

ESTUDO DE SOBRETENSÕES EM LINHAS DE TRANSMISSÃO COM DIFERENTES MODELOS DE DESCARGA ATMOSFÉRICA

VANILDO L. M. CUNHA*, JOÃO PEDRO L. SALVADOR†, ANTONIO CARLOS S. LIMA*

* *Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ
Rio de Janeiro, RJ, Brasil*

† *Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, CEFET/RJ
Angra dos Reis, RJ, Brasil*

Emails: cunhavava@poli.ufrj.br, joao.salvador@cefet-rj.br, acsl@dee.ufrj.br

Abstract— This work presents a discussion about lightning discharge modeling for overhead transmission line performance studies. Lightning discharges are considered as the main causes for line faults. When dealing with the direct incidence of such discharges over the lines, high voltages can be assessed on insulator chains and between ground and phase wires. As the fault occurs, protective relaying schemes trip, which may lead to interruption of energy supply and loss of reliability.

Keywords— Insulation coordination, Lightning discharges, Modeling, Overhead transmission lines, Performance studies.

Resumo— Este trabalho apresenta uma discussão sobre a modelagem de descargas atmosféricas no estudo de desempenho das linhas de transmissão. Descargas atmosféricas são consideradas as principais causas de defeitos nas linhas de transmissão. Quando se trata da incidência direta sobre a linha, surgem tensões elevadas nas cadeias de isoladores e entre os condutores. Na ocorrência desses defeitos, o sistema de proteção atua, o que pode implicar na interrupção do fornecimento da energia no circuito atingido, causando prejuízos, além da redução da confiabilidade da rede elétrica.

Palavras-chave— Coordenação de Isolamento; Descarga atmosférica; Estudo de desempenho; Linhas de Transmissão; Modelos.

1 Introdução

A descarga atmosférica é um fenômeno natural, cujos parâmetros dos modelos provêm da análise de medições que já há várias décadas são feitas em todo mundo. Quando se trata de proteção contra descargas atmosféricas há um interesse maior nas descargas descendentes negativas, por serem mais frequentes que as demais (Silveira et al., 2010). Nos estudos computacionais de transitórios eletromagnéticos decorrentes de descargas atmosféricas, é de fundamental interesse uma modelagem adequada da corrente de descarga para garantir a qualidade nos resultados.

Os modelos da primeira corrente de descarga descendente negativa comumente levam em consideração os principais parâmetros das formas de onda reais, como a amplitude máxima, o tempo da frente de onda e o tempo de meia onda. Consequentemente, esses modelos tornam-se simplificados, não contemplando todas as características presentes nas formas de onda reais, e.g., a concavidade na frente de onda, o aumento acentuado em torno da metade do pico e o segundo pico da corrente, obtidas a partir da média dos dados de medições em torres instrumentadas (Anderson and Eriksson, 1980; Visacro et al., 2004). Isso pode resultar em sobretensões superestimadas ou ainda subestimadas (Silveira et al., 2009; Silveira et al., 2010).

Para uma modelagem mais consistente, foram propostos em (Conti and Visacro, 2007) parâme-

tros de uma expressão analítica baseada no somatório de sete funções de Heidler capaz de representar as formas de onda reais da primeira corrente de descarga descendente negativa (Duplo Pico). Nos trabalhos (Silveira et al., 2009; Silveira et al., 2010) foi mostrada a relevância de uma representação realística da corrente de descarga, em comparação com um modelo simplificado (Pico Único). O modelo Duplo Pico tem sido adotado em alguns trabalhos como (Silveira et al., 2012; Silveira et al., 2013), em substituição dos modelos mais simplificados.

O objetivo deste trabalho é comparar os efeitos do uso de formas de onda simplificadas para representar a primeira corrente de descarga descendente negativa, nos estudos de sobretensões transitórias em linhas de transmissão, com as representações realísticas da corrente de descarga obtidos a partir de medições. Serão avaliadas as sobretensões causadas pela incidência direta, na torre e no cabo pararraios ao meio do vão.

