

Evaluation of Methods for Electric Field Calculation in Transmission Lines

M. Corso, S. Stefenon, V. Couto, S. Cabral, *Member, IEEE*, and A. Nied, *Member, IEEE*

Abstract—This paper has the purpose of evaluating the application of computer simulation methods for characterizing the distribution of the electric field generated by power transmission lines. Analysis through computer simulation with the charge simulation method and the finite element method are performed for a comparison with measured practical data obtained from a 525 kV power transmission line, located in the Southern area of Brazil. The comparison methodology is quantitative and based on concepts of the literature. The results show a difference between the methods, and this difference can characterize the limiting exposure to the electric field, as is show in this paper.

Index Terms—Finite Elements, Electric Field, Simulation Software.

I. INTRODUÇÃO

DEVIDO ao contínuo crescimento da demanda por energia, em função do aumento populacional e o crescente acesso a bens de consumo, que necessitam de energia elétrica, há a necessidade permanente de expansão do sistema elétrico [1]. Por sua vez, a construção de mais linhas de transmissão torna a população cada vez mais exposta aos efeitos que o convívio com linhas de transmissão podem trazer [2], [3].

As linhas de transmissão de energia geram campos elétricos e magnéticos em seu entorno que podem ser nocivos para o ser humano [4], [5]. Dessa forma, é muito importante ter isto em consideração na elaboração de projetos de linhas, atendendo, por exemplo, às indicações de [6] em que o nível máximo de exposição a campo elétrico seja de 4,17 kV/m. Tal análise deve ser feita antes da linha ser construída, através de cálculos de campos elétrico e magnéticos [7]. Esses, por sua vez, se tornam mais práticos e confiáveis se feitos por métodos numéricos, com o auxílio de computador, embora cálculos analíticos

Este trabalho teve suporte da Secretaria do Estado de Santa Catarina (SED) através de bolsa de estudo para um dos autores (Artigo 170) de Iniciação a Pesquisa junto a Fundação da Universidade do Planalto Catarinense.

M. P. Corso, aluno do curso de Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade do Planalto Catarinense, Lages, Brazil. (e-mail: corso@uniplaclages.edu.br).

S. F. Stefenon, aluno do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (doutorado), Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville, Brazil. (e-mail: stefano@uniplaclages.edu.br).

V. F. Couto, aluno do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (doutorado), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brazil.

S. H. L. Cabral, professor-pesquisador de tempo integral no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Fundação Universidade Regional de Blumenau, Blumenau, Brazil.

A. Nied, professor Associado do Departamento de Engenharia Elétrica no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville, Brazil.

também sejam aplicáveis, ainda que com resultados com menor precisão [8].

Então, neste trabalho será apresentada a aplicação de alguns métodos numéricos utilizados para a determinação do perfil de campo elétrico transversal de uma linha de transmissão, comparando os valores simulados com os valores obtidos em medições realizadas em campo. As simulações computacionais foram realizadas no software Comsol®, que se baseia no método dos elementos finitos [9], e MatLab®, no qual foi desenvolvido um algoritmo baseado no método de simulação de cargas [10], demonstrando a aplicabilidade dos métodos para auxiliar na etapa de projeto de novas linhas.

II. MÉTODO DE CÁLCULO DE CAMPOS ELÉTRICOS

A. Conceitos Iniciais

Em torno de uma linha de transmissão, o valor do campo elétrico, em cada ponto, tem sua amplitude variando senoidalmente, e seu módulo depende do nível de tensão e da frequência de operação da linha [11]. Pelo fato das linhas serem trifásicas, cada fase contribui com uma componente espacial de campo [12]. Por sua vez, por haver um defasamento da ordem de 120 graus entre as fases, essas componentes se somam não somente no espaço, mas também no tempo, resultando num fasor que assumirá a cada instante, diferentes intensidades e direções [13].

Qualquer que seja o método a ser empregado, o cálculo de campo elétrico se dá a partir da equação de Laplace e satisfazendo determinadas condições de fronteira. Inicialmente, métodos de solução analítica são aplicáveis. Por exemplo, o método de simulação de cargas, também baseado no método das imagens e que consiste em substituir a distribuição real de cargas, localizada na superfície do condutor, por linhas de carga fictícias, localizadas no interior do condutor [14].

Neste caso, o equacionamento para o cálculo de campo elétrico se dá com base na teoria do eletromagnetismo e a obtenção de gráficos se torna mais prática com o uso de computador. Alternativamente, são hoje mais frequentemente aplicados os métodos numéricos de cálculo de campo elétrico.

Em todo o caso, em geral se considera que, para o cálculo do campo elétrico são desconsideradas as distorções causadas pelas torres, estando os cabos horizontalmente paralelos. Também é considerado que o solo seja plano e perfeitamente condutor [13].

Análiticamente, pelo método de simulação de cargas, o processo de cálculo se divide em duas partes. Na primeira, se definem as cargas por unidade de comprimento, considerando o efeito das capacitâncias mutuas e próprias entre/dos condutores [10]. Na segunda, o cálculo vetorial do campo

elétrico, a partir dos valores de carga obtidos, através da aplicação da lei de Gauss, do princípio da superposição e do método das imagens.

