

Um tutorial sobre modelos de torres de linhas de transmissão utilizados nas análises de *backflashovers*

A. R. J. Araujo, S. Kurokawa

Resumo--As descargas atmosféricas incidentes em linhas de transmissão são uma das principais causas dos desligamentos repentinos no sistema de energia. Quando uma descarga atmosférica atinge o cabo para-raios ou diretamente a torre, pode ocorrer um *flashover*. Esse fenômeno consiste em um arco elétrico sobre a cadeia de isoladores aos condutores de fase da linha, provocando sobretensões nas fases atingidas, e certamente a interrupção da transmissão de energia. Todo esse processo é denominado de *backflashover*. Nesse contexto, um parâmetro denominado de impedância de surto da torre desempenha um papel fundamental para a previsão e estimação dos *backflashovers*. Diversos autores propuseram modelos que representam a torre de transmissão a fim de estimar sua impedância de surto e mensurar as sobretensões causadas por essas descargas. Neste artigo, um breve levantamento histórico sobre a modelagem de torres de transmissão propostos, uma descrição do fenômeno *backflashover* e os modelos mais usuais para representação de torres são apresentados.

Palavras-chaves--*backflashover, modelos de torres, torres de transmissão, sobretensão.*

I. INTRODUÇÃO

As descargas atmosféricas são uma das principais fontes de distúrbios causados 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 nas linhas de transmissão, cadeias de isoladores, problemas de estabilidade e blackouts [1]. Nesse intuito, a análise de descargas atmosféricas sobre torres das linhas de transmissão desempenham um papel fundamental na sua proteção. 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 atinge 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 *flashover*. Todo esse processo recebe o nome 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 esse fenômeno [2]. Esses incidentes ocorrem principalmente em regiões com alta incidência de descargas atmosféricas, que possuem solos de alta resistividade e o relevo é elevado [2]. Para reduzir a ocorrência de *backflashovers*, é necessário dimensionar corretamente a estrutura da torre, instalação de cabos-guarda e a impedância de aterramento da torre de transmissão. As sobretensões dependem basicamente da impedância de surto da torre que está diretamente ligada com a geometria da estrutura da torre e também da forma da corrente injetada na torre [3]-[5]. A impedância de surto da torre pode ser obtida por medições na torre de transmissão de tamanho real ou em modelos de escala reduzida, por meio de expressões matemáticas desenvolvidas com base na geometria da torre e por métodos baseados na teoria de campo eletromagnético [4], [6], [7]. Diversos autores realizaram medições da impedância de surto e da velocidade de propagação diretamente nas torres ou em modelos em escala reduzidas [1], [5], [8]. Nesses experimentos, são utilizados geradores de pulso para injetar correntes no topo da torre de transmissão em tamanho real ou em modelos de escala reduzida [1],[4],[9]. Esse método de obtenção da impedância de surto é eficiente, porém é caro e de difícil implementação, sendo realizado apenas em poucos laboratórios de alta tensão.

A impedância de surto da torre pode ser obtida a partir de sua geometria. Nesse caso a torre é aproximada por uma combinação de estruturas de geometria simplificadas tais como cones e cilindros, ou por troncos desses sólidos, permitindo a obtenção de fórmulas aproximadas para a impedância. Esse método exige o desenvolvimento de fórmulas específicas para cada formato de torre [3],[7],[9] e mostrar-se impreciso para uma torre de formato diferente do formato para o qual a fórmula foi desenvolvida. Outra limitação seria que tais fórmulas não consideram os braços, as barras diagonais (treliças) e a impedância de aterramento da torre de transmissão. O comportamento elétrico de uma torre de transmissão frente a uma descarga atmosférica depende de diversos fatores, tais como: a geometria da torre, impedância de surto da torre, impedância de aterramento e a forma e a direção de onda da corrente injetada na torre [5], [11], [12]. Nesse contexto, a impedância de surto desempenha um papel

Esta pesquisa é fomentada em partes pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), Projeto de doutorado 2014/18551-6 e pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

A. R. J. Araujo é vinculado a UNESP - Univ. Estadual Paulista, Ilha Solteira, Brasil (e-mail: anderjusto@yahoo.com.br).

S. Kurokawa é vinculado a UNESP - Univ. Estadual Paulista, Ilha Solteira, Brasil (e-mail:kurokawa@dee.feis.unesp.br).

fundamental na determinação do potencial elétrico na torre, especialmente quando há possibilidade de ocorrer *flashovers* sobre as cadeias de isoladores. Nesse contexto diversos modelos de torres de transmissão têm sido propostos por os pesquisadores, assim como para mitigar os fatores que influenciam no cálculo da impedância de surto da torre e a determinação das sobretensões causadas no sistema.

