

# Cálculo e Modelagem da Impedância de Surto de Torres de Transmissão para Análise de Transitórios Eletromagnéticos

A. J. G. Pinto, E. C. M. Costa, S. Kurokawa, B. Kordi, J. Pissolato

**Resumo**—O artigo apresenta um método de cálculo da impedância de surto de torres de transmissão fazendo uso do *Numerical Electromagnetic Code* (NEC). A partir do cálculo da impedância de surto em função de um impulso atmosférico, propõe-se a síntese desse mesmo parâmetro fazendo uso de técnicas de ajuste por funções racionais. Dessa forma, a impedância de surto de torres de transmissão, frente uma descarga atmosférica, pode ser aproximada por uma função racional e modelada por meio de um circuito *RLC* equivalente.

**Palavras Chave**—Impedância de surto, torres de transmissão, descargas atmosféricas, transitórios eletromagnéticos.

## I. INTRODUÇÃO

A modelagem de altas estruturas metálicas para o estudo de descargas atmosféricas é um tema relevante para análise da compatibilidade eletromagnética de sistemas de telecomunicação e de potência. A modelagem dessas altas estruturas metálicas é abordada na literatura técnica basicamente fazendo uso da teoria clássica de linhas de transmissão ou por meio da teoria eletromagnética convencionalmente aplicada a antenas [1]. Na abordagem por meio da teoria de linhas de transmissão, as correntes e tensões na torre são basicamente calculadas utilizando as equações do telégrafo, ou seja, a torre é praticamente representada como um circuito elétrico. Por outro lado, com base na teoria convencional aplicada ao estudo de antenas, a torre é analisada em função dos campos elétricos e magnéticos produzidos pelo sinal elétrico aplicado, i.e., a torre é modelada de forma análoga a uma antena. Essas duas classificações representam uma abordagem válida para maioria dos modelos de estruturas metálicas para o estudo de transitórios eletromagnéticos

resultantes de impulsos atmosféricos.

A maioria dos modelos desenvolvidos com base na teoria clássica de linhas de transmissão é representada por uma impedância de surto constante, calculada a partir de formas geométricas simplificadas das torres, ou então, por meio de uma série de pequenas seções de linhas de transmissão representando cada trecho da torre [2, 3]. No entanto, a modelagem fazendo uso da teoria de linhas de transmissão apresenta algumas restrições. Primeiramente, a representação da impedância de surto constante não é apropriada para simulação e estudo dos transitórios eletromagnéticos rápidos e impulsivos, compostos por uma ampla faixa de frequência, tal como uma descarga atmosférica. Uma segunda restrição diz respeito à representação da torre como uma série de segmentos de linha horizontais e verticais, pois essa abordagem não leva em conta as sucessivas reflexões de onda ao longo desses pequenos segmentos. Dessa forma, a modelagem com base na teoria de linhas é restrita a torres de transmissão convencionais, podendo apresentar imprecisões em estruturas metálicas com alturas elevadas e braços transversais muito longos. Algumas dessas restrições foram parcialmente analisadas na literatura técnica, abordando torres de transmissão de energia elétrica com mais de 180 metros de altura [4].

Por outro lado, a modelagem de torres de forma análoga a uma antena é dada em termos de campos elétrico e magnético (teoria eletromagnética), diferentemente dos modelos fazendo uso da teoria aplicada a linhas de transmissão, nos quais a torre é modelada como um circuito elétrico equivalente. A maioria dos modelos disponíveis na literatura técnica, levando em conta a teoria de linhas ou de antenas, é resumida à modelagem simplificada da geometria da torre (e.g. simples cone ou cilindro). No entanto, mesmo com tais simplificações, esses métodos podem apresentar resultados adequados se um método numérico de análise dos campos eletromagnéticos for considerado [5]. Uma ferramenta computacional eficaz no estudo dinâmico dos campos eletromagnéticos em estruturas metálicas, com as mais variadas formas geométricas, é o *Numerical Electromagnetic Code* (NEC). Por meio do NEC, uma torre metálica pode ser modelada por um simples cilindro ou retângulo ou mesmo levando em conta cada treliça que compõe sua exata estrutura. O NEC calcula as correntes e tensões na torre no domínio da frequência fazendo uso do método dos momentos [6, 7].

