

Avaliação do Nível de Campo Elétrico de Linhas Aéreas de Alta Tensão Utilizando o Método de Elementos Finitos em Três Dimensões

AC: 239261

**Ricardo Marçal Matias
Adroaldo Raizer**

Resumo

Este artigo apresenta uma metodologia para determinação do campo elétrico produzido por linhas aéreas de alta tensão. Utiliza-se o potencial escalar elétrico complexo, o qual permite considerar as variações de módulo e ângulo de fase das tensões da linha. O Método de Elementos Finitos (MEF) é aplicado para resolver a equação diferencial que descreve o fenômeno. Por último, faz-se a comparação entre os resultados obtidos aplicando-se a metodologia proposta e os valores fornecidos pelo método clássico de simulação de cargas. Para alguns casos, ambos os resultados serão ainda comparados com valores medidos.

INTRODUÇÃO

Com o aumento do nível de tensão para a transmissão de grandes quantidades de energia elétrica, o efeito do campo elétrico torna-se um fator importante no projeto das linhas de transmissão (LT's).

Este problema vem merecendo uma atenção cada vez maior nos últimos anos, por parte das companhias de energia elétrica de todo o mundo. A origem desta preocupação se deve, além do constante aumento dos níveis de tensão dos sistemas de transmissão ao crescente aumento das concentrações urbanas, que tornam cada vez mais frequentes a coexistência de áreas residenciais com LT's.

Sabe-se que o campo elétrico produzido por LT's ao nível do solo, agindo sobre uma pessoa,

pode eventualmente causar sensações desagradáveis, como por exemplo: faiscamento na pele, atração dos cabelos, alterações orgânicas e fisiológicas, quando a mesma é exposta por um tempo prolongado a um campo de elevada intensidade [6,9].

Existe ainda o risco de pessoas entrarem em contato com objetos com grau elevado de isolamento em relação ao solo (como veículos, cercas, antenas e outros) e serem submetidas a correntes elétricas que podem atingir níveis preocupantes, em decorrência da energia eletrostática armazenada por estes objetos quando expostos a campos elétricos [9].

Embora alguns efeitos sejam ainda discutíveis, a influência do campo eletrostático no homem e no meio ambiente pode se tornar crítica com o advento das LT's de alta e extra alta tensão.

Existe ainda o problema da interferência que estes sistemas (LT's) podem provocar em outras instalações próximas, como tubovias para transporte de fluidos (oleodutos, gasodutos, aquedutos, etc), ferrovias, sistemas de comunicação, etc. Assim torna-se de fundamental importância um estudo de compatibilidade eletromagnética (EMC) entre estas instalações e o ambiente no qual estão inseridas. Uma das maneiras de se avaliar a EMC destas instalações (em termos de distúrbios de origem elétrica) é através do conheci-

Ricardo Marçal Matias é professor do Departamento Acadêmico de Eletrônica do Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná - Cefet-PR / Uned-PG, Mestre em Engenharia Elétrica, na área de Concepção e Análise de Dispositivos Eletromagnéticos pela Universidade Federal de Santa Catarina em 1995.

Adroaldo Raizer é Engenheiro Eletricista pela Universidade Federal de Santa Catarina em 1985, Mestre em Engenharia Elétrica por esta Universidade em 1987, Ph.D em Engenharia Elétrica pelo Institute National Polytechnique de Grenoble, França em 1991. Atualmente é Professor do Departamento de Engenharia Elétrica da UFSC.

mento dos valores e da distribuição do campo elétrico por elas produzidas.

Desta forma torna-se necessária a disponibilidade de ferramentas de cálculo precisas e versáteis, a fim de garantir a qualidade dos resultados.

A grande maioria dos softwares para cálculo do campo elétrico de LT's tiram partido da simetria axial que caracteriza estes campos nestas instalações, possibilitando uma análise bidimensional [1,6,8]. No entanto, existem diversas situações onde tal consideração não poderia ser aplicada, sob pena de fornecer resultados incorretos ou devido à própria complexidade da geometria em estudo (por exemplo, o cruzamento entre LT's).

