



**SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

GSC - 02
16 a 21 Outubro de 2005
Curitiba - Paraná

**GRUPO X
GRUPO DE ESTUDO DE SOBRETENSÕES E COORDENAÇÃO DE ISOLAMENTO - GSC**

**PROPOSIÇÃO DE FÓRMULAS SIMPLIFICADAS PARA O CÁLCULO DA
IMPEDÂNCIA DE SURTO DE TORRES DE TRANSMISSÃO AUTOPORTANTES**

Amilton Soares Jr*

Silvério Visacro

Adelino Pinheiro Silva

**Lightning Research Center – LRC
Universidade Federal de Minas Gerais**

RESUMO

Os autores estão envolvidos em uma investigação acerca da metodologia de cálculo da impedância de surto de torres de transmissão metálicas autoportantes. Tal parâmetro constitui-se em um dos dados de entrada de algoritmos para avaliação de desempenho de linhas frente a descargas atmosféricas. Avaliações anteriores revelaram que expressões tradicionais para cálculo desse parâmetro podem apresentar dificuldades de aplicação prática e proporcionar resultados com desvios acima de 20%. Investigações mais detalhadas, utilizando modelagens mais complexas, permitiram a proposição de novas expressões. Neste trabalho são abordadas torres dos sistemas de 138 kV e de 230 kV, incluindo uma configuração do tipo “raquete”.

PALAVRAS-CHAVE

Modelagem de torres de transmissão, Impedância de surto, Descargas Atmosféricas, Desempenho de linhas de transmissão.

1.0 - INTRODUÇÃO

As torres de transmissão metálicas possuem uma função de grande relevância, em termos elétricos, nos casos de incidência de descargas atmosféricas nos cabos pára-raios. Isso acontece porque tais estruturas, juntamente com o sistema de aterramento, proporcionam o escoamento para a terra da energia associada ao fenômeno. Com isso, há uma redução das tensões no topo da torre e, conseqüentemente, a diminuição da probabilidade de haver disrupção elétrica através do isolamento da linha (backflasover). Segundo um ponto de vista um pouco mais pormenorizado, as torres de transmissão metálicas proporcionam um caminho para o tráfego das ondas viajantes impulsivas de tensão e corrente, associadas à incidência da descarga, de modo que as mesmas sofram reflexão no aterramento e trafeguem de volta para a região do topo da torre. Como usualmente o sistema de aterramento apresenta uma impedância de surto menor que a da torre, a polaridade da onda refletida é invertida em relação à incidente, o que leva à diminuição generalizada dos níveis de tensão no sistema.

Percebe-se na literatura técnica internacional um grande número de trabalhos relativos à modelagem de torres de transmissão frente a descargas (1,2,3,4,5,6,7). Contudo, resultados suficientemente satisfatórios parecem ainda não terem sido alcançados. Isso acontece porque a proposição de modelos refinados para torres de transmissão em regime transitório não é uma tarefa trivial. Este componente do sistema elétrico pode apresentar diferentes configurações, tamanhos, alturas, seções-retas, posicionamento das mísulas e número de circuitos suportados. Além disso, posiciona-se verticalmente em relação ao solo, o que usualmente agrega maior complexidade quando do cálculo dos campos eletromagnéticos associados.

O presente trabalho constitui-se na continuação de estudos anteriores que vem sendo desenvolvidos pelos autores (7), e têm como objetivo apresentar novas expressões analíticas para cálculo da impedância de surto de duas configurações diferentes de torres metálicas de transmissão, pertencentes aos sistemas de 138 e 230 kV. No

*Rua Safira, 223 - Prado - CEP 30.410-100 - Belo Horizonte – MG - BRASIL
Tel.: (031) 3499-4878 - Fax: (031) 3499-5455 - e-mail: soaresjr@cpdee.ufmg.br

primeiro caso (sistema de 138 kV), uma configuração tradicional de torre com condutores fase dispostos em arranjo triangular é abordada. Para o segundo caso considera-se uma torre de configuração mais complexa, do tipo “raquete”, na qual os perfis metálicos da torre envolvem os condutores fase.