Essa pesquisa recebeu auxílio da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP (Procs. 2014/00197-1 e 2015/10205-8) e Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq.

André J. G. Pinto e José Pissolato (pisso@dsce.fee.unicamp.br) estão vinculados à Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade de Campinas – FEEC/UNICAMP, Campinas, SP, Brasil.

Eduardo C. M. Costa (educosta@pea.usp.br) está vinculado ao Depto. de Engenharia de Energia e Automação Elétricas da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – PEA/EPUSP, São Paulo, SP, Brasil.

Sérgio Kurokawa está vinculado à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira da Universidade Estadual Paulista – FEIS/UNESP, Ilha Solteira, SP, Brasil.

Behzad Kordi (Behzad.Kordi@umanitoba.ca) está vinculado ao Dept. Electrical & Computer Engineering, Faculty of Engineering, University of Manitoba, Winnipeg, MB, Canadá.

A técnica de modelagem proposta combina ambas as abordagens, por meio da teoria de linhas e de antenas. A premissa é calcular a impedância de surto  $Z(\omega)$  de uma torre de transmissão a partir da corrente  $I(\omega)$  e tensão  $V(\omega)$  calculadas utilizando o NEC. Conhecida a impedância  $Z(\omega)$ , uma função racional aproximada pode ser obtida e a partir dos seus polos e resíduos, um circuito *RLC* equivalente pode ser modelado no *Electromagnetic Transient Program* (EMTP), possibilitando a simulação de transitórios eletromagnéticos direto no domínio do tempo.

## II. CÁLCULO DA IMPEDÂNCIA DE SURTO UTILIZANDO O NEC

O *Numerical Electromagnetic Code* – NEC é capaz de calcular a impedância de surto de diversas estruturas metálicas, desde um simples condutor cilíndrico até torres de transmissão com centenas de treliças metálicas. O NEC foi desenvolvido a partir do método dos momentos, representando a interação entre campos elétricos e magnéticos por meio de um conjunto de condutores. Ou seja, a estrutura a ser analisada é modelada por um conjunto de segmentos condutores interconectados [6].

Cada segmento condutor é representado pelo NEC como a interligação entre dois pontos geométricos e raio da seção transversal do condutor traçado. Por exemplo, um circuito elétrico genérico pode ser representado por um conjunto de doze segmentos condutores, como descrito na fig. 1:

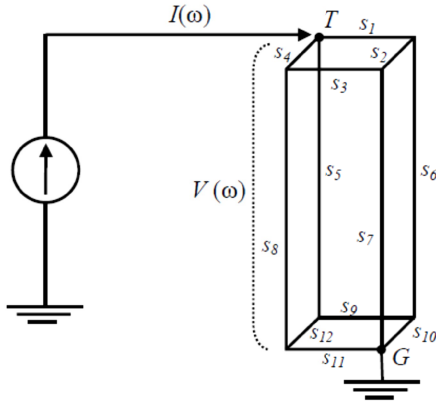


Fig. 1. Estrutura genérica representada como um conjunto de condutores utilizando o NEC.

A fig. 1 representa uma estrutura metálica formada por doze condutores  $s_1$  a  $s_{12}$  e aterrada solidamente no ponto  $G$ . A impedância de surto da estrutura pode ser calculada por meio de uma fonte de corrente  $I(\omega)$  aplicada no ponto  $T$  e com base na tensão  $V(\omega)$  entre os pontos  $T$  e  $G$ . Portanto, a impedância de surto da estrutura  $Z(\omega)$  é expressa como:

$$Z(\omega) = \frac{V(\omega)}{I(\omega)} \quad (1)$$

Outra denominação da impedância de surto no domínio da frequência, definida em algumas literaturas técnicas, é o conceito de impedância harmônica [8]. Essa definição leva em conta apenas as características geométricas e eletromagnéticas

da estrutura e o meio na qual se encontra imersa. Sendo a fonte de corrente  $I(\omega)$  dada por um impulso unitário, a impedância de surto ou harmônica da estrutura condutora é dada por:

$$Z(\omega) = Z_h(\omega) = \frac{V(\omega)}{I_h(\omega)} \quad (2)$$

Sendo a impedância harmônica  $Z_h(\omega)$  e a corrente harmônica  $I_h(\omega) = 1$ .