Os modelos de torres de transmissão são muito úteis na previsão e avaliação dos níveis de sobretensões resultantes da incidência de descargas atmosféricas em torres de linhas de transmissão. O conhecimento destes níveis de sobretensões permite que a especificação da cadeia de isoladores seja feita de maneira mais confiável, reduzindo-se então a possibilidade de desligamentos da linha de transmissão devido à ocorrência de *flashovers* e aumentando a confiabilidade do sistema de transmissão de energia elétrica.

Os objetivos deste trabalho consistem num levantamento histórico dos modelos de torres de transmissão, uma descrição do fenômeno *backflashover* e apresentação de alguns modelos que são propostos para representação das torres de transmissão.

II. LEVANTAMENTO HISTÓRICO DOS MODELOS DE TORRES DE TRANSMISSÃO

A impedância de surto da torre é um importante parâmetro utilizado para os estudos das descargas atmosféricas que atingem à torre e também para a coordenação de isolamento na linha de transmissão.

Quando a descarga atmosférica atinge uma torre de transmissão, ondas viajantes de corrente percorrem repetidamente a estrutura da torre. Essas ondas são refletidas pela impedância de aterramento da torre e pelo topo da torre, elevando o potencial elétrico ao longo de seu comprimento e nos braços das torres, estressando eletricamente a cadeia de isoladores. O *flashover* consiste em uma disrupção no isolamento elétrico de uma linha de transmissão devido à incidência direta da descarga atmosférica na torre ou nos cabos guarda da linha de transmissão, devido à ausência de cabos-guarda ou falhas em sua blindagem. Assim a cadeia de isoladores é submetida a uma onda de tensão cuja amplitude na maioria das vezes provoca falha no isolamento e estabelece um curto-circuito entre a fase e o terra, na forma de um arco elétrico, que acompanha a onda de corrente e causa sobretensões na linha de transmissão [11],[14].

Nas linhas de transmissão quando projetadas para um dado sistema elétrico, é necessário estimar a impedância de surto da torre a fim de prever e mensurar as sobretensões provocadas no topo da torre quando atingida por uma descarga atmosférica, conduzindo elevadas correntes ao longo de sua estrutura. Diversos estudos têm sido realizados para avaliar as sobretensões causadas pelas descargas atmosféricas e estimar a impedância de surto da torre [9]-[12]. Assim alguns modelos para as torres de transmissão foram desenvolvidos no domínio da frequência ou diretamente no domínio do tempo desde a década de 1960, sendo empregados em programas como ATP, EMTP ou PSCAD.

A primeira formulação teórica para a impedância de surto da torre de transmissão foi proposta por [15]. Nessa formulação, assume-se que toda a corrente é uniformemente distribuída pela estrutura da torre, desde sua base ao topo. A estrutura da torre é aproximada por um cilindro vertical com altura equivalente a da torre e o raio é igual ao raio médio equivalente da torre. A velocidade de propagação ao longo da torre é adotada como a velocidade da luz. Diversas formulações teóricas para o cálculo da impedância de surto usando a teoria de campo eletromagnético e geometria de sólidos simples foram propostas por [16]-[19]. Nesses artigos é levando em consideração o efeito do vetor potencial magnético gerado devido à injeção de corrente no topo da torre e a velocidade de propagação das ondas ao longo da torre é considerada a velocidade da luz.

O modelo a geometria simples consiste na representação da torre de transmissão por sólidos simples, tais como cilindros, cones ou por troncos desses sólidos [18]-[20]. Uma vez a estrutura da torre é aproximada por sólidos simples, são aplicadas as equações do eletromagnetismo para calcular a impedância de surto da torre e a tensão no topo da torre. Embora as fórmulas para o cálculo da impedância de surto da torre sejam atrativas e simples, o problema consiste em como representar adequadamente a estrutura da torre de transmissão por cilindros e cones. Assim a geometria da torre é aproximada às vezes de modo muito superficial e partes como os braços da torre são desconsiderados, levando a erros elevados no computo da impedância de surto.

Métodos baseados em medições em torres de transmissão em tamanho real e em escala reduzida são também frequentemente empregados. Os modelos em escala reduzida são mais econômicos do que os modelos em torres do tamanho real, além de serem mais flexíveis e de fácil implementação [9]. Os modelos de escala reduzida foram usados por [3] e [21]. A velocidade de propagação medida na torre é igual à velocidade da luz [3]. As simulações conduzidas em estruturas de escala reduzida são dificilmente empregadas para cálculos práticos em linhas de transmissão, mas essa aproximação é útil para compreender o comportamento das descargas e os efeitos eletromagnéticos no regime transitório de um sistema tridimensional atingido pela descarga atmosférica. Outro fator importante seria a precisão na medição, especialmente quando se utiliza o método de medição direto, sendo que o tamanho e a geometria dos equipamentos de medição são relativamente grandes quando comparados com a estrutura da torre em escala reduzida [22].