2 Modelagem dos Componentes

Nesse estudo foi utilizada uma linha de transmissão de 138 kV de circuito simples, cujos cabos condutores são do tipo ACSR com código *linnet* e o cabo pararraios do tipo EHS de 3/8". O vão da linha possui comprimento médio igual a 300 m, a resistividade elétrica do solo foi considerada igual a 2000 Ω .m e o sistema de aterramento foi representado por uma resistência elétrica de 30 Ω , de

acordo com (Tomasevich, 2011).

A linha foi modelada utilizando o modelo JMarti do ATP/EMTP, no qual os parâmetros são variáveis com a frequência. Somente foram consideradas as torres adjacentes ao ponto de incidência da descarga. Portanto os efeitos das demais torres e sistemas de aterramentos foram desprezados. Em ambos os casos foram inseridas nas extremidades da linha um vão maior para representar os demais vãos, cujo comprimento foi calculado de forma que as ondas refletidas nas extremidades da linha retornem à última torre modelada num tempo igual ou superior ao tempo de simulação.

2.1 Modelo da Primeira Corrente de Descarga Descendente Negativa

Foram considerados três tipos de formas de onda comumente utilizados na literatura para representar a primeira corrente de descarga descendente negativa (Pico Único, Dupla Exponencial e Berger Aproximado), além das formas de onda reais (Duplo Pico). Para efeito comparativo, foi considerada para cada caso a média das amplitudes máximas obtidas nas medições realizadas nas estações Monte San Salvatore (MSS) e Morro do Cachimbo (MCS).

2.1.1 Duplo Pico

Baseia-se no somatório de sete funções de Heidler, de acordo com as Eqs. (1) e (2), cujos parâmetros que sintetizam as formas de onda medidas nas estações MSS e MCS (Tab. 1), foram propostos em (Conti and Visacro, 2007).

$$i(t) = \sum_{k=1}^m \frac{I_{0k}}{\eta_k} \frac{(t/\tau_{1k})^{n_k}}{1 + (t/\tau_{1k})^{n_k}} e^{(-t/\tau_{2k})} \quad (1)$$

$$\eta_k = \exp \left[- \left(\frac{\tau_{1k}}{\tau_{2k}} \right) \left(\frac{n_k \tau_{2k}}{\tau_{1k}} \right)^{1/n_k} \right] \quad (2)$$

2.1.2 Pico Único

É formada a partir do somatório de duas funções de Heidler, de acordo com as equações (1) e (2). Os parâmetros da forma de onda Pico Único do MSS e MCS (Tab. 2) foram propostos em (Borghetti et al., 2009) e (Silveira et al., 2010), respectivamente.

2.1.3 Dupla Exponencial

A expressão analítica da forma de onda Dupla Exponencial é:

$$i(t) = \eta I_0 (e^{-at} - e^{-bt}) \quad (3)$$

Neste trabalho foi considerado um impulso padronizado $1,2 \times 50 \mu s$, onde os parâmetros η , τ_1 e τ_2 foram extraídos de (Salari, 2006). A Tab. 3 apresenta os parâmetros utilizados para produzir as formas de onda Dupla Exponencial do MSS e MCS.

2.1.4 Berger Aproximado

É uma aproximação da forma de onda obtida nas medições realizadas por Berger *et al.* (Berger et al., 1975) na estação MSS, tendo sido proposto em alguns trabalhos como (Portela, 1999; Salari, 2006; Salari and Portela, 2007). Essa forma de onda é definida pela seguinte função:

$$i(t) = \begin{cases} I_0 \left[\frac{e^{\alpha t/t_f} - 1}{(e^\alpha - 1)} \right] & \text{se } 0 \leq t \leq t_f \\ I_0 & \text{se } t_f < t < t_1 \\ at + b & \text{se } t_1 \leq t \leq t_2 \end{cases} \quad (4)$$

sendo $a = I_0/(t_1 - t_2)$ e $b = -at_2$. A Tab. 4 apresenta os parâmetros utilizados para produzir as formas de onda Berger Aproximado do MSS e MCS. Os parâmetros t_f , α , t_1 e t_2 foram extraídos de (Salari, 2006).

2.1.5 Modelagem da Corrente de Descarga no ATP/EMTP

As fontes de corrente Duplo Pico, Pico Único e Berger Aproximado, foram modeladas utilizando uma fonte de corrente controlada por um componente modelado na linguagem MODELS do ATP/EMTP. No caso da Dupla Exponencial, já existe um modelo dessa fonte de corrente no ATP/EMTP. Nas Figs. 1 e 2 são apresentadas as formas de onda da corrente de descarga obtidas e suas derivadas em relação ao tempo, respectivamente.