A definição da impedância de surto como impedância harmônica não é válida para representação da estrutura metálica envolvendo elementos e fenômenos não lineares. No entanto, é ideal para o estudo de fenômenos eletromagnéticos envolvendo uma ampla faixa de frequências [1].

Com base na definição de impedância de surto e harmônica, a tensão entre o ponto  $T$  e  $G$  da estrutura da fig. 1 pode ser obtida por meio de transformada inversa de Fourier:

$$u(t) = \mathbf{F}^{-1}\{I(\omega)Z(\omega)\} \quad (3)$$

Considerando que a impedância harmônica, obtida por meio de um impulso unitário, torna-se independente de  $I(\omega)$ , a impedância de surto da torre para uma ampla faixa de frequência é expressa:

$$Z(\omega) = R(\omega) + jX(\omega) \quad (4)$$

Portanto, a impedância de surto  $Z(\omega)$  é composta por uma resistência em função da frequência  $R(\omega)$  e uma reatância  $X(\omega)$ .

## III. SÍNTESE DA IMPEDÂNCIA DE SURTO POR MEIO DE FUNÇÕES RACIONAIS

Existem alguns métodos na literatura técnica que permitem a aproximação da função  $Z(\omega)$  por meio de uma função racional  $Z_{fit}(\omega)$  [9, 10, 11]. Tais métodos foram amplamente utilizados na modelagem de linhas de transmissão para o estudo de transitórios eletromagnéticos [12, 13, 14].

Esses mesmos métodos de ajuste podem ser utilizados para sintetizar a impedância de surto de uma torre de transmissão mediante um impulso atmosférico, envolvendo uma ampla faixa de frequências.

Portanto, conhecendo-se a impedância de surto da torre de transmissão (calculada previamente por meio do NEC), pode-se aproximá-la por meio de uma função racional:

$$Y(\omega) \approx Y_{fit}(\omega) = \sum_{n=1}^N \frac{c_n}{j\omega - a_n} + d + j\omega h \quad (5)$$

Sendo a impedância de surto obtida a partir da admitância  $Y_{fit}(\omega)$  em (5):

$$Z_{fit}(\omega) = \frac{1}{Y_{fit}(\omega)} \quad (6)$$

A função racional em (5) é composta pela somatória de  $N$  termos, sendo  $c_n$  e  $a_n$  o  $n$ -ésimo resíduo e polo da função racional  $Y_{fit}(\omega)$ , respectivamente. Os  $N$  resíduos e polos podem ser números reais ou complexos conjugados. Os elementos  $d$  e  $h$  são termos constantes e proporcionais. Vale destacar que a quantidade de resíduos e polos utilizada para fazer o ajuste de

$Y_{fit}(\omega)$  em  $Y(\omega)$  é diretamente proporcional a faixa de frequência considerada, i.e., quanto maior a quantidade de resíduos e polos no ajuste da função racional, maior a faixa de frequência considerada.

A partir dos resíduos, polos e constantes na função racional  $Y_{fit}(\omega)$ , um circuito elétrico com elementos constantes pode ser obtido, como descrito na fig. 2 [9, 10].