As medições em torres em escala real foram realizadas por [5] e [12] usando método direto. Essas medições foram realizadas por cabos, sustentados por balões, posicionados de modo inclinado ou horizontalmente, e que injetavam uma corrente impulsiva no topo da torre. As correntes que percorrem a estrutura da torre são medidas com auxílio de cabos coaxiais e transformadores de corrente instalados ao longo de sua estrutura. Diversos estudos foram conduzidos no Japão e os resultados medidos se tornaram uma base para simulações computacionais em programas de análises de transitórios [13]. Medições feitas com descargas elétricas reais

ou induzidas por foguetes em torres de linhas de transmissão foram realizadas por [23]-[25]. Todos eles estimaram a impedância de surto da torre baseados nessas medições e propuseram um modelo de torre disponível no EMTP. Os resultados mostraram que a impedância de surto e as sobretensões de surto dependem da direção que descarga atmosférica atinge a torre de transmissão. Os autores também obtiveram êxito nas medições simultâneas de correntes em várias partes da torre de transmissão em teste, assim como as tensões sobre as cadeias de isoladores [23]-[25].

Métodos de análises numéricas também têm sido aplicados para o cálculo da impedância de surto de torres [26], no qual métodos dos elementos finitos são usados nas simulações com EMTP. Em [5] os autores analisaram uma torre de transmissão em escala usando o método dos momentos para resolver diretamente as equações de campo elétrico, incluindo as barras horizontais e inclinadas das torres e os braços de torre. Usando o mesmo método, os autores investigaram os surtos devido às descargas atmosféricas levando em consideração a torre, a linha de transmissão e os cabos-guarda. Em [27], apresenta-se simulações numéricas usando o método das diferenças finitas no domínio do tempo para obter a resposta a um degrau de tensão em uma torre de transmissão de 500 kV, levando em consideração a resistividade do solo e detalhes da estrutura da torre.

A seguir serão apresentados os diversos modelos para as torres de transmissão em sistemas de potência propostos pelos pesquisadores.

III. MODELOS DE TORRES DE TRANSMISSÃO

No desenvolvimento dos modelos das torres de linhas de transmissão diversos autores propuseram modelos que podem ser classificados como os seguintes:

- i. Modelos aproximados por geometria simples;
- ii. Modelos compostos por linhas sem perdas;
- iii. Modelos de torres "multi-andares";
- iv. Modelos de torres dependentes da frequência.

Os modelos são descritos a seguir.

A. Modelos aproximados por geometria simples

Os primeiros modelos de torres de transmissão foram desenvolvidos utilizando a teoria de campo eletromagnético, representando a torre por meio de formas geométricas simples, tais como cilindros, cones ou troncos desses sólidos, e injeta-se uma corrente vertical ou horizontalmente no topo da torre. Em [17] usa-se um modelo cilíndrico e a fórmula obtida para a impedância de surto da torre varia quando as ondas viajantes percorrem a torre em direção ao solo. Em [18], os autores representaram a torre por um cone e sugerem uma alteração no modelo cilíndrico. Em [3] é proposta uma equação modificada para os modelos cilíndricos e cônicos, e recomenda-se um modelo para torres de transmissão estreita, sendo esse modelo também recomendado por CIGRE. Embora a velocidade de propagação ao longo da torre possa ser estabelecida como a velocidade da luz, os múltiplos caminhos da estrutura de

treliças e os braços de torre inserem atrasos; assim o tempo para ondas de tensão e corrente refletirem do solo ao topo da torre é maior do que o tempo de viagem esperado. Em [3],[17] e [18] apresentam equações para o cálculo da impedância de surto da torre, considerando suas aproximações geométricas e a orientação da injeção de corrente no topo da torre. A Fig. 1 mostra a silhueta de uma torre de transmissão de alta tensão e as aproximações por geometria simples.