A metodologia proposta permite uma análise tridimensional, possibilitando o estudo de uma série de situações práticas interessantes, tal como considerar várias LT's dispostas, umas em relação às outras de forma assimétrica [2]. Outro aspecto importante é a utilização do potencial escalar elétrico complexo, que permite considerar as variações de módulo e ângulo de fase das tensões das LT's [2].

FORMULAÇÃO MATEMÁTICA

As equações de Maxwell utilizadas são:

$$\text{rot} \bar{H} = \bar{J} + \frac{\partial \bar{D}}{\partial t} \quad (1)$$

$$\text{rot} \bar{E} + \frac{\partial \bar{B}}{\partial t} = 0 \quad (2)$$

$$\text{div} \bar{B} = 0 \quad (3)$$

onde, \bar{H} é o campo magnético (A/m), \bar{E} é o campo elétrico (V/m), \bar{B} a indução magnética (Tesla), \bar{D} a indução elétrica (C/m²), \bar{J} a densidade de corrente (A/m²) e t o tempo (s).

As relações constitutivas, admitindo-se materiais isotrópicos e lineares, são:

$$\bar{D} = \epsilon \bar{E} \quad (4)$$

$$\bar{J} = \sigma \bar{E} \quad (5)$$

onde, ϵ é a permissividade elétrica (Fm) e σ a condutividade elétrica ((Ωm)⁻¹).

Utilizando-se as equações (2) e (3) e sabendo-se que (rot grad) é sempre nulo, temos:

$$\bar{E} = -\text{grad } V - \frac{\partial \bar{A}}{\partial t} \quad (7)$$

onde (grad V) representa o campo elétrico que surge em decorrência da diferença de potencial a que estão submetidos os condutores, e o termo dinâmico ($\partial \bar{A} / \partial t$) representa a contribuição de campo elétrico devido às correntes que circulam no condutor.

Considerando-se que nas LT's, o campo elétrico é originado principalmente devido ao potencial a que estão submetidos os condutores e, assumindo-se que, a variação das grandezas são suficientemente lentas, podemos desprezar o efeito do potencial vetor magnético ($\partial \bar{A} / \partial t \cong 0$), e definir o campo elétrico como:

$$\bar{E} = -\text{grad } V \quad (8)$$

O potencial escalar elétrico, V , não é capaz de representar as características totais do campo elétrico produzido por uma linha de transmissão, pois as tensões de alimentação das linhas são senoidais, apresentando variações de módulo e ângulo de fase [2]. Assim utiliza-se o potencial escalar elétrico complexo, definido como:

$$\dot{V} = V_0 e^{j(\omega t + \alpha)} \quad (9)$$

sendo V_0 a tensão a que estão submetidos os condutores da linha (V), α o ângulo de fase (rad), ω a frequência angular (rad/s) e t o instante de tempo considerado (s).

Aplicando-se o operador div na equação (1) e utilizando as equações (4) e (5), chega-se à equação que rege o fenômeno no domínio de estudo [2,5]:

$$\text{div}[(\sigma + j\omega\epsilon)\text{grad } \dot{V}] = 0 \quad (10)$$

Neste problema as seguintes condições de contorno são consideradas:

- Condição de contorno de Dirichlet, onde o valor do potencial escalar elétrico complexo é especificado.

$$\dot{V} = \dot{V}_0 \quad (11)$$

- Condição de contorno de Neumann, onde a derivada normal do potencial escalar elétrico complexo é especificada.

$$\frac{\partial \dot{V}}{\partial n} = 0 \quad (12)$$

Aplicando-se o MEF para resolver a equação (9), sujeita às condições de contorno (10) e (11), é obtido para cada elemento da malha uma matriz, chamada matriz de contribuição elementar [3]. Essa matriz é complexa, simétrica e de ordem 8×8 . Seu termo genérico é dado por:

$$\dot{g}_{ij} = \int_{\Omega_e} [(\sigma + j\omega\epsilon)\text{grad}N_i^t \text{grad}N_j] d\Omega_e \quad (13)$$

onde i e j são posições quaisquer de linhas e colunas dessa matriz, e N_i e N_j são funções de interpolação nodal e Ω_e representa o domínio do elemento finito considerado.