Computacionalmente, pelo método dos elementos finitos, também se aplicam princípios específicos deste método para se calcular o campo elétrico [15].

B. Cargas por Unidade de Comprimento

A determinação de valores das cargas pode se dar a partir do conceito de capacitância, que é uma constante de proporcionalidade entre o potencial elétrico aplicado e a carga, Q, acumulada. A capacitância é uma grandeza de natureza geométrica e material dos elementos envolvidos. No caso de uma linha, o diâmetro, a altura e a distância entre condutores, bem como o ar como meio envolvente, com permissividade dielétrica relativa igual à unidade [16].

$$C = \frac{Q}{V} \text{ ou } Q = CV \tag{1}$$

Considerando os condutores com comprimento infinito, se torna prático definir a carga por unidade de comprimento e assim as capacitâncias próprias e mútuas. Dado que existem vários condutores, pode-se reescrever (1) em sua forma matricial [14].

$$[Q] = [C][V] \tag{2}$$

C. Matriz de Capacitâncias

A matriz de capacitâncias é definida a partir do conceito de potencial de cada ponto ao redor da linha e, conforme mostrado na Fig. 1, pode ser calculada por (3) para as capacitâncias próprias e (4) para capacitâncias mútuas (entre linhas).

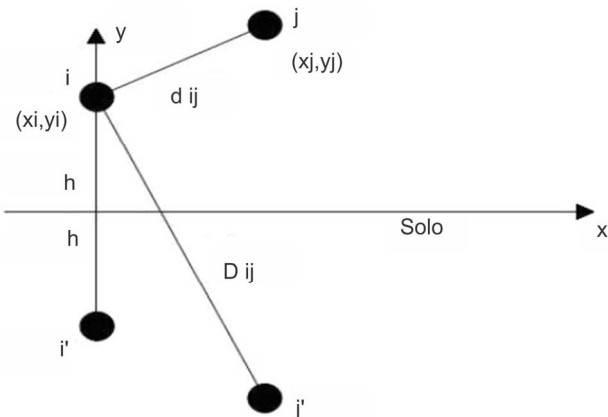


Fig. 1. Representação básica do método das imagens [17].

$$C'_{i,i} = \frac{Q'}{V} = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln\left(\frac{2h}{R_i}\right)} \tag{3}$$

$$C'_{i,j} = \frac{Q'}{V} = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln\left(\frac{D_{ij}}{d_{ij}}\right)} \tag{4}$$

Os condutores das linhas de transmissão estão a uma altura *h* do solo. Desta forma o método das imagens nos impõe a

inserção para um condutor *q*, uma carga $-q$ situada a uma distância $-h$ da superfície [17], conforme a Fig. 1.

As distâncias d_{ij} e D_{ij} são definidas baseando-se no método das imagens [14] já que o solo é considerado um condutor ideal [18], enquanto ϵ_0 é a permissividade dielétrica do ar, 8,85 pF/m.

Em casos especiais, em que a linha de transmissão apresenta vários condutores iguais por fase, adota-se um raio equivalente para o feixe, simplificando a aplicação do método. [19], onde este raio equivalente é definido a partir de (5):

$$R_i = \sqrt[m]{m r_{mg} \left(\frac{d}{2 \sin(\pi/m)}\right)^{m-1}} \tag{5}$$

Sendo *d* é a distância entre condutores, *m* é o número de condutores, r_{mg} é o raio geométrico.

D. Matriz de Potencial

A matriz V apresentará o potencial elétrico de cada um dos condutores, fasorialmente. Em um sistema trifásico equilibrado, esses potenciais estão defasados em 120° entre si, de forma que seus valores podem ser obtidos, ao longo do tempo, pelas seguintes expressões:

$$V(t)_i = V \text{ sen}(\omega t) \tag{6}$$

$$V(t)_j = V \text{ sen}(\omega t + 120^\circ) \tag{7}$$

$$V(t)_k = V \text{ sen}(\omega t - 120^\circ) \tag{8}$$

A variação dos potenciais no tempo é determinada a partir de uma discretização do tempo de simulação por pequenos intervalos iguais de forma a tornar possível uma aplicação numérica e a definição de uma matriz de tensões.

Os cabos de guarda, os quais estão localizados acima dos condutores fase, são definidos com potencial nulo.

E. Cálculo dos Campos Elétricos

O campo elétrico é calculado considerando as premissas anteriormente listadas para as linhas de carga consideradas como infinitas e perpendiculares ao plano x e y de forma que se pode calcular o campo elétrico a partir da lei de Gauss, onde *r* é a distância entre o ponto calculado e a linha de cargas e \vec{u}_r o vetor unitário.

$$\vec{E} = \frac{Q}{2\pi\epsilon r} \vec{u}_r \tag{9}$$

As contribuições de componentes de campo elétrico são calculadas sobre os dois, de forma separada, considerando imagem de cargas para representar a presença do solo. Baseando-se na Fig. 2, se pode calcular então o valor do campo elétrico em um ponto qualquer.