A abordagem do comportamento de torres de transmissão através do parâmetro “impedância de surto”, quando da solicitação por fenômenos impulsivos, simplifica o cálculo de transitórios eletromagnéticos em que a torre está envolvida. Contudo, deve-se ter em mente que tal abordagem é uma abstração. A conformação dos campos elétricos e magnéticos gerados quando do fluxo de uma corrente impulsiva pela torre, principalmente devido ao fato desta se constituir em um elemento verticalmente posicionado, teoricamente impede a aplicação desse conceito. Entretanto, devido a tratar-se de um elemento de extensão reduzida (uma onda viajante gasta apenas poucos décimos de microsegundos para atravessá-la), na prática a utilização do conceito da impedância impulsiva se mostra bastante satisfatória. Mesmo abordagens mais avançadas, nas quais o valor da impedância de surto não é considerado constante (mesmo valor ao longo do tempo) e/ou uniforme (mesmo valor ao longo da torre), não parecem proporcionar resultados mais exatos que no caso mais simplificado. Talvez somente para os casos de torres de transmissão extremamente altas a abordagem mais complexa deva ser considerada.

Com isso, a proposta de modelagem de torres de transmissão através de sua impedância de surto “ Z_T ” tem apelo de engenharia, por ser simples e confiável. Resta então encontrar metodologias seguras para a proposição de expressões matemáticas para o cálculo dos valores de impedância de surto a partir dos parâmetros geométricos da torre (tipo, altura, largura etc.). Neste contexto o atual trabalho se insere.

2.0 - REALIZAÇÕES ANTERIORES – ANÁLISE DE EXPRESSÕES TRADICIONAIS PARA CÁLCULO DE Z_T

Em trabalho anterior (6) os autores procederam à avaliação de algumas expressões analíticas tradicionalmente utilizadas para o cálculo da impedância de surto (Z_T) de torres de transmissão. Tal avaliação foi realizada através da comparação dos valores de impedância proporcionados por essas expressões em relação àqueles obtidos pela aplicação de uma modelagem mais complexa, o modelo HEM (Modelo Eletromagnético Híbrido) (8).

As expressões analisadas foram propostas pelas duplas de pesquisadores Sargent e Darveniza (3) e Wagner e Hileman (2, 3). Elas foram derivadas pela aproximação das configurações de torre por figuras geométricas mais simples, para as quais o cálculo da impedância de surto é simplificado. A primeira expressão, mostrada na Equação 1, aproxima a torre por um cone de altura “h” e base de raio “r”. A segunda, mostrada na Equação 2, aproxima a torre por um cilindro de altura “h” e diâmetro da base “2r”.

$$Z_{T1} = 30 \ln \left[\frac{2(h^2 + r^2)}{r^2} \right] \quad \Omega \quad (\text{Sargent e Darveniza}) \quad (1)$$

$$Z_{T2} = 60 \ln \left[\sqrt{2} \frac{2h}{r} \right] - 60 \quad \Omega \quad (\text{Wagner e Hileman}) \quad (2)$$

A aplicação dessas expressões pressupõe a representação da torre por uma linha de transmissão vertical de impedância de surto uniforme e constante. Além disso, por sugestão dos IEEE (10), a velocidade de propagação de surtos ao longo da torre é considerada como sendo 85% da velocidade da luz.

A avaliação das expressões se deu através da aplicação das mesmas em uma torre cuja configuração é mostrada na Figura 1. Esta possui aproximadamente 40 metros de altura, base com 6 metros de largura e suporta um conjunto de cabos aéreos constituídos de um cabo pára-raios e três condutores fase dispostos em configuração triangular. É típica de sistemas de 138 kV.