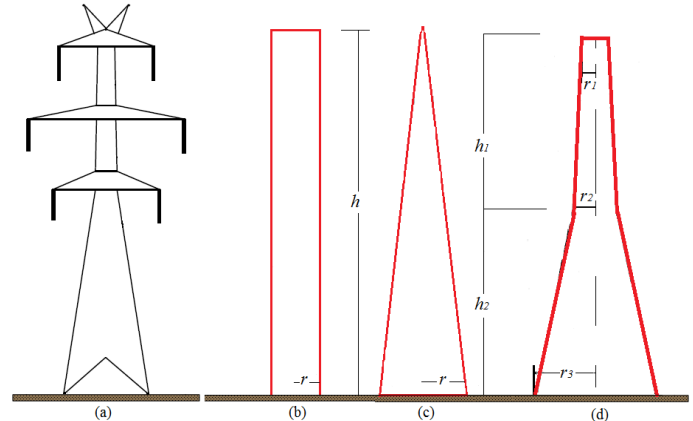


Fig. 1. (a) Silhueta de uma torre de alta tensão; Aproximações (b) cilíndrica, (c) cônica e (d) por troncos de cone.

Na Fig. 1-(a) mostra a silhueta típica de uma torre de transmissão enquanto que Figs 1-(b), (c) e (d) mostram as aproximações cilíndrica, cônica e por partes de cone que são propostas por [3], [17] e [18]. As fórmulas propostas para o cálculo da impedância de surto das torres são apresentadas na tabela 1. Na tabela 1, “Ref” significa o artigo de referencia na qual a fórmula é proposta.

Tabela 1. Impedância de surto da torre para o modelo aproximado por geometria simples

Ref.	Aprox.	Impedância de surto da torre
[3]	Cônica	$Z_T = 60 \ln \left(\cot \left(\frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{r}{h} \right) \right) \right)$
[3]	Cilíndrica	$Z_T = 60 \ln \left(\cot \left(\frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{r}{h} \right) \right) \right) - 60$
[3]	Tronco de sólidos	$Z_T = 60 \ln \left(\cot \left(\frac{1}{2} \tan^{-1} T \right) \right)$
[17]	Cilíndrica	$Z_T = 60 \left[\ln \left(\frac{2\sqrt{2}h}{r_2} \right) - 2 \right]$
[18]	Cilíndrica	$Z_T = 60 \left[\ln \left(\sqrt{2} \frac{2h}{r_3} \right) - 1 \right]$
[18]	Cônica	$Z_T = 60 \ln \left(\sqrt{2} \frac{\sqrt{r^2 + h^2}}{r} \right)$

Onde T é dado por:

$$T = \frac{r_1 h_2 + r_2 (h_1 + h_2) + r_3 h_1}{(h_1 + h_2)^2} \quad (1)$$

Esses modelos são uma boa estimativa para calcular a impedância de surto da torre, porém não levam em conta os braços e as barras diagonais (treliças) que compõem sua estrutura.

B. Modelos compostos por linhas sem perdas

Nesses modelos a torre de transmissão é composta por linhas curtas sem perdas que representam as pernas, as barras inclinadas e os braços da torre. A exata impedância de cada parte da torre é dada em função das dimensões e geometrias, na qual são baseadas em uma série de experimentos em modelos de escalas reduzidas independentes. Nesse modelo, a torre de transmissão é dividida em 4 trechos, onde cada trecho é representado por um linha de transmissão monofásica com um determinado raio equivalente [6,28]. Em [6] obteve-se computacionalmente as formas de onda para as tensões nos braços da torre de circuito duplo independente. Essas tensões estão de acordo com as obtidas experimentalmente. Assim os autores propõem uma fórmula empírica para impedância de surto para um condutor vertical de cada trecho da torre. A Fig. 2 mostra os modelos por linhas sem perdas.

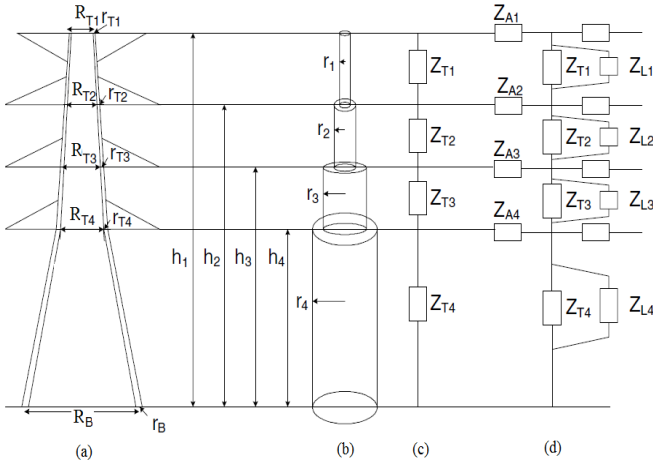


Fig. 2. (a) Silhueta de uma torre de alta tensão; (b) Condutores de raio equivalente para cada trecho; (c) Impedância de surto para cada trecho; (d) Modelo multicondutor vertical incluindo barras diagonais e braços de torre.