Para a simulação de um caso real se adota uma sequência de pontos de um perfil transversal da linha, separados de maneira simétrica ao longo de um eixo horizontal e a uma altura de 1 metro em relação ao solo.

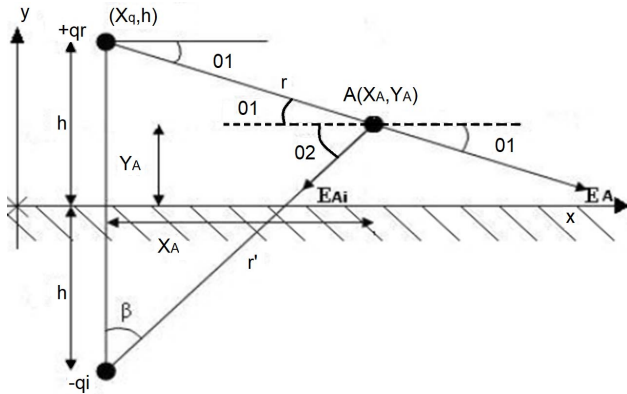


Fig. 2. Campo elétrico em um ponto A considerando o efeito do solo [17].

Considerando o modelo acima o campo elétrico em x e em y será definido como:

$$E_x = \frac{Q(x_A - x_q)}{2\pi\epsilon[(x_A - x_q)^2 + (y_A - h)^2]} - \frac{Q(x_A - x_q)}{2\pi\epsilon[(x_A - x_q)^2 + (y_A + h)^2]} \quad (10)$$

$$E_y = \frac{Q_i(y_A - h)}{2\pi\epsilon[(x_A - x_q)^2 + (y_A - h)^2]} - \frac{Q_i(y_A + h)}{2\pi\epsilon[(x_A - x_q)^2 + (y_A + h)^2]} \quad (11)$$

As componentes horizontais e verticais são calculadas pelo somatório das contribuições de todos os condutores (i, j, k, \dots) [19].

$$E_{x,A} = \sum_i E_{x,i} \quad (12)$$

$$E_{y,A} = \sum_i E_{y,i} \quad (13)$$

$$E_A = \sqrt{(E_{x,A})^2 + (E_{y,A})^2} \quad (14)$$

F. Método dos Elementos Finitos

O método dos elementos finitos requer limitação e a discretização do sistema físico formulando assim malhas que, em sistemas de duas dimensões, é constituída normalmente por triângulos ou quadriláteros [19], sendo os vértices destas estruturas os nós [21], de forma a procurar definir o potencial elétrico V nestes nós e a partir disto definir o campo elétrico [11].

Sendo que para uma aplicação em problemas de eletrostática, como no caso de linhas de transmissão, o método se baseia nas seguintes equações [22].

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \rho \quad (15)$$

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad (16)$$

O parâmetro de simulação do número de nós foi a utilização do tamanho de elementos no modo fino no software em formato de malha. A partir desta configuração o software determina de modo automático o tamanho dos elementos dependendo de sua geometria.

III. LINHA DE TRANSMISSÃO ADOTADA

A linha de transmissão a ser analisada está localizada entre os municípios de Biguaçu/SC e Blumenau/SC e é operada pela Eletrosul Centrais Elétricas S.A, com tensão de 525 kV, quatro condutores por fase CAA (Condutor de alumínio com alma de aço) Grosbeak 636 kmil 26/7 espaçados 457 mm [23], e dois cabos de guarda, conforme mostrado na Fig. 3.



Fig. 3. Linha de transmissão analisada.

Uma redução no valor de impedância característica, através do aumento das capacitâncias e redução das indutâncias, causa o aumento da potência natural a ser transmitida. As deformações dos cabos instalados em linhas de transmissão são causadas pelo próprio peso, formando uma catenária [18].

As características geométricas dos condutores e da linha são apresentadas na Fig. 4, para a qual foi considerada a flecha máxima alcançada pela catenária entre as duas torres e os condutores de fase foram generalizados para condutores equivalentes conforme (8) e (9).

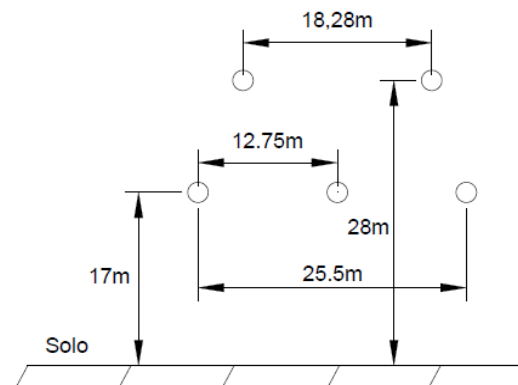


Fig. 4. Características espaciais dos condutores.