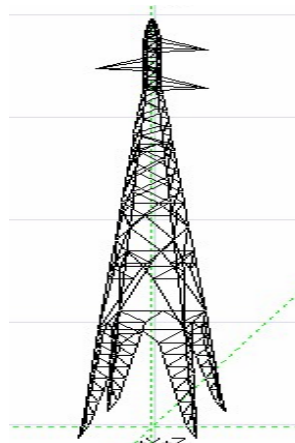


FIGURA 1 – Configuração da torre de transmissão de 138 kV analisada

Além da configuração básica, outras configurações ligeiramente mais altas e mais baixas também foram avaliadas. A Tabela 1 apresenta os resultados obtidos para a impedância impulsiva das configurações segundo a aplicação das expressões matemáticas em questão e o modelo HEM. Este último é considerado como referência, sendo utilizado, dessa forma, para avaliar os outros resultados.

TABELA 1 – Valores para a impedância de surto das configurações de torre

Altura da torre [m]	Z_T calculado pelo HEM [Ω]	(Z_T calculado pela aproximação cônica) [Ω]	Z_T calculado pela aproximação cilíndrica [Ω]
33.22	201.3	176.7	158.1
36.50	202.2	176.3	157.7
39.78	202.8	176.0	157.5
43.06	203.3	175.8	157.2
46.34	203.9	175.6	157.0

Tomando como referência a impedância calculada pelo modelo HEM, pode ser observado que, de uma maneira geral, os melhores resultados são obtidos pela modelagem da torre como um cone, que corresponde à Equação 1. Neste caso os erros apresentam um valor médio de aproximadamente 13%. Para a representação cilíndrica os desvios podem chegar a 22%.

Esses resultados mostram a necessidade de promover desenvolvimentos adicionais para proposição de novas expressões analíticas para cálculo de Z_T , as quais possibilitem resultados mais exatos. Tais desenvolvimentos e os resultados associados são apresentados nas próximas seções.

3.0 - DESENVOLVIMENTOS

As análises apresentadas na seção anterior motivaram os autores a buscar novas expressões analíticas para cálculo da impedância de surto de torres metálicas de transmissão.

A metodologia para proposição das novas expressões se deu da maneira descrita a seguir. Primeiramente utilizou-se o modelo HEM para calcular o valor de pico da tensão resultante no topo das configurações de torre sob análise, devido à incidência de descargas neste mesmo local. Nessas simulações foi sempre considerada a presença de cabos pára-raios e os valores para a impedância de aterramento foram variados dentro de uma faixa pré-estabelecida. Uma grande gama de resultados foi gerado devido ao elevado número de simulações. Em seguida, o pacote computacional EMTP foi aplicado de forma a refazer todas as simulações, exatamente com os mesmos parâmetros das anteriores, mas agora substituindo a configuração da torre por uma linha de transmissão vertical com impedância de surto constante e uniforme. O valor dessa impedância foi variado, para cada caso simulado, até que os mesmos valores de tensão para o topo da torre fossem encontrados, em comparação àqueles referentes à utilização do HEM. Esse procedimento permitiu obter valores realmente representativos para a impedância de surto das torres, pois eram capazes de determinar os mesmo valores de sobretensão no sistema que aqueles calculados pelo modelo mais complexo. Uma vez que a sobretensão resultante é o parâmetro de interesse por possibilitar estimar a probabilidade de interrupção no isolamento da linha, considera-se que os valores encontrados para as impedâncias de surto são bastante significativos.

A etapa final constituiu-se na proposição de expressões analíticas para o cálculo das impedâncias de surto das torres. Isso foi feito através do ajuste de curvas aos valores encontrados, em função dos parâmetros geométricos da torre considerados de interesse.

A metodologia apresentada foi implementada para duas diferentes configurações de torres de transmissão, conforme apresentados nas seções 4.0 e 5.0.

4.0 - RESULTADOS PARA A TORRE DE 138 KV

4.1 Introdução

A configuração básica da torre de 138 kV investigada é a mesma que aquela mostrada na Figura 1. Suas dimensões são mostradas Figura 2.

