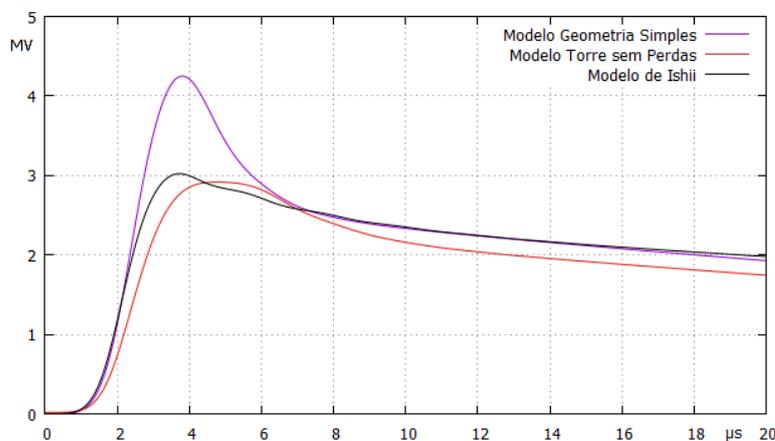


Figura 6. Sobretensões atmosféricas na fase A do modelo sem perdas e de Ishii para Z_t 's de 180 e 220Ω.

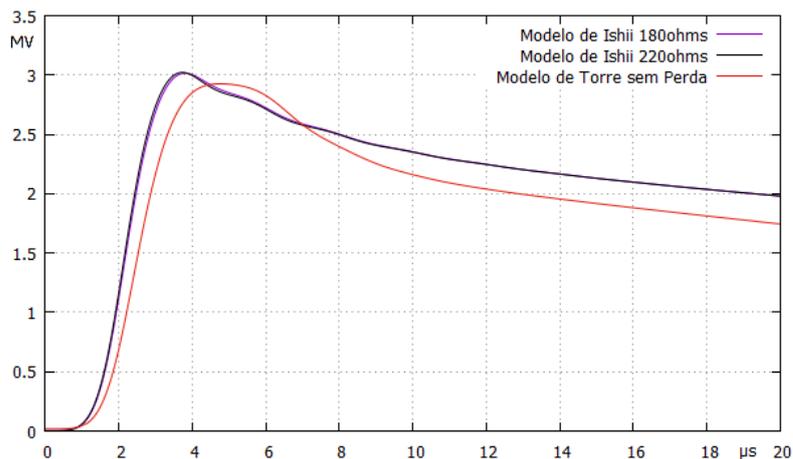


Tabela 2. Sobretensões atmosféricas no topo e na fase A em diferentes modelos de torre de transmissão.

Modelo	V_{topo} [MVA]	V_A [MVA]
Geometria Simples	4,15	-
Linhas sem Perdas	2,92	2,9
Ishii*1	3,01	3
Ishii*2	3,02	3
[9]	2,87	2,85

5. CONCLUSÃO

Este trabalho analisou o desempenho de diferentes modelos de torres de transmissão frente às descargas atmosféricas. Foram simulados no programa ATP o modelo geométrico simples tronco de cone, o modelo sem perdas e o modelo de

Ishii com dois valores de impedância de surto (180Ω e 220Ω). Verificou-se que, o modelo geométrico simples apresentou um valor de sobretensão muito elevado em comparação com os demais modelos (1,2MV a mais), isto se deve ao fato deste modelo não levar em consideração os braços da torre. Já as sobretensões no topo da torre e nas fases dos modelos sem perdas e de Ishii, apresentaram valores bem próximos, comprovando que o modelo de Ishii, apesar de ter sido desenvolvido com base em experimentos em uma torre de 62m e 500kV, pode ser utilizado para representar torres com nível de tensão 138kV e altura de 20m.

6. REFERÊNCIAS

- ¹SHUWEN, W. e WENXIN, S. **Backflashover protection performance analysis of 220kV double circuit transmission line**. APPEEC, 2011.
- ²KAWAY, M. **Studies of the surge response on a transmission line tower**. IEEE Trans Power Apparatus Syst, pp: 30–34, Jan, 1964.
- ³ISHII, M et al., **Multistory transmission tower model for lightning surge analysis**, IEEE Trans. Power Delivery, vol. PWRD-6, no. 3, p. 1372, Jul. 1991.
- ⁴AMETANI, A. e KAWAMURA T. **A Method of a Lightning Surge Analysis Recommended in Japan using EMTP**, IEEE Trans. Power Delivery, vol. 20, no 2, Abril, 2005.
- ⁵BABA, Y. e ISHII M. **Numerical Electromagnetic Field Analysis of Tower Surge 66 Response**. IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 12, no 1, Janeiro, 1997.
- ⁶NODA, T. **A Tower Model for Lightning Overvoltage Studies Based on the Result of an FDTD Simulation**. Electrical Engineering in Japan, vol. 164, no 1, 2008, Criepe, Japão.
- ⁷CHISHOLM, W.A., CHOW Y. L. e SRIVASTAVA K. D. **Lightning Surge Response of Transmission Tower**. IEEE Trans., vol. PAS-102, 1983.
- ⁸SALARI J. C., PORTELA C. **A Methodology for Electromagnetic Transient Calculations**. IEEE Transaction on Power Delivery, 2007.
- ⁹VASCONCELLOS, 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.
- ¹⁰KROETZ, 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.
- ¹¹SUNDE, E. D. **Earth Conduction Effects in Transmission Systems**, 1949.
- ¹²HEIDLER, F. **Calculation of Lightning Current Parameters**, IEEE Trans. 1999.