IV. ANÁLISE DE DADOS

A. Método Analítico Aplicado

O cálculo dos campos elétricos deve ser realizado considerando o módulo entre as contribuições na coordenada X e na coordenada Y [19]. As simulações são realizadas ao longo de um perfil transversal a linha, considerando as máximas contribuições ao longo de um período respectivo na frequência de 60 Hz e adotando uma distância de 50 metros a partir do

centro da linha conforme mostrado na Fig. 5 em relação ao Método de Simulação de Cargas (MSC).

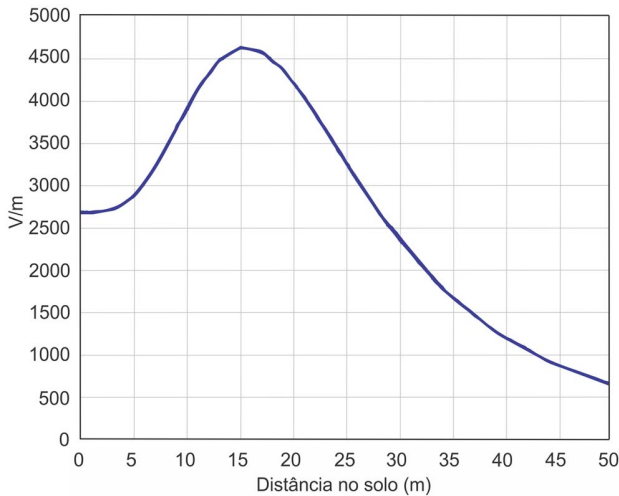


Fig. 5. Campo elétrico simulado pelo MSC.

Uma das principais características do cálculo realizado consiste em variar o perfil no tempo [24], recalculando o campo elétrico e considerando a defasagem entre os potenciais de cada fase e suas diferentes intensidades.

Foram então considerados 100 intervalos iguais de tempo dentro de um intervalo de um ciclo de 60 Hz. Ou seja, aproximadamente 16,6 ms, esta discretização pode ser visualizada na Fig. 6.

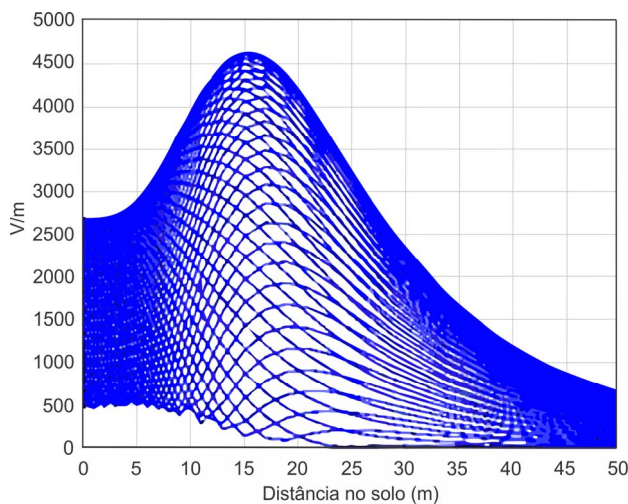


Fig. 6. Campos elétricos simulados em função da discretização de tempo pelo Método de Simulação de Cargas.

B. Simulação com Elementos Finitos

Para a simulação com os elementos finitos necessitou-se a definição de algumas condições básicas buscando aproximar-se ao sistema físico real [25], sendo que os condutores das fases também foram generalizados conforme (4).

Foram definidos dois materiais para compor o sistema sendo eles alumínio para os condutores, os quais foram adotados como perfeitamente circulares e foi adotado o ar para o restante do domínio.

Sendo o solo considerado perfeitamente plano e um condutor perfeito e os potenciais definidos em função do tempo a fim de apresentar todas as contribuições em um intervalo de tempo determinado. O campo elétrico simulado na linha de transmissão considerando as máximas contribuições do centro da linha até sua extremidade é apresentado na Fig. 7.

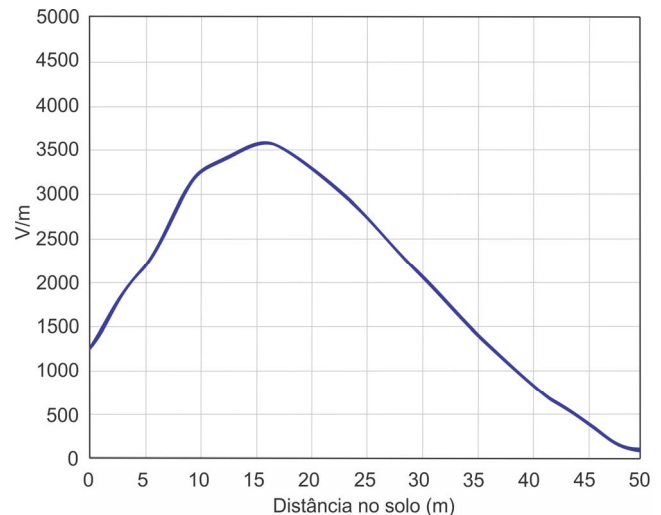


Fig. 7. Campo elétrico simulado pelos elementos finitos.

Foram definidos dentro de um período de 60 Hz, 100 discretizações de campo a fim de demonstrar as consecutivas contribuições em função do tempo conforme Fig. 8.