Na Fig. 2-(b) a torre de transmissão é dividida em quatro partes, na qual cada parte é representada por um condutor cilíndrico de raio equivalente. Na Fig.2-(c) mostra as impedâncias de surto Z_{Ti} para $(i=1,...,4)$ para cada trecho de torre. Em [1], os autores modificam o modelo de multicondutores, incluindo o efeito das barras diagonais entre os condutores verticais da torre (representado por linhas sem perdas em paralelo com as pernas da torre- Z_{Li}) e os braços (representadas como linhas sem perdas ramificadas a partir do seu ponto de junção com a estrutura da torre- Z_{Ai}), conforme a Fig. 2-(d). Resultados teóricos mostram que a impedância de surto dos condutores é reduzida em 10% com adição das barras diagonais entre as pernas principais da torre. Em [1] apresenta-se as fórmulas para r_i , Z_{Ti} , Z_{Ai} e Z_{Li} .

C. Modelos de torre "multi-andares"

O modelo de torre "multi-andares" é composto por 4 seções divididas nas partes superior, média, inferior dos braços e a base da torre. Cada seção consiste de uma linha de

transmissão sem perdas em série com um elemento $R-L$ paralelo, que são incluídos para levar em conta o efeito da atenuação das ondas viajantes ao longo dos condutores. Nesse modelo, a resistência representa a atenuação da onda de tensão que viaja pela torre e a indutância em paralelo faz com que a resistência gradualmente se torne ineficiente à medida que o tempo passa. Esse modelo pode ser interfaceado facilmente no EMTP ou ATP, sendo apropriado para análises com linhas de multicondutores. Os parâmetros da torre são obtidos através de medições em linhas de 500 kV com cabos guarda ou torres de extra-alta tensão com circuito duplo [9]. Em [25], os autores usaram em suas simulações parâmetros obtidos em uma torre de transmissão de 275 kV com cabos guarda circuito duplo atingida por descargas atmosféricas naturalmente ou por descargas induzidas por foguetes lançados em dias de tempestade.

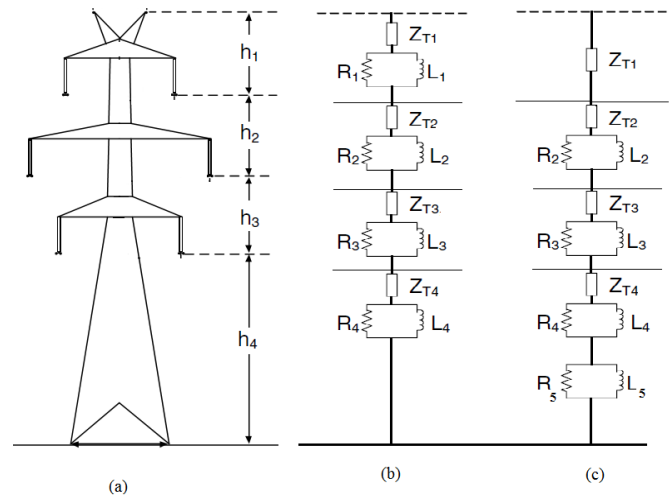


Fig. 3. (a) Silhueta típica de uma torre de alta tensão; (b) Modelo "multi-andares" proposto por [9], [12] e [25]; (c) modelo proposto por [31].

A corrente de descarga no topo da torre e as correntes que percorrem os cabos-guarda são medidas por conectores coaxiais resistivos e as correntes que fluem pelas "pernas" das torres são medidas por transformadores de corrente. As tensões elétricas nas cadeias de isoladores são medidas por divisores resistivos de tensão. Embora os parâmetros necessitem de mais investigações, o modelo "multi-andares" pode ser usado para as análises das sobretensões em linhas de transmissão com boa precisão. Os parâmetros desse modelo foram deduzidos a partir de medições experimentais sendo que em [29] propõe-se uma revisão no modelo e em seus parâmetros no seu artigo. Em geral, uma torre de transmissão de alta tensão pode ser representada pelo modelo "multi-andares" conforme mostrado na Fig. 3, onde diversos autores propõem os parâmetros R_i , L_i e Z_{Ti} para cada seção da torre [9],[12],[25],[30].

Em [30] apresenta-se as simulações de descargas atmosféricas que atingem linhas de transmissão de 150 kV e 400 kV, estimando a corrente mínima para provocar os *flashovers*, levando em consideração a resistência de aterramento da torre. Foram utilizados os modelos de torres por aproximação de geometrias simples (i), modelos

compostos por linhas sem perdas (ii) e modelos "multi-andares" (iii) onde são apresentados os valores R_i , L_i e Z_{Ti} para linhas de 150kV e 440 kV. O modelo "multi-andares" é de fácil implementação em software de análises de transitórios eletromagnéticos em sistemas de potências tais como ATP, EMTP e PSCAD. Um estudo apresentado [31] mostra que esse modelo não é adequado para representação de torres de baixa tensão, sendo que para torres de transmissão curtas podem-se utilizar modelos mais simples, tais como quatro linhas sem perdas de baixo valor de impedância de surto representando a torre é o suficiente para uma boa aproximação.

