Corona Discharge Model for Transmission Lines by Lumped Elements

E. C. M. Costa, S. Kurokawa and J. Pissolato

***Abstract*— This paper shows the insertion of corona effect in a transmission line model based on lumped elements. The development is performed considering a frequency-dependent line representation by cascade of π sections and state equations. Hence, the detailed profile of currents and voltages along the line, described from a non-homogeneous system of differential equations, can be obtained directly in time domain applying numerical or analytic solution integration methods. The corona discharge model is also based on lumped elements and is implemented from the well-know Skilling-Umoto Model.**

***Keywords*— Corona discharge, lumped elements, transmission line model, state equations.**

I. Introdução

O EFEITO Corona em linhas aéreas de transmissão é um fenômeno observado na superfície dos condutores, quando o valor do gradiente de potencial excede o valor crítico disruptivo do ar ou de outro meio isolante, resultando em uma descarga eletrostática.

Esse gradiente de potencial está diretamente ligado às condições climáticas e atmosféricas, como: pressão, umidade, poluição e material particulado suspenso no ar ou sobre os isoladores e condutores.

As descargas por corona resultam em graves interferências em sistemas de telecomunicação, denominadas radio-interferências, e perdas que variam em alguns poucos quilowatts até centenas de quilowatts por quilometro, dependendo das condições climáticas regionais do sistema de transmissão [1, 2].

Para mitigar as perdas por corona, diversas técnicas na produção de discos e pinos estão disponíveis, fazendo uso de porcelana vitrificada, vidro temperado e alguns tipos de resinas sintéticas ou associações com fibra de vidro e epóxi. São técnicas usuais também o projeto de linhas fazendo uso de condutores múltiplos, ou feixe de subcondutores, e anéis anti-corona, ou conhecidos também como anéis de guarda, instalados na cabeça da cadeia de isoladores em linhas de transmissão [3]. Essas últimas técnicas aumentam consideravelmente a capacitância entre as fases e as torres metálicas, entre duas fases consecutivas e entre as fases e o solo, diminuindo a probabilidade de descargas devido ao efeito corona.

A modelagem computacional do efeito corona em linhas de transmissão pode ser obtida por meio de três métodos básicos. Os dois primeiros são os métodos das diferenças finitas e das características. Porém, esses dois procedimentos não podem ser desenvolvidos no *Eletromagnetic Transient Program* (EMTP) e no *Alternative Transient Program* (ATP), além de apresentarem uma implementação complexa e algumas vezes impraticável, dependendo das condições de contorno do sistema. Como uma terceira alternativa, é proposta a técnica por meio de cascata de circuitos π convencional, no entanto essa modelagem não representa adequadamente o comportamento variável dos parâmetros elétricos da linha em função da frequência.

Com base nas descrições apresentadas até o momento, o corrente trabalho propõe uma modelagem no domínio do tempo para simulação de transitórios eletromagnéticos decorrentes de uma descarga eletrostática devido ao efeito corona. O modelo proposto é baseado na representação de linhas de transmissão por parâmetros discretos e equações de estado, levando em consideração o efeito da frequência sobre os parâmetros elétricos longitudinais. Dessa forma, torna-se possível a representação de elementos variáveis no tempo e de um perfil detalhado das correntes e tensões transitórias ao longo da linha [4].

Vale destacar que a modelagem por parâmetros discretos apresenta diversos atributos, entre eles a representação de elementos não lineares ao longo da linha, tais como: manobras, inserção de dispositivos de potência, arco voltaico, entre outros [5]. Portanto, torna-se possível a modelagem da descarga devido ao efeito corona utilizando o modelo discreto e não linear de Skilling-Umoto.

Ademais, as equações diferenciais das correntes e tensões ao longo da linha, representadas no espaço de estado, podem ser facilmente solucionadas utilizando métodos numéricos ou analíticos de integração [6]. Tal fato, somado à praticidade e versatilidade da implementação por parâmetros discretos e equações de estado, torna o método proposto uma eficaz ferramenta na simulação de transitórios eletromagnéticos em sistemas de potência devido ao efeito corona.