2.2 Modelo da Torre de Transmissão

A Fig. 3 mostra as dimensões básicas e o circuito equivalente da torre de transmissão. Cada trecho da torre foi representado como uma linha de parâmetros distribuídos sem perdas, com sua respectiva impedância característica e velocidade de propagação. Fazendo uma aproximação para condutores cilíndricos equivalentes, as impedâncias características podem ser estimadas a partir de formulas empíricas que as relaciona com a altura e o raio dos cilindros (Hara and Yamamoto, 1996; Zanetta Jr, 2003). A velocidade de propagação nas torres foi considerada igual a da luz ($300 \text{ m}/\mu s$) (Hara and Yamamoto, 1996).

2.3 Verificação da Abordagem Proposta

As Figs. 4(a), 4(b) e 4(c) fazem uma comparação dos resultados obtidos a partir da modelagem

Tabela 1: Parâmetros usados para produzir as formas de onda Duplo Pico do MSS e MCS.

Curva k	MSS				MCS			
	I_{0k} (kA)	n_k	τ_{1k} (μ s)	τ_{2k} (μ s)	I_{0k} (kA)	n_k	τ_{1k} (μ s)	τ_{2k} (μ s)
1	3	2	3	76	6	2	3	76
2	4,5	3	3,5	25	5	3	3,5	10
3	3	5	5,2	20	5	5	4,8	30
4	3,8	7	6	60	8	9	6	26
5	13,6	44	6,6	60	16,5	30	7	23,2
6	11	2	100	600	17	2	70	200
7	5,7	15	11,7	48,5	12	14	12	26

Tabela 2: Parâmetros usados para produzir as formas de onda Pico Único do MSS e MCS.

Curva k	MSS (Borghetti et al., 2009)				MCS (Silveira et al., 2010)			
	I_{0k} (kA)	n_k	τ_{1k} (μ s)	τ_{2k} (μ s)	I_{0k} (kA)	n_k	τ_{1k} (μ s)	τ_{2k} (μ s)
1	28	2	1,2	15	25,5	2,1	1,3	25
2	16,8	2	15	1700	19	3,5	2,2	1000

Tabela 3: Parâmetros usados para produzir as formas de onda Dupla Exponencial do MSS e MCS

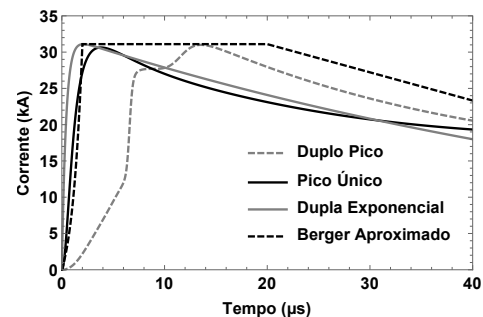
I_0 (kA)	η	a (s^{-1})	b (s^{-1})
31,1	1,03709	14591,40	2469720,2
45,3	1,03709	14591,40	2469720,2

Tabela 4: Parâmetros usados para produzir as formas de onda Berger Aproximado do MSS e MCS.

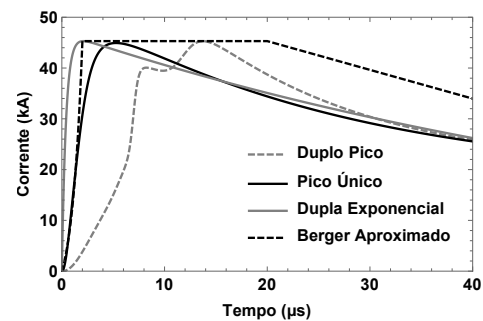
I_0 (kA)	α	t_f (μ s)	t_1 (μ s)	t_2 (μ s)
31,1	2	2	20	100
45,3	2	2	20	100

do sistema de transmissão abordada, com os resultados obtidos em (Tomasevich, 2011). Para efeito de comparação foi utilizada o modelo da corrente de descarga Berger Aproximado com amplitude igual a 30 kA e os demais parâmetros de acordo com a Tab. 4. Para efeito de comparação essas sobretensões são referentes à fase mais alta (fase C).