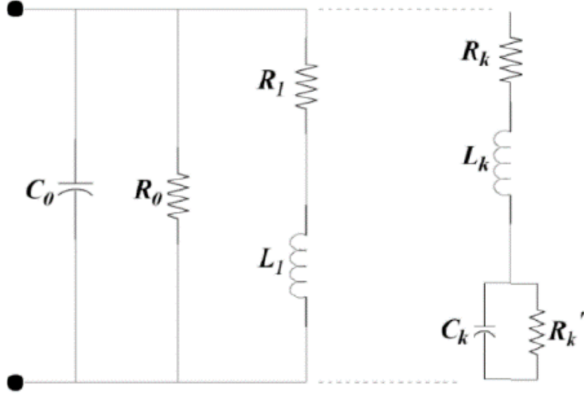


Fig. 2. Circuito elétrico associado à função racional  $Y_{fit}(\omega)$ .

Os elementos do circuito da fig. 2 podem ser calculados a partir de resíduos e polos reais, por meio da seguinte analogia do  $n$ -ésimo termo da somatória em (5):

$$\frac{c_n}{j\omega - a_n} = \frac{1/L_n}{j\omega - R_n/L_n} \quad (7)$$

Considerando resíduos e polos sendo complexos conjugados, tem-se a seguinte analogia entre os termos de  $Y_{fit}(\omega)$  e os elementos do circuito da fig. 2:

$$\frac{c_k}{j\omega - a_1} + \frac{c_k^*}{j\omega - a_k^*} = \frac{1}{L_k} \frac{\left(j\omega + \frac{1}{R_k' C_k}\right)}{\left(\omega^2 + \left(\frac{R_k}{L_k} + \frac{1}{R_k' C_k}\right)j\omega + \left(\frac{R_k}{L_k R_k' C_k} + \frac{1}{L_k C_k}\right)\right)} \quad (8)$$

Dessa forma, a impedância de surto da torre pode ser aproximada por meio de um circuito  $RLC$  equivalente, composto por termos constantes e facilmente modelado por qualquer software derivado do EMTP.

#### IV. CÁLCULO DA IMPEDÂNCIA DE SURTO DA TORRE

O cálculo da impedância de surto utilizando o NEC foi estabelecido na literatura técnica por meio da validação baseada em medições de campo e resultados experimentais. A torre, ou estrutura metálica, é representada por um conjunto de condutores com posição, orientação e raio variáveis de acordo com as características geométricas da própria estrutura [5, 15, 16]. A partir da modelagem da estrutura como um conjunto de condutores e uma fonte de excitação, a corrente e tensão de surto da torre são calculadas e, em função desses valores, a impedância de surto da estrutura pode ser obtida, tal como em (1).

Dessa forma, as correntes e tensões de surto no domínio do tempo podem ser calculadas por meio de transformadas

numéricas, diretamente a partir dos resultados obtidos por meio do NEC, ou então com base no circuito equivalente descrito na fig. 2.

A validação do método de ajuste é realizada levando em conta uma torre de transmissão com circuito duplo e 120 metros de altura [15, 16]. A torre é modelada de forma simplificada utilizando o NEC-2, como descrito na fig. 3(a), com base na geometria real da torre descrita na fig. 3(b).

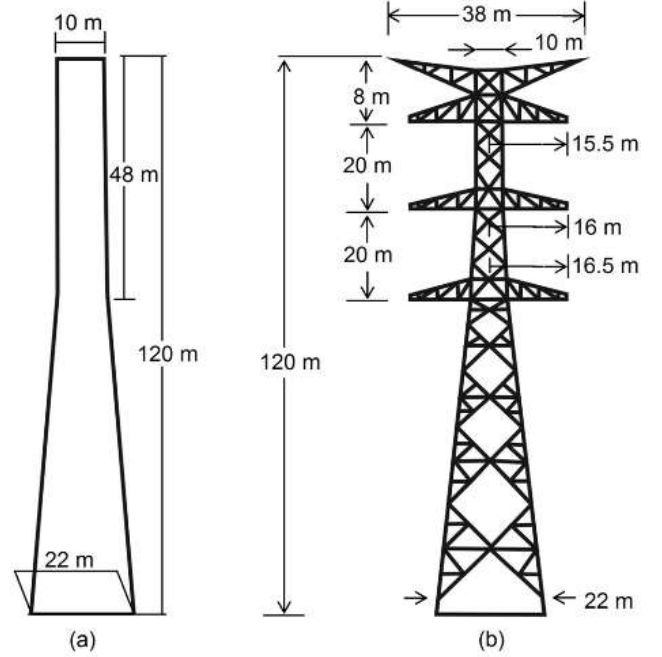


Fig. 3. Estrutura da torre modelada no NEC (a) e descrições das dimensões geométricas reais da estrutura (b).