E. C. M. Costa, Universidade Estadual de Campinas (Unicamp), Campinas, Brasil, educosta@dsce.fee.unicamp.br

S. Kurokawa, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (Unesp), Ilha Solteira, Brasil, kurokawa@dee.feis.unesp.br

J. Pissolato, Universidade Estadual de Campinas (Unicamp), pisso@dsce.fee.unicamp.br

II. Modelagem da Linha de Transmissão por Elementos Discretos e Dependentes da Frequência

A. Parâmetros variáveis com a frequência

Os parâmetros longitudinais de linhas de transmissão com retorno através do solo são fortemente dependentes da frequência devido ao efeito solo. Tal fenômeno foi primeiramente descrito e modelado por *Carson* e por *Pollaczek* por meio de dados obtidos de forma empírica [7]. Ambos os modelos apresentam resultados similares quando aplicados na obtenção dos parâmetros de linhas aéreas. No entanto, para cabos e linhas subterrâneas, as equações de *Pollaczek* apresentam melhores resultados.

O efeito pelicular, resultante do campo eletromagnético interno dos condutores das fases, resulta em uma impedância variável em função da frequência, aproximadamente até 100 Hz. O método de cálculo da impedância devido ao efeito pelicular é baseado nas equações de Bessel e descreve uma resistência crescente e uma indutância decrescente em função da frequência [8].

B. Vector Fitting

De forma geral, não existe uma equação analítica que descreva a impedância Z(ω) da linha, pois a resistência R(ω) e a indutância L(ω) são calculadas por meio de séries numéricas. No entanto, Z(ω) pode ser descrita de maneira aproximada por meio de uma função racional, cujos pólos são todos reais e negativos e os resíduos são reais e positivos.

A referência [9] descreve um método baseado na determinação de uma função racional aproximada dos parâmetros longitudinais da linha $Z(\omega)_{fit}$ e posterior obtenção de um circuito elétrico equivalente composto por diversos elementos resistivos e indutivos configurados em série e paralelo. Por meio dessa técnica é possível inserir o efeito da frequência na modelagem por parâmetros discretos, no domínio do tempo e sem a utilização implícita ou explicita de transformadas inversas. A equação (1) mostra a função aproximada $Z(\omega)_{fit}$ e a Fig. 1 descreve o circuito equivalente a partir dessa mesma equação:

$$Z(\omega) \approx Z(\omega)_{fit} = R_0 + j\omega L_0 + \sum_{i=1}^{m} \frac{j\omega R_i}{j\omega + \frac{R_i}{L_i}} \qquad (1)$$

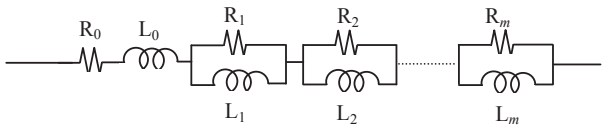

Figura 1. Circuito equivalente obtido a partir de $Z(\omega)_{fit}$.

Existem diversos métodos para obtenção das resistências e indutâncias do circuito equivalente da Fig. 1. No entanto, o *Vector Fitting* é um meio preciso e robusto [10].

C. Representação por equações de estado

Com base na representação discretizada dos parâmetros longitudinais da linha pelo método descrito anteriormente, a linha pode ser representada por meio de um circuito Γ. Considerando os parâmetros transversais da linha representados por C e G, capacitância e condutância, respectivamente, o circuito equivalente *k* da linha pode ser descrito como sendo:

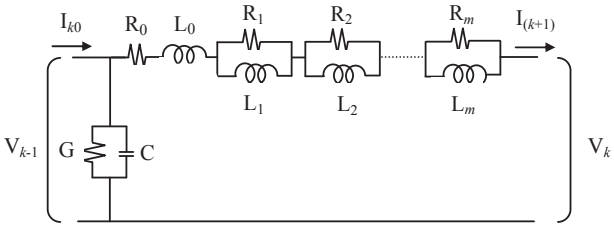

Figura 2. Representação da linha por um circuito Γ.

Com base no circuito equivalente, pode-se descrever um sistema de equações diferenciais no domínio do tempo. Esse sistema pode ser representado no espaço de estado e as correntes e tensões calculadas por meio de métodos de integração numéricos ou analíticos [4, 5].