Ressalta-se que neste trabalho foi empregada uma modelagem das torres diferente de (Tomasevich, 2011), o que justifica as discrepâncias. Nota-se que as diferenças são maiores nas sobretensões desenvolvidas nas cadeias de isoladores (Figs. 4(a) e 4(b), respectivamente). Já no caso da sobretensão desenvolvida entre o cabo pararraios e o cabo de fase no meio do vão (Fig. 4(c)), os resultados são bem próximos. Isso pode ser compreendido, uma vez que a sobretensão acontece no meio do vão e, sendo assim, a influência da torre será menor em função da distancia entre a torre e o meio do vão. As amplitudes máximas das sobretensões têm valor suficientemente próximo e, dessa forma, considera-se que os resultados obtidos são satisfatórios.



(a) MSS



(b) MCS

Figura 1: Formas de onda da corrente de descarga adotadas.

3 Resultados e Discussão

Foram analisadas as sobretensões desenvolvidas nas cadeias de isoladores, entre o cabo pararraios e os cabos de fase no meio do vão e também as sobretensões desenvolvidas no pé-da-torre.

3.1 Sobretensões Desenvolvidas nas Cadeias de Isoladores

A Fig. 5 mostra as sobretensões desenvolvidas na cadeia de isoladores superior, em função

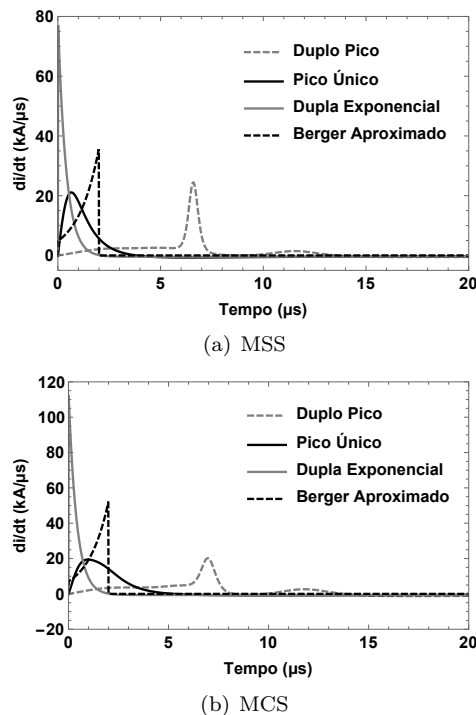


Figura 2: Derivada em relação ao tempo das formas de onda da corrente de descarga.

da incidência da descarga atmosférica na torre. Cada modelo da corrente de descarga desenvolve um perfil de sobretensão diferente. Como a distância dos v os   de 300 m e a velocidade de propagação na linha   próxima a da luz, as reflexões nas torres e aterramentos adjacentes retornam ao ponto de incidência (torre central) após 2 μ s. Esse tempo corresponde a duas vezes o tempo de propagação da onda de uma torre para a outra. Portanto, as atenuações e distorções nas sobretensões acontecem a cada 2 μ s, como verificado nas Figs. 5(a) e 5(b).

As amplitudes máximas das sobretensões associadas às correntes de Pico  nico, Dupla Exponencial e Berger Aproximado foram maiores que aquelas associadas às correntes Duplo Pico. Isso é justificado pelo fato das três correntes possuirem tempos de frente de onda menores. Quanto maior   esse tempo, maior é a atenuação nas amplitudes máximas, em função das reflexões nas torres e aterramentos adjacentes. Nos casos das correntes Dupla Exponencial e Berger Aproximado, essas reflexões chegam à torre central após a passagem da frente da onda, o que faz com que as amplitudes máximas sejam bem maiores. Isso está relacionado ao fato dos tempos de frente de onda dessas duas correntes serem menores do que o tempo de chegada da onda refletida. Portanto as amplitudes máximas não são afetadas por essas reflexões. Além disso, as taxas de crescimento máximas dessas correntes são maiores (Fig. 2). Consequentemente, houve um crescimento rápido das sobretensões.