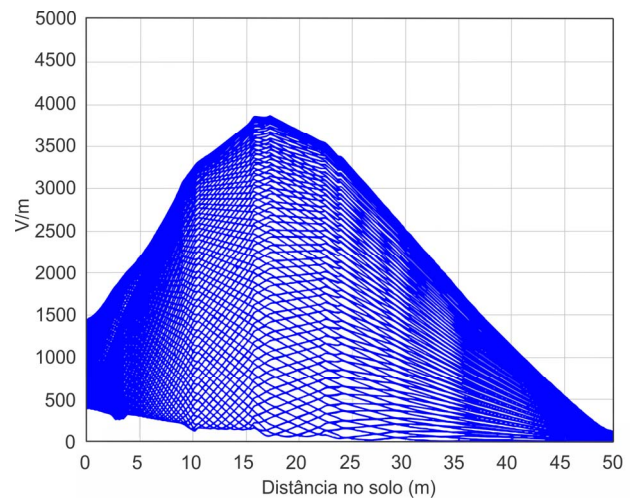


Fig. 8. Campos elétricos simulados em função da discretização de tempo pelo método dos elementos finitos.

C. Medições em Campo

As medições dos campos elétricos abaixo da linha de transmissão foram realizadas de acordo com [26] onde foi utilizado o equipamento ETS-Lindgren's Model HI-3638 VLF/ELF Electric Field Meter [27].

As medições foram realizadas considerando uma altura de 1m em relação ao solo e uma faixa transversal da linha de transmissão considerando uma distância de 50m a partir do condutor central da linha. A área de medição não apresentava outras redes de energia elétrica, pessoas ou automóveis,

excluindo assim possíveis interferências no cálculo desempenhado.



Fig. 9. Equipamento utilizado para a medição de campos elétricos ETS [13].

As medições foram realizadas considerando dois eixos assim em cada ponto duas medições em função da direção em que era posicionado o equipamento, horizontalmente ou verticalmente. A resultante dos campos elétricos foi calculada a partir:

$$E_{r_{ponto}} = \sqrt{E_{horiz}^2 + E_{vertical}^2} \quad (17)$$

A partir das medições realizadas foi formulado um gráfico demonstrando a variação do campo elétrico resultante ao longo das distâncias o qual é caracterizado conforme mostrado na Fig. 10.

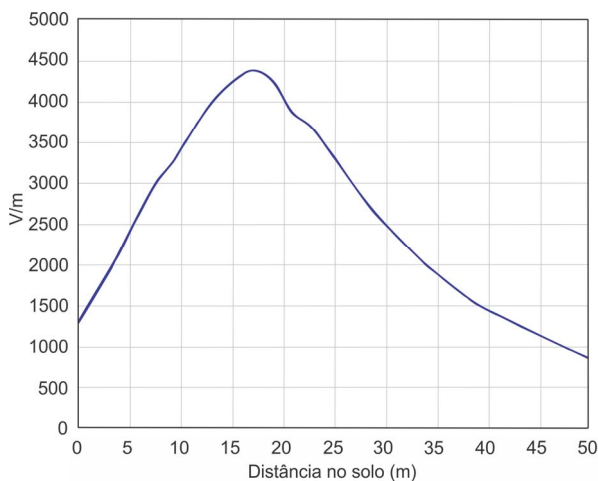


Fig. 10. Perfil de campo apresentado pelas medições.

D. Análise de Precisão do Método Aplicado

Como o equipamento realiza a medição considerando valores eficazes, também serão utilizados valores eficazes na simulação. A fim de avaliar a precisão dos métodos aplicados foi realizado o cálculo do erro ao longo dos pontos medidos a

fim de constatar a validade do método apresentado a ser utilizado em projetos do gênero [28].

E conforme [6] também serão avaliados os valores simulados e medidos em função do nível máximo recomendado de exposição humana a campos elétricos.

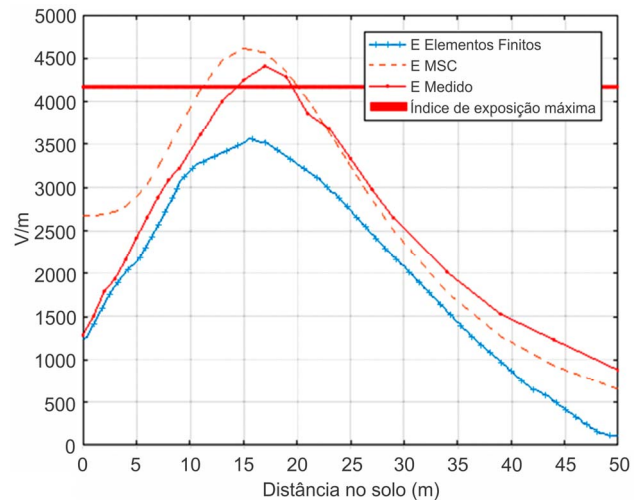


Fig. 11. Campo elétrico simulado e campo elétrico medido.