III. Modelagem do Efeito Corona

Quando o potencial elétrico em um determinado ponto da linha excede o valor disruptivo do meio, o ar ao redor do condutor é ionizado devido à concentração de cargas nesse ponto. Esse fenômeno é chamado efeito corona e está diretamente ligado à capacitância transversal da linha.

A maioria dos modelos de linhas de transmissão incluindo o efeito corona são implementados a partir do conceito de que a capacitância transversal da linha/fase aumenta quando a tensão em um ponto especifico da linha excede o valor de limiar disruptivo, denominada tensão de limiar corona [11]. A partir desse principio, os modelos corona se enquadram em duas classificações:

a) A primeira classificação diz respeito à função que descreve a forma de onda da tensão, sendo o modelo classificado em *estático* ou *dinâmico*.

b) A segunda classificação está relacionada à curva q-v, a partir dessa característica o modelos pode ser descrito como *analógico* ou *analítico*.

A. Modelos estáticos e dinâmicos

Os modelos classificados como estáticos levam em consideração apenas as características da curva q-v, enquanto os modelos denominados dinâmicos consideram também o gradiente de tensão em função do tempo.

Dados experimentais mostram que os modelos dinâmicos são mais precisos que os estáticos [12].

B. Modelos analógicos e analíticos

Um modelo é classificado como analógico quando a curva q-v é aproximada por elementos discretos aplicados a teoria de circuitos elétricos, tais como: resistores, capacitores e chaves. No EMTP/ATP, esse tipo de modelo é inserido na representação de linhas de transmissão baseada em parâmetros discretizados, sendo o modelo equivalente corona acoplado a cada segmento da linha [13].

Os modelos analógicos de Wagner e de Kudyan e Shih são exemplos clássicos, sendo implementados no EMTP/ATP fazendo uso de capacitores, resistores e diodos [13]. Esses modelos apresentam, em muitos casos, oscilações numéricas devido ao chaveamento dos diodos utilizados na representação. Tal característica representa a principal desvantagem nesse tipo de modelo, no entanto, diversas técnicas podem ser utilizadas para mitigar esses efeitos [13].

Os modelos analíticos são caracterizados pela representação por elementos discretos e não lineares na aproximação da curva q-v. Geralmente, esses modelos são mais eficientes que os modelos analógicos, que muitas vezes são representados por mais de três componentes elétricos. Além disso, os modelos analíticos são representados por um ou dois elementos e são mais flexíveis na modelagem das características da curva q-v [13].

A facilidade no ajuste da curva q-v representa a principal vantagem dos modelos analíticos em relação aos analógicos, considerando que os elementos não lineares utilizados nesse tipo de modelagem podem ser representados por equações analíticas, o que torna a aproximação das características q-v mais precisas em comparação ao fenômeno real.

Um exemplo clássico de modelo analítico e dinâmico é o de Skilling-Umoto, sendo esse utilizado na representação do modelo corona desenvolvido nesse trabalho.

C. Modelo analítico e dinâmico de Skilling-Umoto

Um conhecido modelo analítico e dinâmico baseado na variação dos parâmetros transversais da linha é o de Skilling-Umoto [14-16]. Esse modelo é basicamente representado por uma capacitância e uma condutância transversais não lineares e variáveis com a tensão da linha, como descrito na Fig. 3:

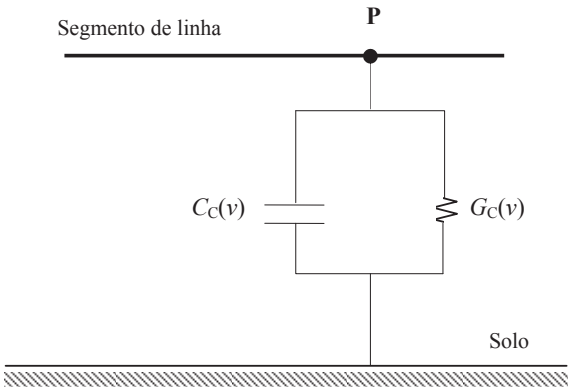

Figura 3. Representação do efeito corona em um segmento de linha.