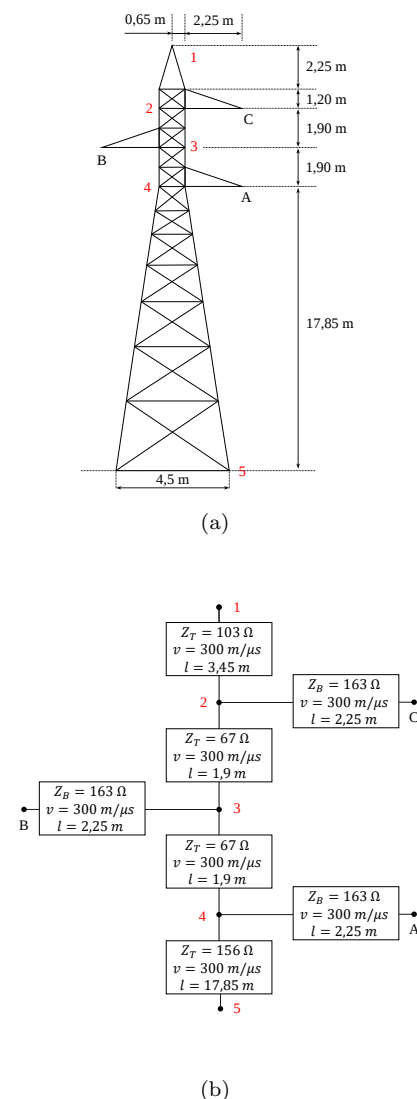


Figura 3: Torre de transmissão: (a) Dimensões básicas; (b) Circuito equivalente

A tendência das ondas refletidas   de reduzir as amplitudes das sobretensões, já que possuem polaridade inversa motivada pelo coeficiente de reflexão negativo (a impedância de aterramento   menor que a impedância característica da torre, neste caso).

A Fig. 6 mostra as sobretensões desenvolvidas na cadeia de isoladores superior, em função da incidência da descarga atmosférica no cabo para-raios no meio do v o. Observa-se que neste caso as sobretensões possuem uma característica oscilatória, que é lentamente amortecida. Essa oscilação depende do comprimento do v o e, conseqüentemente, do tempo de propagação até as torres adjacentes. Como se trata de uma descarga no meio do v o de 300 m, as sobretensões são afetadas pelas reflexões nas torres e aterramentos adjacentes a cada microssegundo. Além disso, as sobretensões começam a evoluir após o instante de 0,5 μ s, que corresponde ao tempo de chegada da frente de onda nas torres.

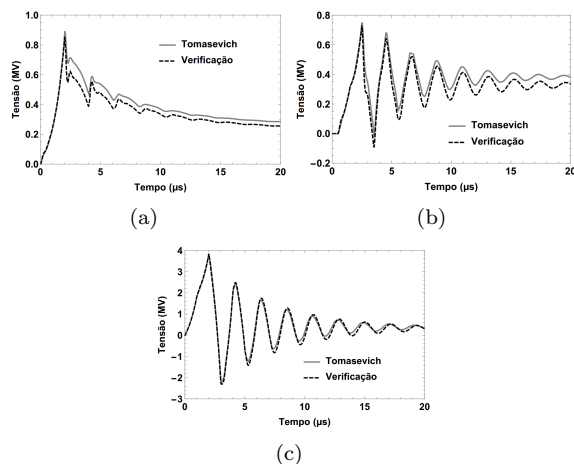


Figura 4: Sobretensões: (a) na cadeia de isoladores superior (incidência na torre); (b) na cadeia de isoladores superior (incidência no cabo pararraios no meio do vão); (c) entre o cabo pararraios e o cabo de fase (incidência no cabo pararraios no meio do vão).