Na representação equivalente da torre, descrita na fig. 3(a), os segmentos horizontais têm pouca influência no cálculo da impedância de surto. No entanto, os braços da torre resultam em algumas distorções na forma de onda da tensão de surto, que são reduzidas devido à inclusão de alguns segmentos inclinados na representação do circuito equivalente. Tais observações foram obtidas com base em dados experimentais, por meio de medições em torres com escala real [16].

A impedância de surto da torre é obtida a partir de a um impulso atmosférico, modelado por uma fonte de corrente equivalente a uma dupla exponencial com 1,2  $\mu$ s de frente e 50  $\mu$ s de calda [7]. Essa forma de onda pode ser obtida por meio da *função de Heidler*, capaz de sintetizar uma função contínua e com características similares a uma forma de onda 1,2/50  $\mu$ s [6, 7]. A função de Heidler é descrita por:

$$I(t) = \frac{F_0}{\eta} \frac{(t/\tau_1)^n}{1 + (t/\tau_1)^n} e^{(-t/\tau_2)} \quad (9)$$

O fator de correção  $\eta$ , em (9), é expresso como:

$$\eta = \exp\left[-(\tau_1/\tau_2)(n\tau_2/\tau_1)^{(1/n)}\right] \quad (10)$$

O termo  $F_0 = 3,5$  kA é a magnitude do pico de corrente de  $I(t)$ ,  $\tau_1 = 1,2$   $\mu$ s é a constante da frente de onda,  $\tau_2 = 50$   $\mu$ s é a constante do tempo de calda e  $n = 2,5$  é a constante da

exponencial [6, 7]. A partir da fonte  $I(\omega) = \mathcal{F}\{I(t)\}$ , aplicada na extremidade superior da torre (fig. 3), devidamente aterrada na base, a impedância de surto pode ser obtida por meio do NEC. Considera-se a torre solidamente aterrada e a resistividade do solo 1 k $\Omega$  m.

## V. AJUSTE DA IMPEDÂNCIA DE SURTO

A impedância de surto da torre é calculada por meio do software NEC-2 e analisada em função das parcelas real e imaginária de  $Z(\omega)$ . O ajuste da impedância de surto é realizado em uma primeira abordagem entre 5 kHz a 10 MHz, considerando 10, 30 e 50 pares de resíduos e polos na síntese de  $Z_{fit}(\omega)$ . Esse intervalo cobre a grande maioria das frequências que compõe a forma de onda utilizada no cálculo da impedância de surto [5, 15].

A parcelas real e imaginária da impedância de surto  $Z(\omega)$  e de  $Z_{fit}(\omega)$ ; ajustada por 10, 30 e 50 pares de resíduos e polos; é descrita nas figs. 4 e 5.

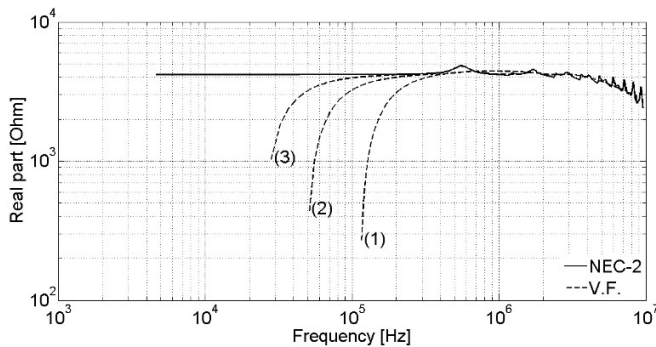


Fig. 4. Parte real da impedância  $Z(\omega)$  e  $Z_{fit}(\omega)$  ajustada por 10 (curva 1), 30 (curva 2) e 50 (curva 3) pares de resíduos e polos.