As funções $Cc(v)$ e $Gc(v)$ são, respectivamente, a capacitância e condutância corona no ponto P da linha. Vale destacar que essas funções são variáveis em função da tensão descrita no ponto P. Dessa forma, a capacitância corona é expressa como:

$$Cc(v) = 2k_c\left(1 - \frac{V_c}{v}\right) \tag{2}$$

Em (2), o termo v é a tensão instantânea no ponto P da linha, V_c é a tensão de limiar corona e k_c é uma constante com base nos parâmetros geométricos do cabo metálico, descrita como:

$$k_c = \sigma_c\sqrt{\frac{r}{2h}}\ 10^{-11} \tag{3}$$

Sendo σ_c uma constante característica das perdas por corona aplicada à capacitância transversal, r é o raio do condutor metálico e h é a altura do cabo em relação ao solo. A magnitude da capacitância $Cc(v)$ é dada em F/m.

A condutância corona Gc representa as perdas por corona e é dada por:

$$Gc(v) = k_R\left(1 - \frac{V_c}{v}\right)^2 \tag{4}$$

A condutância corona é dada em S/m e a constante k_R expressa por:

$$k_R = \sigma_g\sqrt{\frac{r}{2h}}\ 10^{-11} \tag{5}$$

Sendo σ_g uma constante característica das perdas por corona aplicada à condutância transversal. Com base nas referências bibliográficas é possível verificar com maiores detalhes como σ_c e σ_g são obtidas [15, 16].

IV. Aplicação do Modelo Proposto

Inicialmente, considera-se uma linha de 100 km de extensão, composta por um único condutor metálico do tipo *grosbeak* com raio da secção transversal igual a 1.021 cm e altura média em relação ao solo igual a 12 m. A resistividade do solo é considerada ideal e igual a 1000 Ω.m.

A condutância transversal da linha é desconsiderada e a capacitância calculada com base nos dados geométricos da linha é igual a 7.14 ηF/km [2].

A impedância longitudinal da linha é calculada levando em consideração o efeito solo e pelicular e então sintetizada por meio do *Vector Fitting*. A tabela com os valores dos elementos R e L, os parâmetros calculados e sintetizados e o erro relativo entre eles são apresentados no apêndice em anexo. Verifica-se um erro relativamente pequeno entre os dois parâmetros, calculados e sintetizados, comprovando a precisão do método proposto.

O terminal emissor da linha é alimentado no instante inicial por um degrau ideal de tensão de 4 kV, modelado por uma chave S e uma fonte de tensão, e o terminal receptor encontra-se ligado a uma carga de alta impedância L, como esquematizado na Fig. 3. Tal configuração é proposta, pois representa uma condição crítica na geração de sobretensões ao longo da linha, possibilitando uma melhor visualização dos transitórios em diversos pontos do sistema.

As constantes de perdas por corona σ_c e σ_g são consideradas 30 e 20.10^6, respectivamente. A tensão de limiar corona é ajustada como sendo 5.5 kV. As constantes descritas aqui são dadas pela referência bibliográfica e foram obtidas por meio de dados empíricos, envolvendo diversas medições e experimentos práticos [16].

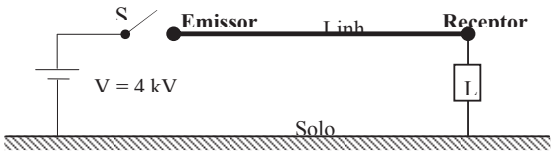

Figura 4. Esquema do sistema de transmissão utilizado nas simulações.

Sabe-se previamente que uma manobra de chaveamento representada por um degrau ideal é constituída principalmente por baixas frequências, até 100 Hz. Dessa forma propõe-se uma representação da linha por 50 elementos Γ configurados em cascata, quantidade suficiente para representação adequada da faixa de frequências em questão [5].

Na solução das equações de estado é utilizado o método numérico de integração trapezoidal, com um passo de cálculo 0.05 μs [7].

São apresentadas simulações por meio do modelo proposto com e sem a presença de uma descarga disruptiva por corona.

V. Perfil detalhado das tensões transitórias na linha

Nesta seção são apresentadas as sobretensões simuladas por meio da modelagem proposta em diversos pontos da linha, com e sem o efeito corona.