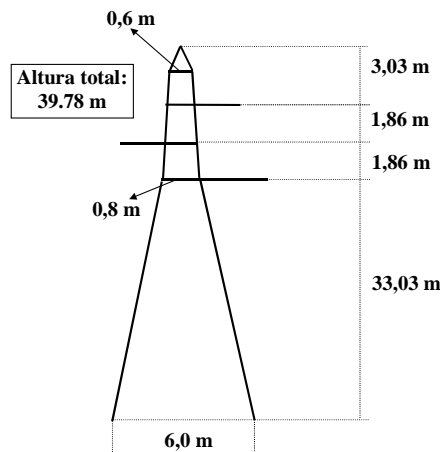


FIGURA 2 – Dimensões da torre de 138 kV analisada

4.2 Avaliações iniciais

As primeiras análises com essa configuração abordaram o valor da impedância de surto em função da altura da torre, para o caso em que as dimensões “altura” e “base” mantêm uma relação constante. Tal consideração foi motivada pelo fato de que, ao longo da extensão de uma linha de transmissão, imposições relativas ao perfil do terreno determinam a utilização de torres de diferentes alturas, sendo que usualmente torres mais altas demandam bases proporcionalmente mais largas e vice-versa.

Na verdade, uma vez que as dimensões dos elementos metálicos da torre situados acima da “cintura” (na região onde estão as mísulas) devem ser preservadas devido a restrições associadas à coordenação de isolamento, a análise realizada manteve constante a relação entre a altura da torre até a sua cintura (33,03 m) a sua base (6,0 m). Com isso, obteve-se a relação $6,0 \text{ m} / 33,03 \text{ m} = 0,1817$.

Seguindo essa relação, torres de diferentes alturas foram analisadas. As considerações em termos de parâmetros de simulação e demais componentes envolvidos (cabos pára-raios e aterramentos) foram semelhantes ao da seção anterior. Contudo, desta feita um valor único de 10Ω para impedância de aterramento e de $2 \mu\text{s}$ para o tempo de frente da onda de corrente de descarga foram utilizados.

A aplicação do modelo HEM proporcionou o cálculo das tensões resultantes no topo da torre, para os casos estudados. Simulações no EMTP proporcionaram os valores para as impedâncias de surto equivalentes para as torres. A Tabela 2 apresenta os resultados.

TABELA 2 – Impedâncias de surto equivalentes – torre de 138 kV – relação constante “base x altura”

Altura total da torre h [m]	Altura da cintura da torre hc [m]	Largura da base da torre b [m]	Impedância de surto equivalente para a torre Z_T [Ω]
21,75	15,0	2,73	196,9
26,75	20,0	3,63	199,3
31,75	25,0	4,54	201,1
36,75	30,0	5,45	202,2
41,75	35,0	6,35	203,3
46,75	40,0	7,26	204,2
51,75	45,0	8,17	205,1

Com esses dados foi possível, por análise de regressão linear, alcançar uma relação entre a altura total da torre “h” e a sua impedância de surto equivalente Z_T , a qual é apresentada na Equação 3.

$$Z_T = 0,26 * h + 192,0 \quad (3)$$

Conforme esclarecido anteriormente, tal expressão foi obtida através de uma análise dos valores de sobretensão resultantes no topo da torre. Contudo, é sabido que, para o cálculo do desempenho de linhas frente a descargas, os valores de sobretensão que mais importam são aqueles determinados nas mísulas (braços) da torre. Tal fato motivou um questionamento sobre a capacidade da expressão analítica obtida de proporcionar cálculos corretos de sobretensão nesses pontos de interesse. Procedeu-se, então, a uma nova simulação na qual os valores para as tensões para esses pontos foram comparados quando da utilização do modelo HEM e da expressão analítica em prova. A Figura 3 apresenta os resultados. São mostradas as curvas de tensão resultantes no topo da torre e nas mísulas superior, intermediária e inferior, para uma torre de 41,75 m de altura. A impedância de surto utilizada foi calculada pela Equação 3 como $Z_T = 0,26 * 41,75 + 192,0 = 203 \Omega$.