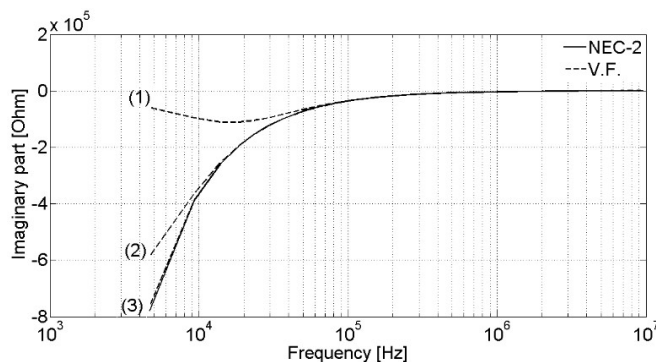


Fig. 5. Parte imaginária da impedância  $Z(\omega)$  e  $Z_{fit}(\omega)$  ajustada por 10 (curva 1), 30 (curva 2) e 50 (curva 3) pares de resíduos e polos.

Nas figs. 4 e 5, a curva contínua representa a impedância de surto obtida pelo NEC, enquanto as curvas pontilhadas são relativas à impedância ajustada a partir da aproximação por função racional (*Vector Fitting* - V.F.).

A fig. 4 mostra a parte real das impedâncias  $Z(\omega)$  e  $Z_{fit}(\omega)$ . Observa-se maiores variações em frequências abaixo de 100 kHz, adotando-se como referência a curva obtida no NEC-2. No entanto, essas variações podem ser reduzidas utilizando mais de 50 pares de resíduos e polos no ajuste da impedância

de surto.

Por outro lado, a parte imaginária da impedância de surto  $Z_{fit}(\omega)$  mostra-se precisa com 30 e 50 pares de resíduos e polos, como descrito pelas curvas 2 e 3 na fig. 5.

A precisão do ajuste, obtido por meio de 10, 30 e 50 pares de resíduos e polos, pode ser avaliada de forma quantitativa na fig. 6.

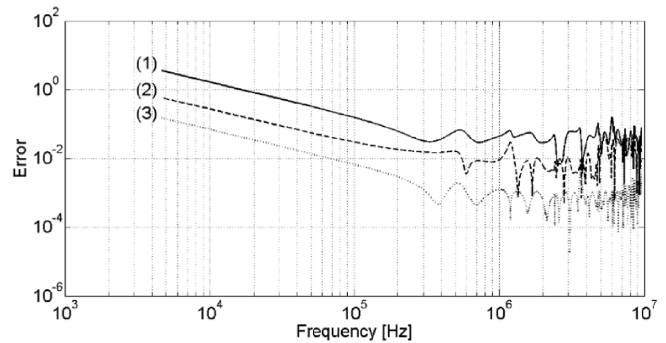


Fig. 6. Erro relativo do módulo da impedância de surto ajustada fazendo uso de 10 (curva 1), 30 (curva 2) e 50 (curva 3) pares de resíduos e polos.

Os erros relativos são dados em porcentagem e calculados para o ajuste com 10, 30 e 50 pares de resíduos e polos de  $Z_{fit}(\omega)$ . A impedância de surto obtida pelo NEC é adotada como referência para o cálculo dos erros relativos em função da frequência.

Observa-se erros abaixo de 1% nas curvas 2 e 3 da fig. 6 (30 e 50 pares de resíduos e polos, respectivamente). O erro relativo do ajuste da impedância de surto por 10 pares de resíduos e polos demonstra valores mais expressivos entre 5 a 10 kHz.

## VI. CONCLUSÃO

Uma metodologia aplicada à modelagem de torres é proposta para o estudo de transitórios eletromagnéticos resultantes de descargas atmosféricas. O modelo proposto foi desenvolvido diretamente no domínio do tempo por meio de técnicas de ajuste da impedância de surto por funções racionais e circuitos elétricos. Essa técnica tem sido amplamente utilizada na modelagem de linhas de transmissão e apresenta-se nesta pesquisa como uma alternativa para modelagem da impedância de surto de estruturas metálicas com alturas elevadas.