A Fig. 5 mostra o transitório de tensão em um ponto a 25 km do terminal emissor da linha. A curva 1 representa a simulação sem considerar o efeito corona e a curva 2 mostra o transitório de tensão decorrente do chaveamento e uma descarga disruptiva por corona.

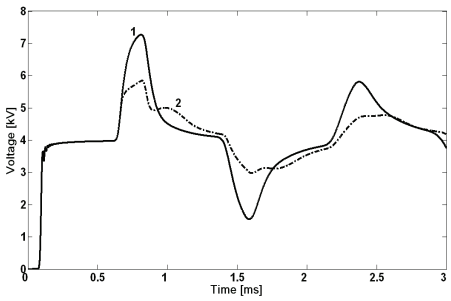

Figura 5. Transitório de tensão a 25 km do terminal emissor da linha: sem corona (curva 1) e com corona (curva 2).

As tensões nos pontos situados a 50 e 75 km do terminal emissor da linha são descritas nas figuras 6 e 7.

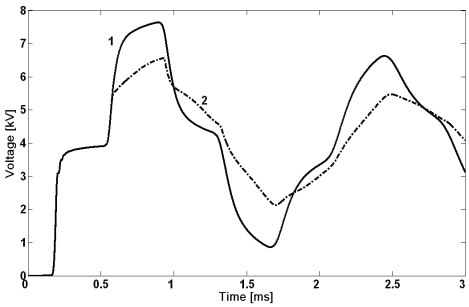

Figura 6. Transitório de tensão a 50 km do terminal emissor da linha: sem corona (curva 1) e com corona (curva 2).

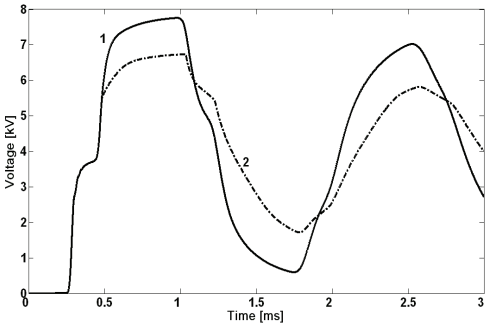

Figura 7. Transitório de tensão a 75 km do terminal emissor da linha: sem corona (curva 1) e com corona (curva 2).

Observa-se um pico de tensão mais acentuado sobre o terminal receptor da linha, como mostra a Fig. 7. De acordo com a teoria de linhas de transmissão, tal fato se deve a soma da onda de tensão incidente com a frente de onda refletida a partir do terminal receptor. Considerando que a carga L possui uma alta impedância, o coeficiente de reflexão nesse terminal da linha resulta em uma sobretensão aproximadamente duas vezes a tensão nominal da fonte [1].

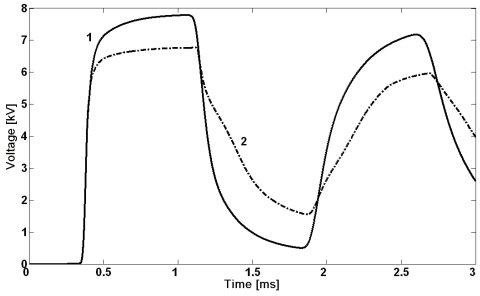

Figura 8. Transitório de tensão sobre o terminal receptor da linha: sem corona (curva 1) e com corona (curva 2).

Verifica-se uma atenuação considerável nos primeiros picos te tensão com a ocorrência da descarga disruptiva devido ao efeito corona, se comparada aos picos observados no perfil de tensão sem o efeito corona. Esse comportamento é esperado, uma vez que uma parcela considerável da energia

durante os transitórios eletromagnéticos é canalizada através da descarga disruptiva.

Os resultados apresentam concordância com os fundamentos teóricos e com os resultados descritos na base bibliográfica [14-16].

VI. Conclusões

O desenvolvimento apresentado mostra uma simples e eficaz modelagem para o estudo dos transitórios eletromagnéticos decorrentes de uma descarga devido ao efeito corona em linhas de transmissão.