D. Modelos de torres dependentes da frequência

Os modelos de torres dependentes da frequência representam a torre de transmissão por linha de transmissão no domínio da frequência para simular os transitórios eletromagnéticos, levando em consideração a distorção das ondas viajantes. Em [32] e [33], a torre de transmissão é representada por uma linha uniforme, como uma impedância de surto dependente da frequência, sendo interfaceado pelo EMTP. Em [12] apresenta-se uma aproximação para o cálculo da impedância de surto da torre baseado na representação da torre por uma linha de transmissão.

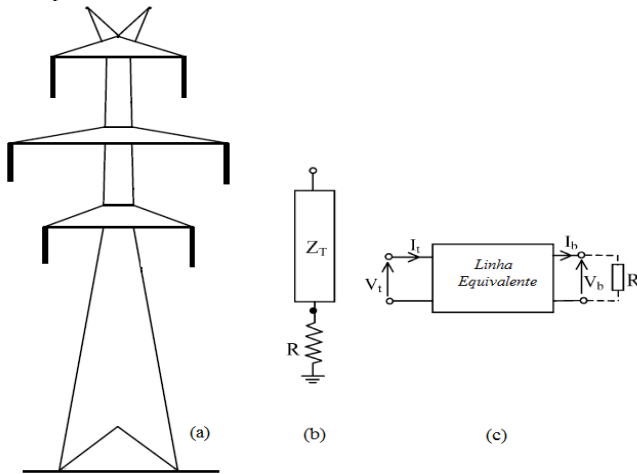


Fig. 4. (a) Torre de transmissão para alta tensão. (b) representação da torre como uma linha de transmissão. (c) torre de transmissão representada por quadripolo.

Em [12], as correntes e tensões são computadas nos terminais emissor e receptor de uma linha equivalente, determinadas por métodos numéricos implementados no domínio da frequência. Para esse cálculo, a torre de transmissão é representada por um *quadripolo* e as correntes e tensões são descritas pelas equações hiperbólicas da linha no domínio da frequência. A representação da torre pela teoria de *quadripolos* pode ser aplicada a qualquer geometria para o cálculo da impedância de torre. A Fig. 4-a mostra uma torre de transmissão de alta tensão genérica que será representada por uma linha de transmissão vertical (Fig. 4-b) e representada por um *quadripolo* (Fig. 4-c). Em [12] é proposto um método para o cálculo da impedância de surto da torre, no domínio da frequência, utilizando medições das correntes e tensões nos terminais emissor e receptor da torre, considerando o solo com distintas resistividades. Em [12] também é apresentado diversos métodos para medições da impedância de surto no

domínio do tempo. Uma das equações sugeridas é dada por (2) [18]:

$$Z = \frac{V_p}{I_{V_p}} \quad (2)$$

Em (2) V_p é a tensão instantânea de pico e I_{V_p} é corrente no instante do pico da tensão, sendo esse método válido para aproximação de ondas viajantes, considerando as primeiras reflexões [12].

A impedância de surto é calculada para torres de 275 kV e 400 kV, usando as equações propostas para torres aproximadas por geometria simples [18] e [34], o método de medições no domínio do tempo [12]* e dos *quadripolos* [12]**, conforme mostrado na tabela 2.

Tabela 2. Comparação da impedância de surto calculada por diversos métodos.

Torre de (kV):	Referências			
	[12]*	[12]**	[18]	[34]
275	182	189	176	196
400	170	178	159	180

*equação (2) **método proposto

Assim esse método de *quadripolos* na frequência apresenta valores próximos aos demais métodos estudados em [12], sendo uma boa estimativa para cálculo e estimação da impedância de surto de torres de transmissão em sistemas de potência.