O erro médio apresentado foi de 21.4467% para o MSC e de 19.6% para o MEF, conforme Figs. 12 e 13, respectivamente. Utilizando o MSC nota-se que nos primeiros metros do perfil a discrepância alcançou 115%, onde segundo a simulação demonstrada na Fig. 10 a intensidade do campo elétrico seria maior do que a medição realizada.

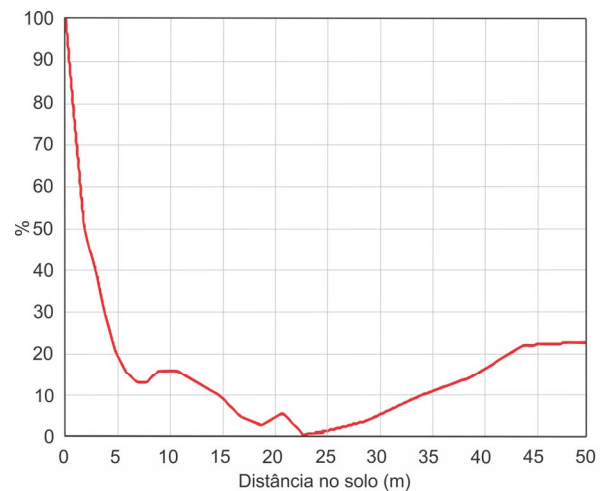


Fig. 12. Erro apresentado ao longo da distância – MSC.

Essa menor intensidade do campo elétrico no centro da linha de transmissão se dá pelo fato de que a componente X do campo quanto mais se aproximar do centro da linha, menor é sua intensidade até que no ponto 0 metros ela se anulará e será apresentada somente a componente Y, todavia a componente se mostra muito menor ao que foi calculado pela simulação. O MEF apresentou um erro menor no centro da linha do que o MSC, todavia apresentou seus maiores erros entre os 40 a 50

metros. A medição se mostrou maior que o valor simulado, pela existência de um pequeno acrílico no terreno onde foram realizadas as simulações. Na generalidade as discrepâncias podem ser explicadas por se ter considerado um solo de condução perfeita, plano e horizontal e de extensão infinita [29].

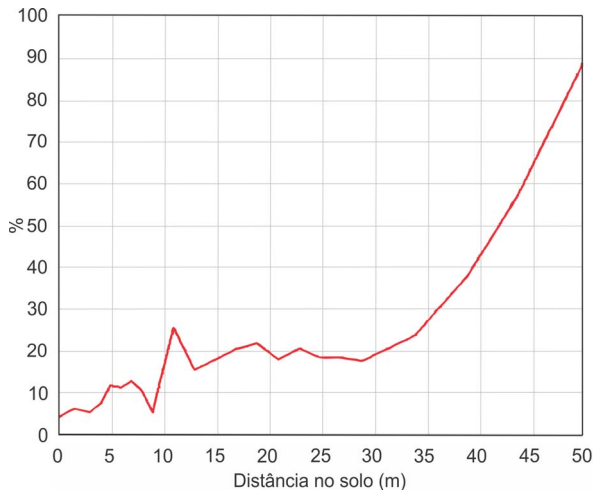


Fig. 13. Erro apresentado ao longo da distância – MEF.

V. CONCLUSÃO

Pode-se constatar que o desenvolvimento de um algoritmo utilizando o MEF apresenta um perfil aproximado ao do medido. Inclusive o erro acumulado no MEF é inferior ao MSC que é utilizado tradicionalmente.

Demonstrou-se a possibilidade da utilização destas ferramentas como alternativa plausível no auxílio para o desenvolvimento de um projeto de linhas de transmissão, ou mesmo para avaliar a intensidade do campo elétrico no seu entorno.

O MEF mostrou-se, do ponto de vista operacional interessante, pois não necessita de desenvolvimento de algoritmo específico, apenas do conhecimento do sistema físico simulado e da incorporação do elemento a ser avaliado, mostrando-se assim uma ferramenta ágil para realizar a solução deste tipo de problema.

Os métodos apresentaram erros acentuados em alguns pontos, que podem ser corrigidos aprimorando as simulações de forma a reduzir as generalizações e simplificações assim, aproximando mais a aplicação do modelo real.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer a Secretaria do Estado de Santa Catarina (SED) pelo fomento do projeto realizado a partir do edital 006/2017 do Artigo 171 de bolsas de Iniciação à Pesquisa junto a Fundação da Universidade do Planalto Catarinense.

REFERÊNCIAS

[1] L. Costa and V. Monteiro, "Minimização do Campo Magnético em Linhas de Transmissão", 2017.