O modelo é desenvolvido diretamente no domínio do tempo fazendo uso de elementos discretos, o que torna a representação prática e flexível na representação de outros dispositivos e fenômenos não lineares acoplados à linha. Além disso, o modelo não faz uso explicito ou implícito de transformadas inversas, o que representa uma grande vantagem em relação aos modelos implementados no domínio da frequência.

Os resultados mostram-se coerentes e de acordo com o embasamento teórico do trabalho. Ademais, diversas técnicas eficazes, já bem conceituadas em outros trabalhos, são utilizadas para o desenvolvimento do modelo proposto, assegurando sua precisão nos resultados obtidos.

Apêndice

Na tabela I são relacionados os valores dos elementos resistivos e indutivos utilizados na síntese dos parâmetros de acordo com a função descrita por (1) e com o circuito equivalente da Fig. 1.

TABELA I
Elementos utilizados na síntese dos parâmetros

Resistência (Ω)		Indutância (mH)	
R'_0	0.082	L'_0	1.557
R'_1	3.8661	L'_1	0.0025
R'_2	0.7063	L'_2	0.0065
R'_3	0.1814	L'_3	0.0168
R'_4	0.0667	L'_4	0.0269

As figuras de 9 e 11 mostram os gráficos das resistências e indutâncias longitudinais, respectivamente, calculadas e sintetizadas. As figuras 10 e 12 descrevem o erro relativo entre os parâmetros calculados e sintetizados.

Verifica-se um erro relativo máximo menor que 4% considerando as resistências longitudinais calculadas e sintetizada. O erro máximo relacionando as indutâncias longitudinais é menor que 0.2%.

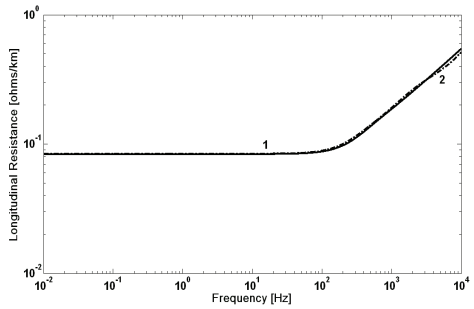

Figura 9. Resistência longitudinal calculada (curva 1) e sintetizada (curva 2).

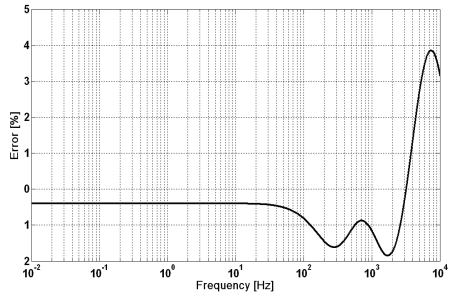

Figura 10. Erro relativo entre a resistência calculada e sintetizada.

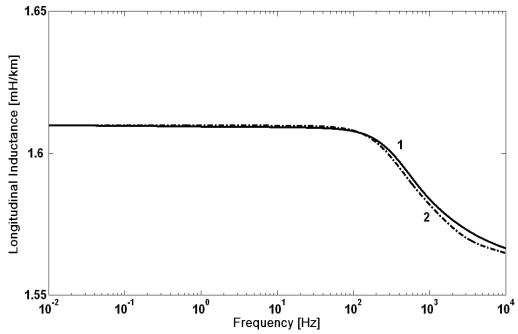

Figura 11. Indutância longitudinal calculada (curva 1) e sintetizada (curva 2).

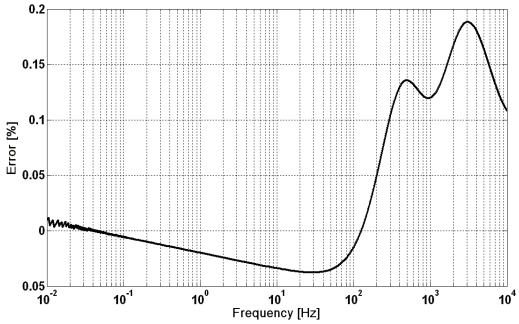

Figura 12. Erro relativo entre a indutância calculada e sintetizada.

Agradecimentos

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Cientifico e Tecnológico (CNPq).