Verifica-se que a precisão na representação da impedância de surto por meio da técnica proposta está em função da quantidade de pares de resíduos e polos utilizados no ajuste (*fitting*), que por sua vez, depende da amplitude da faixa de frequências a ser analisada. Como a metodologia é proposta para o estudo de transitórios resultantes de descargas atmosféricas, envolvendo uma ampla faixa de frequências, a impedância de surto ser adequadamente representada com mais de 50 pares de resíduos e polos.

A análise realizada ao longo do artigo, apresenta uma abordagem inicial sobre o método proposto. A faixa de frequências considerada se estende de 5 kHz a 10 MHz e o número máximo de resíduos e polos, considerado no ajuste de

$Z_{fit}(\omega)$ , limitou-se a 50 pares. Embora a frequência máxima considerada esteja muito além da faixa convencionalmente considerada para o estudo de sistemas de potência (10 MHz), o limite inferior de 5 kHz poderia ser reduzido. Acredita-se que o ajuste da impedância de surto entre 50 Hz a 5 MHz mostra-se ideal. No entanto, o software NEC-2 mostrou algumas imprecisões na obtenção da impedância de surto  $Z(\omega)$  em função de  $I(\omega)$  e  $V(\omega)$  para baixas frequências, mais especificamente abaixo de 4 kHz. No entanto, acredita-se que tais imprecisões podem ser superadas por meio da representação mais precisa da estrutura metálica da torre no NEC, ou então, por meio do Método dos Elementos Finitos, utilizado previamente no cálculo da impedância de surto de sistemas de aterramento elétrico e parâmetros de cabos em diversas aplicações.

## VII. REFERÊNCIAS

- [1] L. Grcev, F. Rachidi. "On tower impedances for transient analysis". *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 19, n. 3, pp. 1238-1244, 2004.
- [2] Cigré Working Group 01 (Lightning) of Study Committee 33 (Overvoltages and insulation coordination): *Guide to procedures for estimating the lightning performance of transmission lines*, 1991.
- [3] J. A. Gutiérrez, P. Moreno, J. L. Naredo, J. L. Bermúdez, C. A. Nucci, F. Rachidi. "Nonuniform transmission tower model for lightning transient studies". *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 19, n. 2, pp. 490-496, 2004.
- [4] S. Kurokawa, E. C. M. Costa, A. J. G. Pinto, J. Pissolato. "Analysis of electric characteristics of high-elevation stretches of the Tucuruí-Macapá-Manaus connection". *Journal of Control, Autom. Electr. Syst.*, vol. 24, pp. 714-724, 2013.
- [5] M. Ishii, Y. Baba. "Advanced computational methods in lightning performance - The Numerical Electromagnetic Code (NEC-2)". In: *Power Engineering Society Winter Meeting*, vol. 4, pp. 2419-2424, 2000.
- [6] G. J. Burke. *Numerical Electromagnetic Code (NEC)*, Technical Document 116, Naval Ocean Systems Center, San Diego, 1980.
- [7] IEC 60060-1. *High-voltage test techniques - part1: general definitions and test requirements*, 2nd ed, 2009-2010.
- [8] W. A. Chisholm, Y. L. Chow, K. D. Srivastava. "Lightning surge response of transmission towers". *IEEE Trans. Power App. Syst.*, vol. PAS-102, n. 9, pp.3232-3242, 1983.
- [9] B. Gustavsen, A. Semlyen. "Rational approximation of frequency domain responses by vector fitting". *IEEE Trans. Power Systems*, vol.16, n. 1, pp.97-104, 2001.
- [10] G. Antonini. "SPICE equivalent circuits of frequency-domain responses". *IEEE Trans. Electromagnetic Compatibility*, vol. 45, n. 3, 2003.
- [11] W. Ren. "A new circuit modeling methodology for RFID antennas with vector fitting technique". In: *IEEE Wireless Comm. Networking and Mobile Computing (WiCOM)*, 23-25 Sept., 2010.
- [12] P. T. Caballero, E. C. M. Costa, S. Kurokawa. "Fitting the frequency-dependent parameters in the Bergeron line model". *Electric Power Systems Research*, vol. 117, pp. 14-20, 2014.
- [13] S. Kurokawa, F. N. R. Yamanaka, J. A. Prado, J. Pissolato. "Inclusion of the frequency effect in the lumped parameters transmission line model: state space formulation". *Electric Power Systems Research*, vol. 79, n. 7, pp. 1155-1163, 2009.
- [14] M. S. Sarto, A. Scarlatti, C. L. Holloway. "On the use of fitting models for the time-domain analysis on problems with frequency-dependent parameters". In: *Proceedings of the IEEE Int. Symp. on Electromagnetic Compatibility*, pp. 13-17, Montreal, Quebec, Canada, 13-17 August 2001.
- [15] M. Ishii, Y. Baba. "Numerical electromagnetic field analysis of tower surge response". *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 1, pp. 483-488, 1997.
- [16] Y. Baba, M. Ishii. "Numerical electromagnetic field analysis on measuring methods of tower surge impedance". *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 14, n. 2, 1999.