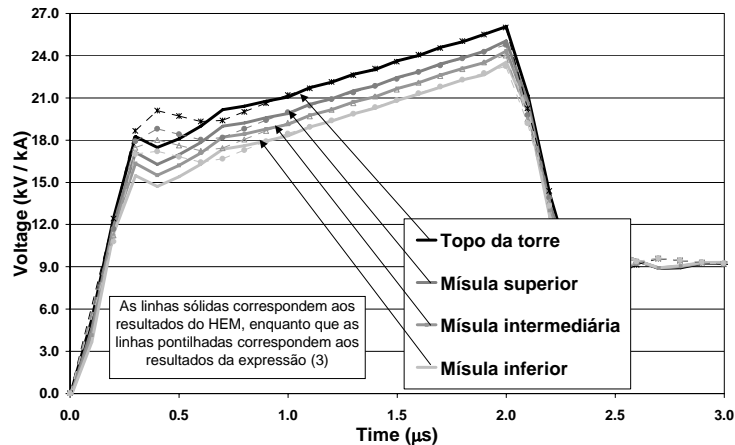


FIGURA 3 – Tensões em diversos pontos da torre

Observa-se que um alto grau de concordância foi obtido nos resultados. Isso significa que a expressão analítica proposta é adequada para utilização em algoritmos para cálculo de desempenho de linhas frente a descargas atmosféricas.

4.3 Obtenção de expressões analíticas para o caso geral

Na busca de uma expressão mais geral para a impedância de surto de configurações de torres de transmissão derivadas daquela mostrada nas Figuras 1 e 2, novas análises foram realizadas. O objetivo constituiu-se em não mais observar a limitação imposta anteriormente na qual manteve-se uma relação constante entre a altura da torre e a largura de sua base. Desta vez diversos valores para esses parâmetros foram considerados. A metodologia para determinação da expressão analítica para a impedância de surto da torre foi similar à anteriormente citada. A expressão obtida é mostrada na Equação 4.

$$Z_T = \left(\frac{h}{b + 4,0} \right) * 8,0 + 171,0 \quad (4)$$

Nessa expressão, “h” é a altura total da torre e “b” é a largura da sua base (em metros). Na investigação, esses valores variaram de 2,0 a 9,0 metros (com passo de 1 metro) para a base e 21,75 a 51,75 metros (com passo de 5 m) para a altura. A Tabela 3 apresenta os erros percentuais para os valores de impedância de surto das torres calculados pela Equação 4 em comparação com os resultados obtidos pela aplicação do modelo HEM (considerado como referência).

TABELA 3 – Erros percentuais para os valores de a impedância de surto [%]

		Largura da base da torre (m)							
		2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0
Altura total da torre (m)	21.75	1.09	0.28	1.31	2.10	3.01	3.67	4.32	4.82
	26.75	1.87	0.69	0.17	0.86	1.64	2.27	2.87	3.47
	31.75	1.96	1.00	0.43	0.19	0.70	0.90	1.83	2.21
	36.75	1.45	0.98	0.55	0.22	0.15	0.64	0.98	1.51
	41.75	0.67	0.62	0.43	0.37	0.09	0.30	0.57	0.95
	46.75	0.03	0.19	0.23	0.21	0.01	0.17	0.27	0.46
	51.75	0.82	0.30	0.00	0.10	0.24	0.12	0.02	0.08

As células marcadas correspondem àquelas combinações de parâmetros que são mais prováveis de ocorrer. Observa-se que erros significativamente reduzidos são obtidos para essa região de interesse (menores que 1%). Erros maiores que 3% são obtidos para combinações de valores para os parâmetros os quais são improváveis de ocorrer (valores extremos).