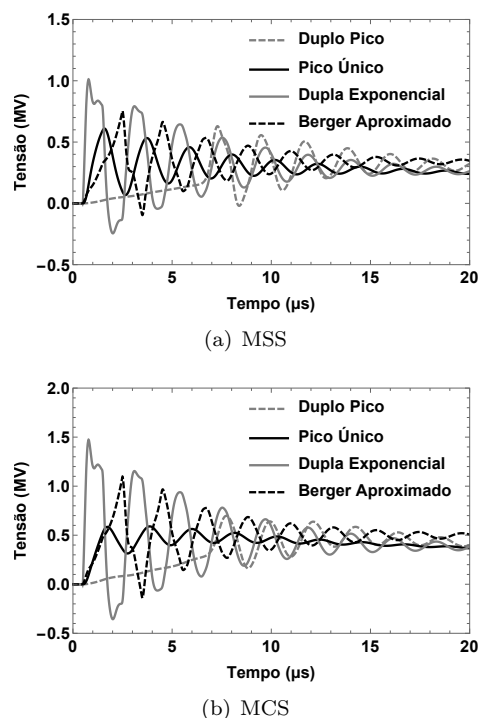


Figura 6: Sobretensões desenvolvidas na cadeia de isoladores superior (incidência no cabo pararraios no meio do vão).

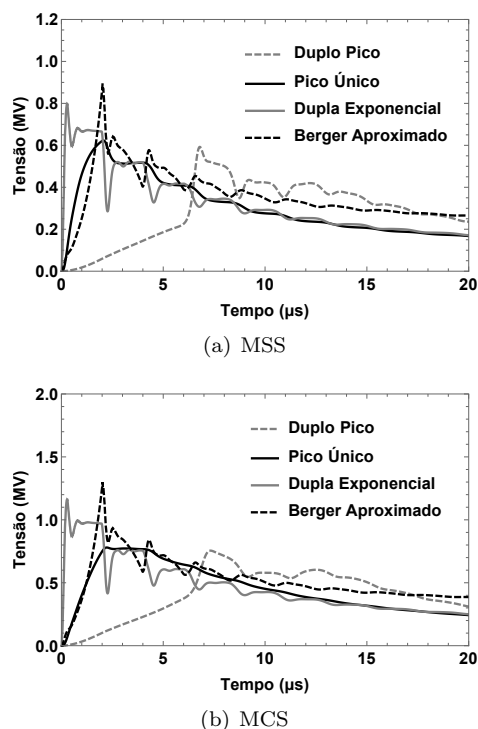


Figura 5: Sobretensões desenvolvidas na cadeia de isoladores superior (incidência na torre).

Neste caso as sobretensões geradas pelas correntes Pico Único atingiram amplitudes máximas menores, quando comparadas com aquelas geradas pelas correntes Duplo Pico. Em relação às sobretensões obtidas com as correntes Dupla Exponencial e Berger Aproximado, mesmo com as atenuações, em função da diminuição do tempo de chegada das ondas refletidas, elas demonstraram amplitudes máximas muito maiores, quando comparadas àquelas geradas pelas correntes Du-

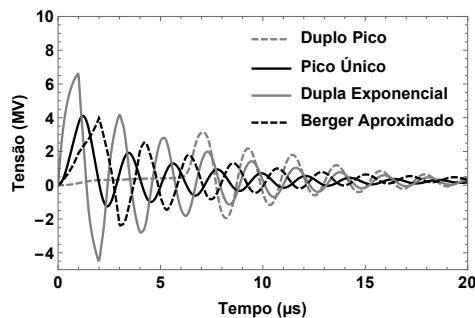
plo Pico. Isso ainda é justificado pelo fato dessas correntes possuírem tempos de frente de onda menores. Portanto, as atenuações nas amplitudes máximas são menores. A taxa de crescimento elevada dessas duas correntes também é responsável pelas elevadas amplitudes.

3.2 Sobretensões Desenvolvidas entre o Cabo Pararraios e os Cabos de Fase no Meio do Vão

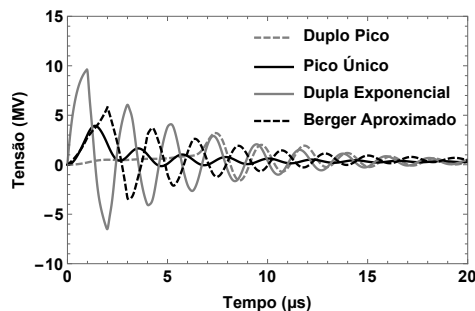
A Fig. 7 mostra as sobretensões desenvolvidas entre o cabo pararraios e o cabo da fase superior, em função da incidência da descarga atmosférica no cabo pararraios no meio do vão.