REFERÊNCIAS

[1] R. D. Fuchs, *Transmissão de Energia Elétrica: Linhas Aéreas; Teoria das Linhas em Regime Permanente*, Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Cientificos, 1979.

[2] M. A. Freitas, S. Kurokawa, J. Pissolato. "Inclusão do efeito corona em linhas de transmissão considerando o efeito da frequência sobre os parâmetros longitudinais", in Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos - SBSE, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil, 2008.

[3] E. C. M. Costa, S. Kurokawa, J. Pissolato, A. J. Prado, L. F. Bovolato. "A model for bundled conductors considering a non-homogeneous distribution of the current through subconductors", *Revista IEEE América Latina*, vol. 8, pp. 221-228, 2010.

[4] S. Kurokawa, E. C. M. Costa, J. Pissolato, J. A. Prado, L. F. Bovolato."Proposal of a transmission line model based on lumped elements: an analytic solution", *Electric Power Components & Systems*, vol. 38, pp. 1577-1594, 2010.

[5] E. C. M. Costa, S. Kurokawa, J. Pissolato, A. J. Prado. "Efficient procedure to evaluate electromagnetic transients on three-phase transmission lines", *IET Generation Transmission and Distribution*, vol. 4, pp. 1069-1081, 2010.

[6] J. A. R. Mácias, A. G. Expósito, A. B. Soler. "Comparison of techniques for state-space transients analysis of transmission lines", *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 20, n. 2, pp. 894-903, 2005.

[7] H. W. Dommel, "Electromagnetic Transients Program Reference Manual". Dept. of Electrical Engineering, University of British Columbia, Vancouver, Canada, 1986.

[8] L. M. Wedepohl, H. V. Nguyen, G. D. Irwin. "Frequency-Dependent Transformation Matrices for Untransposed Transmission Lines Using Newton-Raphson Method", *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 11, n. 3, pp 1538-1546, 1996.

[9] B. Gustavsen, A. Semlyen. "Rational approximation of frequency domain response by vector fitting", *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 14, n. 3, pp. 1052-1061, 1999.

[10] 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 Proc *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Montreal, Quebec, 2001.

[11] M. S. Mamis, "State-space transient analysis of single-phase transmission lines with corona", in Proc *International Conference on Power Systems Transients–IPST'03*, New Orleans, USA, 2003.

[12] J. L. Naredo, A. C. Soudack, J. R. Martí. "Simulation of transmission lines with corona via method of characteristics", *IEE Proc. Generation Transmission and Distribution*, vol. 142, pp. 81-87, 1995.

[13] S. Carneiro, J. R. Martí. "Evaluation of corona and line models in electromagnetic transients simulations". *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 6, pp 334-342, 1991.

[14] H. H. Skilling, P. K. Dykes. "Distortion of traveling waves by corona", *Trans. of American Institute of Electrical Engineers*, vol. 56, pp 850-857, 1937.

[15] J. Umoto, T. Hara. "Numeric analysis of surge propagation on single-conductor systems considering corona losses", *Electrical Engineers of Japan*, vol. 89, pp. 21-28, 1969.

[16] K. C. Lee. "Non-linear corona models in na electromagnetic transients program (EMTP)", *IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems*, vol. 102, pp. 2936-2942, 1983.

Eduardo Coelho Marques da Costa é graduado em engenharia elétrica (2005). Mestre em engenharia elétrica pela Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira (UNESP) e atualmente realizando o doutorado na Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP). Suas principais áreas de pesquisa são: modelagem de sistemas de potência para análise de transitórios eletromagnéticos, alta tensão e compatibilidade eletromagnética.

Sérgio Kurokawa é graduado em engenharia elétrica (1990). Desde 1994 é professor da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira (UNESP). Doutor pela Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP). Suas principais áreas de pesquisa são: transitórios eletromagnéticos em sistemas de potência e modelagem de linhas de transmissão.

José Pissolato Filho é doutor pela "Université Paul Sabatier", França (1986) e atualmente professor titular da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP). Responsável pelo Laboratório de Alta Tensão da Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação (LAT/FEEC). Suas principais áreas de pesquisa são: modelagem de sistemas de potência para análise de transitórios eletromagnéticos, alta tensão e compatibilidade eletromagnética.