Percebe-se, desta forma, que a expressão analítica proposta apresenta grande facilidade de aplicação mas, ao mesmo tempo, é capaz de proporcionar valores de impedância de surto para as configurações de torres consideradas (e conseqüentemente valores de tensão no topo da torre e nas mísulas) com alto grau de concordância quando em comparação com modelagens mais apuradas. Essas características são de fundamental importância dentro da engenharia.

5.0 - RESULTADOS PARA A TORRE DE 230 KV TIPO “RAQUETE”

A continuação dos trabalhos constou da análise de uma torre do tipo “raquete” utilizada em sistemas de 230 kV. Essa configuração de torre tem um interesse especial pelo fato de serem raros os trabalhos que abordam aspectos relativos ao seu comportamento frente a fenômenos impulsivos. A Figura 4 - (a) apresenta uma visão em perspectiva da torre, enquanto que a Figura 4 - (b) apresenta suas principais dimensões.

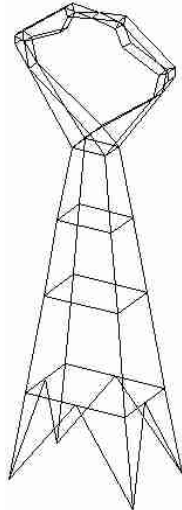


FIGURA 4 - (a) – Configuração da torre de 230 kV tipo “raquete” analisada

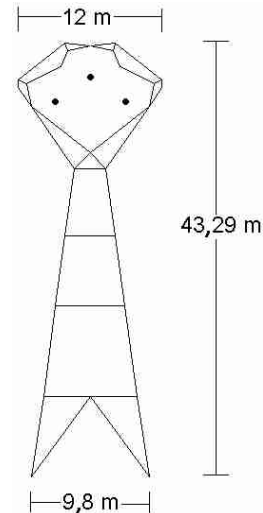


FIGURA 4 - (b) – Dimensões da torre de 230 kV tipo “raquete” analisada

Os desenvolvimentos se deram de acordo com aqueles realizados para a torre de 138 kV. Primeiramente utilizou-se o modelo HEM para gerar as curvas de sobretensão resultantes no topo da torre, devido à incidência de uma descarga atmosférica nesse mesmo local. Em seguida, utilizou-se o pacote computacional EMTP para determinação dos valores equivalentes para as impedâncias de surto Z_T da torre. Estruturas com três diferentes alturas foram analisadas. O caso base corresponde àquele mostrado na Figura 4 - (b), o qual apresenta uma altura de 43,29 metros. Os dois casos adicionais correspondem a estruturas com alturas aproximadamente 10% superior e inferior ao caso base. Uma relação constante entre a altura da cintura da torre e a largura da base foi mantida, de forma semelhante ao mostrado na seção 4.2.

A Tabela 4 apresenta os resultados obtidos.

TABELA 4 – Impedâncias de surto equivalentes – torre de 230 kV tipo “raquete”

Altura total da torre h [m]	Impedância de surto equivalente para a torre Z_T [Ω]
39,29	186,5
43,29	190,6
47,29	192,1

Com os dados dessa tabela foi possível proceder a uma análise de regressão linear e alcançar uma relação entre a altura total da torre “h” e a sua impedância de surto equivalente “ Z_T ”, a qual é apresentada na Equação 5.

$$Z_T = 0,7 * h + 159,4 \quad (5)$$

Análises adicionais devem ser realizadas com relação a essa configuração de torre, de forma a refinar a expressão obtida. O objetivo é considerar nas análises uma maior variação de altura da configuração e investigar relações não constantes entre as dimensões “base” e “altura” da estrutura.

6.0 - CONCLUSÕES

Este trabalho foi dedicado à exploração de aspectos relacionados à modelagem de torres de transmissão. As torres analisadas foram referentes a configurações utilizadas em sistemas de 138 e 230 kV, incluindo uma

configuração tipo “raquete”.