Neste caso, as sobretensões atingiram amplitudes bem maiores do que aquelas verificadas nas cadeias de isoladores. Isso é justificado pela impedância característica vista do ponto de incidência da descarga (meio do vão), que é maior que nos outros casos. Quanto maior for a distância do ponto de incidência da descarga em relação às torres, maior é a sobretensão vista desse ponto. Neste caso, o efeito das reflexões nas torres e aterramentos adjacentes são sentidas após 1 μ s, que corresponde a duas vezes o tempo de propagação das ondas do meio do vão até as torres adjacentes.

Há discrepâncias bem elevadas entre as amplitudes das sobretensões geradas pelas correntes Pico Único, Dupla Exponencial e Berger Aproximado, com relação àquelas geradas pelas correntes Duplo Pico.



(a) MSS



(b) MCS

Figura 7: Sobretensões desenvolvidas entre o cabo pararraios e o cabo de fase superior (incidência no cabo pararraios no meio do vão).

3.3 Sobretensões Desenvolvidas no Pé-da-torre

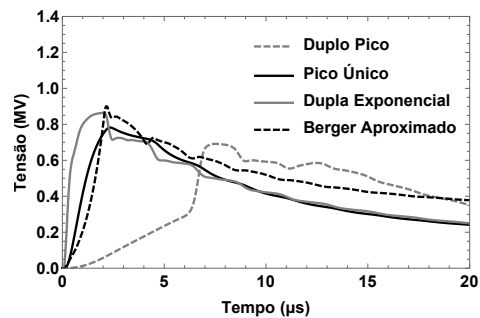
As Figs. 8 e 9 mostram as sobretensões desenvolvidas no pé-da-torre, em função da incidência na torre de transmissão e incidência no cabo pararraios no meio do vão, respectivamente. Observa-se que essas sobretensões apresentam amplitudes máximas elevadas, o que mostra a forte contribuição da resistência de aterramento nas sobretensões desenvolvidas nas cadeias de isoladores.

4 Conclusões

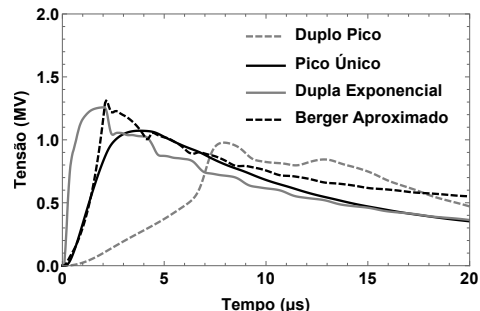
Este trabalho apresentou um estudo de sobretensões em uma linha de transmissão de 138 kV, em função da incidência direta da descarga atmosférica, no qual foram empregados modelos simplificados e realísticos da primeira corrente de descarga descendente negativa.

Os resultados indicam uma superestimação das amplitudes máximas das sobretensões quando se usa as formas de onda Dupla Exponencial e Berger Aproximado. Contudo, o uso da forma de onda Pico Único mostrou tanto superestimação, quando avaliada a sobretensão desenvolvida entre o cabo pararraios e os cabos de fase, quanto subestimação, quando a sobretensão foi avaliada nas cadeias de isoladores, para incidência no meio do vão.

Sobretensões superestimadas fazem com que a linha de transmissão seja projetada com um ní-

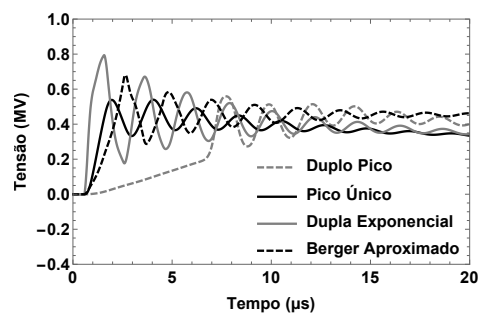


(a) MSS

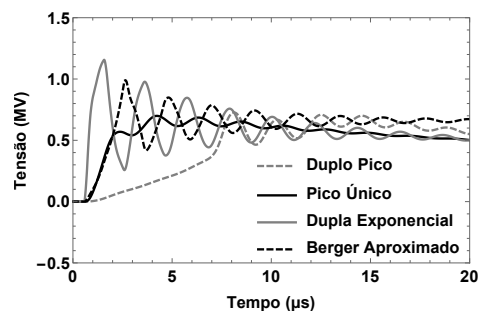


(b) MCS

Figura 8: Sobretensões desenvolvidas no pé-da-torre (incidência na torre).