IV. CONCLUSÕES

Os modelos de torres de transmissão têm sido propostos por diversos autores e foram apresentados sumariamente neste artigo. O levantamento histórico mostrou a importância que os pesquisadores têm se dedicado ao estudo das sobretensões causadas pelos *backflashover*. O modelo aproximado a geometria simples (i), aproxima as torres por geometrias conhecidas para o cálculo da impedância de surto. Apesar de ser de fácil uso, não é tão preciso, pois não considerada os efeitos dos "braços" das torres, resistividade do solo e dependem da direção da corrente injetada. Os modelos de torres apresentados (ii, iii) levam em conta importantes características das torres, tais como sua geometria ("braços", barras diagonais) e representam a torre por meio de parâmetros de circuitos elétricos (para computar o efeito do amortecimento das ondas viajantes ao longo de sua estrutura). Além disso, esses modelos podem ser utilizados diretamente no domínio do tempo e serem inseridos nos softwares para estudos de transitórios eletromagnéticos tais como EMTP, ATP e PSCAD. O modelo (iv) apresenta um modo interessante para estimar a impedância de surto. Assim uma torre de transmissão é vista como uma linha de transmissão no domínio da frequência e são empregadas às equações hiperbólicas da linha, a partir das medições das correntes e tensões nos terminais emissor e receptor da torre, vista como uma linha de transmissão, para distintas resistividades do solo. Esse modelo também permite levar em conta a impedância de aterramento da torre. Também são apresentados métodos no domínio do tempo, nos quais apresentam valores próximos aos obtidos para a torre de transmissão aproximada por geometria simples

(tabela 2). Os diversos modelos propostos mostram a importância da estimação da impedância de surto das torres de transmissão na previsão de sobretensões causadas por descargas atmosféricas e na sua prevenção.

V. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] T. Hara; O. Yamamoto, "Modeling of a transmission tower for lightning-surge analysis", IEE Proc. Generation, Transmission and Distribution, vol. 143, no 3, pp.283-289, Maio 1996.
- [2] W. Shuwen; S. Wenxin, "Backflashover 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] M. Chanaka; K. Shanthi; R. Perera, "Modeling of power transmission lines for lightning back flashover analysis (A case study: 220 kV Biyagama-Kotmale transmission line), Proc. 6th International Conference on Industrial and Information Systems (ICIIS 2011), Peradeniya, Sri Lanka, agosto 2011.
- [7] T. Cao; T. Pham; S. Boggs, "Computation of tower surge impedance in transmission line", Eletrical Insulation Conference, Ottawa, Canadá, 2 a 5 junho, 2013.
- [8] J. Takami; T. Tsuboi; K. Yamamoto et al, "Lightning surge response of a double-circuit transmission tower with incoming lines to a substation through FDTD simulation", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 21, no 1, pp. 96-104, fevereiro, 2014.
- [9] M. Ishii; T. Kawamura; T. Kouno, "Multistory transmission tower model for lightning surge analysis", IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 6, no 3, pp.1327-1335, julho, 1991.
- [10] Z. Zakaria; S. Bashi; N. F. Mailah et al, "Simulation of lightning surges on tower transmission using PSCAD/EMTDC: A comparative study", Proc. 2002 Student Conference on Research and Development, Shah Alam, Malaysia, julho 2002.
- [11] P. Yadee; S. Premrudeepreechacharn, "Analysis of Tower Footing Resistance Effected Back Flashover Across Insulator in a Transmission System", In: IPST-International Conference on System Transients, Lyon, França, 2007.
- [12] N. Harid, N.; Griffiths, H.; Haddad, A, "A New Frequency-Dependent Surge Impedance Calculation Method for High-Voltage Towers", IEEE Transaction on Power Delivery, vol. 21, no 3, pp. 1430-1437, julho 2006.
- [13] S. U. Yusuf; Z. Islam; M. Ahmad, "Analysis of lightning surge characteristics for transmission towers". In: 9th International Forum on Strategic Technology (IFOST), p.280 - 283, Bangladesh, 2014.
- [14] O. E. Gouda, A. Z. El Dein, G. M. Amer "Parameters Affecting the Back Flashover across the Overhead Transmission Line Insulator Caused by Lightning", Proceedings of the 14th International Middle East Power Systems Conference (MEPCON'10), Cairo University, Paper ID 111, Egito, dezembro 19-21, 2010.
- [15] C. A. Jordan, "Lightning Computations for Transmission Lines with Overhead Ground Wires Part II," General Electric Review, vol. 34, pp. 180-185, 1934.
- [16] R. Lundholm; R. B. Finn; W. S. Price, "Calculation of Transmission Line Lightning Voltage by Field Concepts," AIEE Transactions, vol. 76, pp. 1271-1283, 1958.
- [17] C. F. Wagner; A. R. Hileman, "A New Approach to Calculation of Lightning Performance of Transmission Lines (part II, III)," AIEE Trans., pt. III, vol. 78/79, pp. 996-1021/589-603, 1960.
- [18] A. Sargent; M. Darveniza, "Tower Surge Impedance", IEEE Transactions., vol. PAS-88, pp. 680-687, 1969.
- [19] K. Okumura; A. Kijima, "A Method for Computing Surge Impedance of Transmission Line Tower by Electromagnetic Field Theory," IEE of Japan, Trans. B, vol. 105, pp. 733-740, 1985.
- [20] T. Cao; T. Pham; S. Boggs, "Computation of tower surge impedance in transmission line", Eletrical Insulation Conference, Ottawa, Canadá, 2 a 5 junho, 2013.
- [21] A. A. M. WAHAB; I. MATSUBARA; H. KINOSHITA, "An Experimental Evaluation of Some Factors Affecting Tower Surge Impedance," Trans. IEE of Japan, vol. 107, pp. 171-177, 1987
- [22] A. J. G. PINTO, "Modelagem de torres de transmissão utilizando análise numérica dos campos eletromagnéticos e funções racionais", 27/02/2014, 124 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica)-Universidade Estadual de Campinas, UNICAMP, Campinas, 2014.
- [23] Y. Matsumoto; O. Sakuma; K. Shinjo et al, "Measuring of Lightning Surges on Test Transmission Line Equipped with Arresters Struck by Natural and Triggered Lightning," IEEE Trans., PWRD, vol. 11, pp. 996-1002, 1995.
- [24] K. Shinjo; Matsumoto, Y.; Sakuma, O. et al. "Characteristics of Transient Response of Okushishiku Test Transmission Line Struck by Natural and Triggered Lightning," Trans. IEE of Japan, vol. 117-B, pp. 478-487, 1997.
- [25] H. Motoyama; K. Shinjo; Y. Matsumoto et al. "Observation and Analysis of Multiphase Back Flashover on the Okushishiku Test Transmission Line caused by Winter Lightning," in IEEE PES 1998 Winter Meeting, 1997, PE-204-PWRD-0-12-1997
- [26] M. E. ALMEIDA; M. T. C. BARROS, "Tower modeling for lightning surge analysis using Electro-Magnetic Transient Program", IEE Proc.-Gener, Transm. Distrib., vol. 141, no.6, novembro, 1994.
- [27] T. Noda, "A Numerical Simulation of Transient Eletromagnetic Fields for Obtaining the Step Response of a Transmission Tower Using the FDTD Method" IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 23,n.2, pp.1262-1263
- [28] J. A. Martinez; F. Castro-Aranda. "Tower Modeling for Lightning Analysis of Overhead Transmission Lines" Power Engineering Society General Meeting, vol.2, pp.1212-1217, junho 2005.
- [29] Y. Baba; M. Ishii, "Numerical Electromagnetic Field analysis on Lightning Surge Response of Tower with Shield Wire", IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 15, no.3, pp.1010-1015, julho 2000.
- [30] Z. Datsios; P. N. Mikropoulos, "Effect of tower modeling on the minimum backflashover current of overhead transmission lines", Conference: 19th International Symposium on High Voltage Engineering, Pilsen, Republica Tcheca.
- [31] T. Ito; T. Ueda; H. Watanabe; T. Funabashi et al. "Lightning flashover on 77-kV systems: Observed voltage bias effect and analysis", IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 18, n.2, pp 545-550, abril 2003.
- [32] N. Nagaoka, "A development of frequency-dependent tower model", Transactions IEE Japan, vol. 111-B, no. 1, pp. 51-56, janeiro. 1991.
- [33] S. Kato; A. Mochizuki; E. Zaima, "Transmission line models of tower in frequency domain" (in Japanese), Trans. IEE Japan, vol. 115-B, no. 5, pp. 524-531, maio 1995.
- [34] E. C. Jordan and K. G. Balmain, Electromagnetic Waves and Radiating Systems, 2nd ed. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1968, pp. 384-396.

VI. BIOGRAFIAS



Anderson Ricardo Justo de Araújo Graduado (2012) e mestre (2014) em Engenharia Elétrica pela Faculdade de Engenharia Elétrica de Ilha Solteira, UNESP - Ilha Solteira e atualmente é estudante de doutorado na mesma instituição. Suas áreas de interesse são: transitórios eletromagnéticos em sistemas elétricos de potência utilizando métodos numéricos e modelagem de linhas de transmissão.



Sérgio Kurokawa (S'01-M'04) Graduado em Engenharia Elétrica (1990). Desde 1994 atua como Professor na Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira da Universidade Estadual Paulista (UNESP). Obteve o título de Doutor em Engenharia Elétrica na Faculdade de Engenharia Elétrica e da Computação da Universidade Estadual Paulista (UNICAMP). Suas principais áreas de interesse são transitórios eletromagnéticos em sistemas elétricos de potência e modelos de linhas de transmissão para simulações de transitórios eletromagnéticos em sistemas de potência.