A metodologia básica empregada no trabalho foi a de utilizar o modelo HEM (Modelo Eletromagnético Híbrido), anteriormente elaborado pelos autores, para calcular as sobretensões resultantes nas configurações de torres em análise, devido à incidência de descargas, e, em seguida, utilizar os dados gerados para avaliar alguns modelos de torres existentes e propor novas expressões matemáticas para o cálculo da impedância de surto das torres.

Através da aplicação do procedimento descrito, foi possível analisar criticamente os resultados da aplicação de expressões tradicionais, encontradas na literatura técnica internacional, para cálculo de impedância impulsiva de torres. Desvios de até 22 % foram encontrados.

A busca por novas expressões para cálculo desse parâmetro resultou na proposição de três novas fórmulas: duas para uma configuração de torre utilizada de sistemas de 138 kV e outra para uma configuração tipo “raquete” do sistema de 230 kV. Tais expressões analíticas foram capazes de proporcionar resultados com um alto grau de concordância em relação àqueles obtidos pela aplicação de HEM, mas ao mesmo tempo mantiveram a simplicidade necessária para aplicações práticas em engenharia.

A continuidade desse trabalho inclui a análise de configurações adicionais de torres, incluindo aquelas de circuitos duplos e os casos de estruturas estaiadas.

7.0 - AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer à CEMIG e à ELETRONORTE pela cooperação no trabalho através da disponibilização dos dados referentes às configurações das torres investigadas.

8.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) JORDAN, C.A. Lightning computation for transmission lines with overhead ground wires – Part II. Gen. Elec. Rev., vol. 37, pp. 180-185, 1934.
- (2) WAGNER, C.F, HILEMAN, A.R. A new approach to the calculation of the lightning performance of transmission lines III – a simplified method: stroke to the tower. AIEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. 79, pp. 589-603, Outubro 1960.
- (3) SARGENT, M.A, DARVENIZA, M. Tower Surge Impedance. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-88, n. 5, pp. 193-204, Maio 1969.
- (4) CHISHOLM, W.A, CHOW, Y.L; SRIVASTAVA, K.D. Lightning surge response of transmission towers. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-102, n. 9, pp. 3232-3242, Setembro 1983.
- (5) CHISHOLM, W.A, CHOW, Y.L; SRIVASTAVA, K.D. Travel time of transmission towers. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-104, n. 10, pp. 2222-2928, Outubro 1985.
- (6) SOARES JR, A, VISACRO, S. Análise de Modelos para Torres de Transmissão. Anais do X ERLAC – Encuentro Regional Latinoamericano de la CIGRÉ, Puerto Iguazú, Maio 2003.
- (7) SOARES JR., A, SCHROEDER, M.A.O; VISACRO, S. Application of an Electromagnetic Model for Calculation of Transient Voltages in Transmission Towers. Anais do 26th International Conference on Lightning Protection, Cracóvia, Setembro. 2002.
- (8) VISACRO, S, SOARES JR, A; SCHROEDER, M.A.O. An Interactive Computational Code for Simulation of Transient Behavior of Electric System Components for Lightning Currents. Anais do 26th International Conference on Lightning Protection, Cracóvia, Setembro 2002.
- (9) SOARES JR, A, SCHROEDER, M.A.O., VISACRO, S. Calculation of transient voltages in transmission lines caused by lightning – combined modeling for tower, grounding and aerial cables. Anais do IEEE/PES T&D 2002 Latin America, São Paulo, Março 2002.
- (10) IEEE WORKING GROUP ON ESTIMATING THE LIGHTNING PERFORMANCE OF TRANSMISSION LINES. IEEE Working Group Report - Estimating Lightning Performance of Transmission Lines II - Updates to Analytical Models. IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 8, n. 3, Julho 1993.
- (11) DOMMEL, H.W. EMTP Theory Book - Second Edition. Microtran Power Systems Analysis Corporation, Abril 1996.