- [2] I. Malíková and L. Janoušek, "Non-thermal effects of low-frequency electromagnetic field on biological cells," *2014 ELEKTRO*, Rajecké Teplice, 2014, pp. 599-602. doi: 10.1109/ELEKTRO.2014.6848968.
- [3] H. Das, K. Gogoi and S. Chatterjee, "Analysis of the effect of electric field due to High Voltage Transmission lines on humans," *2015 1st Conference on Power, Dielectric and Energy Management at NERIST (ICPDEN)*, Itanagar, 2015, pp. 1-4. doi: 10.1109/ICPDEN.2015.7084491.
- [4] J. L. Phillips, "Biological effects of electromagnetic field exposure: The issues of threshold and credibility," *1992 14th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, Paris, France, 1992, pp. 2876-2876. doi: 10.1109/IEMBS.1992.5761737.
- [5] H. Das, K. Gogoi and S. Chatterjee, "Analysis of the effect of electric field due to High Voltage Transmission lines on humans," *2015 1st Conference on Power, Dielectric and Energy Management at NERIST (ICPDEN)*, Itanagar, 2015, pp. 1-4. doi: 10.1109/ICPDEN.2015.7084491.
- [6] "Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric and Magnetic Fields (1Hz to 100 KHz): Erratum", *Health Physics*, vol. 100, no. 1, p. 112, 2011.
- [7] A. Jambula, V. Lakdawala and P. Basappa, "Electric Field Analysis of Complex Electrode System for Use in Electrical Measurements," *Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, Quebec, QC, 2008, pp. 341-344. doi: 10.1109/CEIDP.2008.4772937.
- [8] S. E. Lyshevski, "Analytic solutions to Maxwell's equations: sinusoidal steady-state and transient space-time problems in transverse magnetic and transverse electric field analysis," *MMET Conference Proceedings. 1998 International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory. (Cat. No.98EX114)*, Kharkov, 1998, pp. 88-91 vol.1. doi: 10.1109/MMET.1998.709688.
- [9] M. Kumar, M. S. Bhaskar, S. Padmanaban, P. Siano, F. Blaabjerg and Z. Leonowicz, "Electric field analysis of extra high voltage (EHV) underground cables using finite element method," *IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2017 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe*, Milan, 2017, pp. 1-4. doi: 10.1109/EEEIC.2017.7977883.
- [10] M. Kiruthika and R. V. Maheswari, "Electric field analysis of composite Insulators under dry condition using Charge Simulation method," *International Conference on Energy Efficient Technologies for Sustainability*, Nagercoil, 2016, pp. 609-612. doi: 10.1109/ICEETS.2016.7583826.
- [11] D. Bodilovska, D. Nozaki and E. Baek, "Analysis of electric field and electrostatic potential distributions in porphyrin-coated silicon nanowire field-effect transistors," *2014 IEEE 34th International Scientific Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO)*, Kyiv, 2014, pp. 119-122. doi: 10.1109/ELNANO.2014.6873950.
- [12] F. P. Espino-Cortés, I. Ramírez-Vázquez and P. Gómez, "Electric field analysis of spacer cable systems under polluted conditions," *2014 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC)*, Philadelphia, PA, 2014, pp. 231-234. doi: 10.1109/EIC.2014.6869382.
- [13] D. Deno, "Transmission line fields", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. 95, no. 5, pp. 1600-1611, 1976.
- [14] H. Singer, H. Steinbigler and P. Weiss, "A Charge Simulation Method for the Calculation of High Voltage Fields", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. -93, no. 5, pp. 1660-1668, 1974.
- [15] "Introdução ao método de elementos finitos aplicado ao eletromagnetismo para estudantes de engenharia elétrica", *Unoes & Ciência-ACET*, vol. 6, no. 1, pp. 75-82, 2015.
- [16] D. Griffiths, *Eletrodinâmica*. São Paulo: Pearson Addison Wesley, 2011.
- [17] G. Valencia, D. Fernando, R. Domínguez and J. Catalina, "Cálculo del campo eléctrico bajo líneas de transmisión", *Trabalho de Conclusão de Curso*, Universidad Tecnológica de Pereira, 2008.
- [18] Santos, C. Henrique, R. Silva and C. Tenorio C., "A MatLab based software for measument of transmission line fields", *ISGT 2011*, 2011.
- [19] R. Aguiar de Morais Sarmento, "Electric and Magnetic Fields in Overhead Power Transmission Lines", *IEEE Latin America Transactions*, vol. 10, no. 4, pp. 1909-1915, 2012.