## VIII. BIOGRAFIAS

**André Jinno G. Pinto** é graduado em Engenharia Elétrica (2008), mestre (2011) e doutor (2014) em Engenharia Elétrica pela Universidade Estadual de Campinas FEEC/UNICAMP. Atualmente é pesquisador pós-doutorado no Laboratório de Alta Tensão LAT/UNICAMP (FAPESP Proc. 2014/00197-1). Seus principais temas de pesquisa são: transmissão de energia elétrica, técnicas em alta tensão, modelagem de sistemas de potência para o estudo de transitórios eletromagnéticos e compatibilidade eletromagnética.

**Eduardo C. Marques Costa** é mestre em Engenharia Elétrica pela Universidade Estadual Paulista FEIS/UNESP (2009) e doutor pela Universidade Estadual de Campinas FEEC/UNICAMP (2013). Atualmente é Professor Doutor no Depto. de Engenharia de Energia e Automação Elétricas da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo PEA/EPUSP. Seus principais temas de pesquisa são: transmissão de energia elétrica, modelagem de sistemas de potência para o estudo de transitórios eletromagnéticos e compatibilidade eletromagnética.

**Sérgio Kurokawa** é mestre em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Uberlândia UFU (1994) e doutor pela Universidade Estadual de Campinas FEEC/UNICAMP (2003). Atualmente é Professor Adjunto no Depto. de Engenharia Elétrica da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira da Universidade Estadual Paulista DEE/FEIS/UNESP. Seus principais temas de pesquisa são: transmissão de energia elétrica e modelagem de sistemas de potência para o estudo de transitórios eletromagnéticos.

**Behzad Kordi** é mestre e doutor em Engenharia Elétrica pela *Amirkabir University of Technology - Tehran Polytechnic*. Atualmente é Professor Associado no Depto. de Engenharia Elétrica e Computação da Universidade de Manitoba, Winnipeg, Canadá. Seus principais temas de pesquisa são: sistemas de potência, modelagem de linhas de transmissão, monitoramento e sensores aplicados à transmissão de energia elétrica e compatibilidade eletromagnética.

**José Pissolato** é mestre em Engenharia Elétrica (1982) pela Universidade Estadual de Campinas FEEC/UNICAMP e doutor pela *Université Toulouse III Paul Sabatier* (1986). Atualmente é Professor Titular no Depto. de Sistemas e Energia da Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade Estadual de Campinas DSE/FEEC/UNICAMP e responsável pelo Laboratório de Alta Tensão - LAT dessa mesma instituição. Seus principais temas de pesquisa são: sistemas de potência, transmissão de energia elétrica, técnicas em alta tensão e compatibilidade eletromagnética.