(a) MSS



(b) MCS

Figura 9: Sobretensões desenvolvidas no pé-da-torre (incidência no cabo pararraios no meio do vão).

vel maior de suportabilidade de isolamento. Entretanto, quanto maior o nível de suportabilidade da linha, maior será o seu custo. Desta forma, do ponto de vista de desempenho, o uso das formas de onda Dupla Exponencial e Berger Apro-

ximado seriam mais adequados, mas do ponto de vista econômico, o uso da forma de onda real (Duplo Pico) seria mais indicado. No caso de valores de sobretensões subestimados, como consequência, a linha será projetada com uma suportabilidade abaixo do necessário, o que aumentaria a probabilidade de ocorrência de ruptura de isolamento, em função da incidência de descargas atmosféricas na linha.

Muito embora o segundo pico seja maior do que o primeiro, verificou-se que em todos os casos de sobretensões analisados, a sua presença não influencia a amplitude máxima das sobretensões. Portanto, a omissão do segundo pico na modelagem da corrente de descarga para este tipo de estudo não traz prejuízos para a avaliação da suportabilidade de isolamento da linha.

Referências

- Anderson, R. B. and Eriksson, A. J. (1980). Lightning parameters for engineering application, *Electra* (69): 65–102.
- Berger, K., Anderson, R. B. and Kroninger, H. (1975). Parameters of lightning flashes, *Electra* (41): 23–37.
- Borghetti, A., Morched, A., Napolitano, F. and *et al* (2009). Lightning-induced overvoltages transferred through distribution power transformers, *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility* **24**(1): 360–372.
- Conti, A. D. and Visacro, S. (2007). Analytical representation of single and double-peaked lightning current waveforms, *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility* **49**(2): 448–451.
- Hara, T. and Yamamoto, O. (1996). Modelling of a transmission tower for lightning-surge analysis, *IEE Proceedings-Gener. Transm. and Distrib.* **143**(3): 283–289.
- Portela, C. (1999). Measurement and modeling of soil electromagnetic behavior, *Proceedings of the IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility* pp. 1004–1009.
- Salari, J. C. (2006). *Efeito das Descargas Atmosféricas no Desempenho de Linhas de Transmissão – Modelagens nos Domínios do Tempo e da Frequência*, Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ.
- Salari, J. C. and Portela, C. (2007). A methodology for electromagnetic transients calculation – an application for the calculation of lightning propagation in transmission lines, *IEEE Transactions on Power Delivery* **22**(1): 527–536.
- Silveira, F. H., Conti, A. D. and Visacro, S. (2009). Effect of a realistic lightning current wave representation for evaluations of over-voltages in electrical systems: Direct strikes and induced voltages, *Proceedings of the X International Symposium on Lightning Protection* pp. 563–568.
- Silveira, F. H., Conti, A. D. and Visacro, S. (2010). Lightning overvoltage due to first strokes considering a realistic current representation, *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility* **52**(4): 929–935.
- Silveira, F. H., Visacro, S. and Conti, A. D. (2013). Lightning performance of 138-kv transmission lines: the relevance of subsequent strokes, *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility* **55**(6): 1195–1200.
- Silveira, F. H., Visacro, S., Souza, R. E. and Conti, A. D. (2012). Assessing the impact of subsequent strokes on the lightning performance of transmission lines of 138 kv, *International Conference on Lightning Protection (ICLP)*, Viena, Austria.
- Tomasevich, M. Y. (2011). *Modelos de Linhas de Transmissão Usando Representação Racional da Matriz de Admitância Nodal e Decomposição Idempotente*, Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ.
- Visacro, S., Schroeder, M. A. O., Soares, A., Cherchiglia, L. C. L. and Sousa, V. J. (2004). Statistical analysis of lightning current parameters: Measurements at morro do cachimbo station, *Journal of Geophysical Research* **109**: 1–11.
- Zanetta Jr, L. C. (2003). *Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Potência*.