- [20] R. Silva, L. Bovolato, S. Oliveira and A. Prado, "Análise eletrostática por elementos finitos utilizando Toolbox Matlab®", 2008.
- [21] S. L. Gonzaga de Oliveira, M. Kischinhevsky and D. Burgarelli, "Finite Volume adaptive mesh refinement based on graph applied to the Boundary Layer Problem," in *IEEE Latin America Transactions*, vol. 9, no. 1, pp. 836-842, March 2011. doi: 10.1109/TLA.2011.5876428
- [22] C. C. McIntyre and W. M. Grill, "Current density and electric field analysis of microelectrodes using finite element modeling," *Proceedings of the 22nd Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, Chicago, IL, 2000, pp. 2010-2011 vol.3. doi: 10.1109/IEMBS.2000.900491.
- [23] S. Frizzo Stefenon, J. R. de Oliveira, A. S. Coelho and L. H. Meyer, "Diagnostic of Insulators of Conventional Grid Through LabVIEW Analysis of FFT Signal Generated from Ultrasound Detector," in *IEEE Latin America Transactions*, vol. 15, no. 5, pp. 884-889, May 2017.
- [24] L. F. Bastos and J. M. R. S. Tavares, "Objects Matching using Optimization Techniques," in *IEEE Latin America Transactions*, vol. 3, no. 2, pp. 193-204, April 2005. doi: 10.1109/TLA.2005.1642404
- [25] A. Khaligh and M. Vakilian, "Power Transformers Internal Insulation Design Improvements Using Electric Field Analysis Through Finite-Element Methods," in *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 44, no. 2, pp. 273-278, Feb. 2008. doi: 10.1109/TMAG.2007.912771.
- [26] "IEEE Standard Procedures for Measurement of Power Frequency Electric and Magnetic Fields From AC Power Lines", 1995.
- [27] LF / VLF Electric Field Meter User Manual. ETS-Lindgren, 2016.
- [28] H. Okubo, M. Ikeda, M. Honda and T. Yanari, "Electric Field Analysis by Combination Method," in *IEEE Power Engineering Review*, vol. PER-2, no. 10, pp. 56-56, Oct. 1982. doi: 10.1109/MPER.1982.5519920.
- [29] A. F. Licario Nogueira, "Analysis of magnetic shielding problems using finite elements," in *IEEE Latin America Transactions*, vol. 10, no. 5, pp. 2132-2137, Sept. 2012. doi: 10.1109/TLA.2012.6362358.



Marcelo Picolotto Corso possui ensino-médio segundo-grau pela Padre Efrem (2012). Tem experiência na área de Engenharia Elétrica, atualmente bolsista de pesquisa do Artigo 171 de bolsas de Iniciação à Pesquisa da Secretaria do Estado de Santa Catarina (SED) na Universidade do Planalto Catarinense.



Stéfano Frizzo Stefenon possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Regional de Blumenau (2012), especialização em Engenharia de Segurança do Trabalho pela Universidade do Planalto Catarinense, mestrado em Engenharia Elétrica (Sistemas de Potência) pela Universidade Regional de Blumenau (2015). Atualmente cursando Doutorado em

Engenharia Elétrica pela Universidade do Estado de Santa Catarina. Professor no Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial (SENAI) no curso de pós-graduação em Engenharia de Manutenção. Professor na Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC-CCT) no curso de graduação em Engenharia de Produção e Sistemas. Professor e Coordenador do curso de graduação em Engenharia Elétrica na Universidade do Planalto Catarinense (UNIPLAC).



Vitor Fernando Couto possui graduação em Engenharia Elétrica pela Fundação Universidade Regional de Blumenau (2010) e mestrado em Engenharia Elétrica pela Fundação Universidade Regional de Blumenau (2013). Atualmente é estudante de doutorado em Engenharia Elétrica na Universidade Federal de Santa Catarina. Tem experiência na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em Linhas de Transmissão, atuando principalmente nos seguintes temas: tarifação no sistema elétrico, sistemas de potência, harmônicos, transmissão de energia elétrica e filtros passivo.



Sérgio Henrique Lopes Cabral possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal Fluminense (1989 - Ênfase em Sistemas de Potência), mestrado em Engenharia Elétrica pela COPPE/Universidade Federal do Rio de Janeiro (1994 - Alta Tensão & Equipamentos) e doutorado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Catarina (2003 - Sistemas de Energia). Desde 1994 é professor-pesquisador de tempo integral da FURB-Fundação Universidade Regional de Blumenau. Seus temas preferenciais de atuação na Engenharia Elétrica estão relacionados à Geração, Transmissão e Distribuição da Energia Elétrica, Alta-tensão e Equipamentos, Aterramento Elétrico, Transformadores, Máquinas de indução e Transitórios Elétricos.



Ademir Nied possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Maria (1987), especialização em Automação Industrial pela Universidade do Estado de Santa Catarina (1992), mestrado em Engenharia Elétrica e Informática Industrial pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná (1995) e doutorado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Minas Gerais (2007). De 2015-2016 realizou estágio pós-doutoral na University of Wisconsin-Madison, junto ao Wisconsin Electric Machines and Power Electronics Consortium (WEMPEC), na área de controle avançado de máquinas elétricas, sob a supervisão do Prof. Robert D. Lorenz. Atuou profissionalmente na WEG Máquinas S.A. (1987-1989), na Empresa Brasileira de Compressores-EMBRACO (1990) e na Escola Técnica Tupy (1995-1997). Foi professor Colaborador do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade do Estado de Santa Catarina (1991-1993 e 1995-1996). Entre 1996-2008 foi professor Adjunto e desde 2008 atua como professor Associado do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade do Estado de Santa Catarina. Tem experiência na área de Engenharia Elétrica com ênfase em máquinas elétricas, acionamento e controle de máquinas elétricas, Redes Neurais Artificiais e Inteligência Computacional. É membro do Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) e da Associação Brasileira de Eletrônica de Potência (SOBRAEP). É registrado no Conselho Regional de Engenharia e Agronomia do Estado de Santa Catarina (CREA-SC).