A soma matricial de todas as matrizes elementares formarão um sistema matricial global, onde todos os elementos da malha são considerados. Ele pode ser representado por:

$$\sum_{i=1, j=1}^{nno} \dot{g}_{ij} \dot{V}_j = 0 \quad (14)$$

onde \dot{V}_j é o valor do potencial escalar elétrico complexo no nó j e nno é o número total de nós da malha.

A solução deste sistema nos fornece o valor do potencial nos nós da malha. Para sua resolução, utiliza-se o método dos gradientes conjugados ortogonalmente conjugados (COCG) [5, 11]. Resolvido o sistema, o campo elétrico pode ser obtido através da equação (8).

RESULTADOS

A seguir serão apresentados os resultados obtidos para três situações diferentes, com o objetivo de demonstrar a versatilidade do MEF aplicado ao cálculo do campo elétrico de linhas de transmissão.

Análise para uma linha trifásica de 1050 kV

Apresenta-se neste caso, a curva do perfil lateral do campo elétrico, obtida pelo MEF, para uma linha de transmissão trifásica de 1050 kV (Fig. 1). Ela será comparada com o resultado fornecido pelo método clássico de simulação de cargas e também com valores medidos.

A tabela I, mostrada a seguir, apresenta as características principais da linha em estudo [6].

Tabela I - Características principais da linha de 1050 kV.

Tensão da linha (kV)	1050
Número de condutores por fase	8
Diâmetro dos condutores (m)	0,03307
Diâmetro dos cabos pára-raios (m)	1,016
Distâncias entre as fases (m)	15,20
Altura das fases (m)	18,93; 18,92; 18,27
Distância entre os cabos pára-raios (m)	35,66
Altura dos cabos pára-raios (m)	39,0

Admite-se nos cálculos, seqüência de fases ABC da esquerda para a direita e $\omega t = 0$.

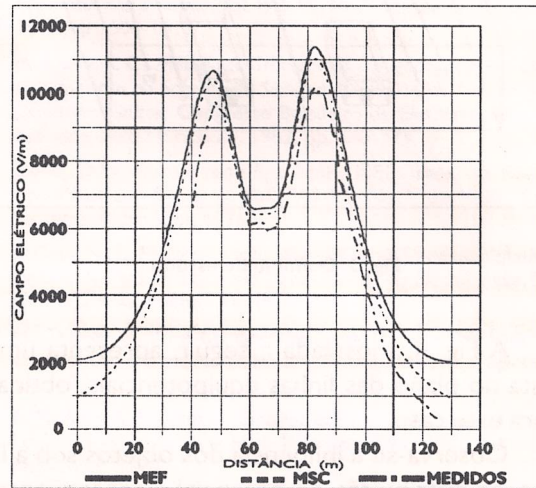


Fig.1: Curvas do perfil lateral do campo elétrico a 1 metro do solo para linha de 1050 kV.

Observa-se na Fig. 1 que, os resultados fornecidos pelo MEF são satisfatórios.

Na Fig. 2 são apresentadas as linhas equipotenciais obtidas com a aplicação do MEF. Elas nos fornecem uma noção da distribuição do campo elétrico no domínio de estudo e também indicam as regiões onde o campo elétrico é uniforme ou não.

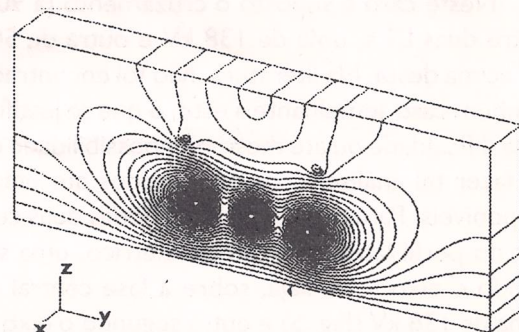


Fig. 2: Linhas equipotenciais.

Linha de 1050 kV na presença de materiais condutores

Neste caso, considera-se a existência de dois galpões metálicos sob as fases da linha de 1050 Kv analisada anteriormente. A figura a seguir apresenta o domínio de estudo.

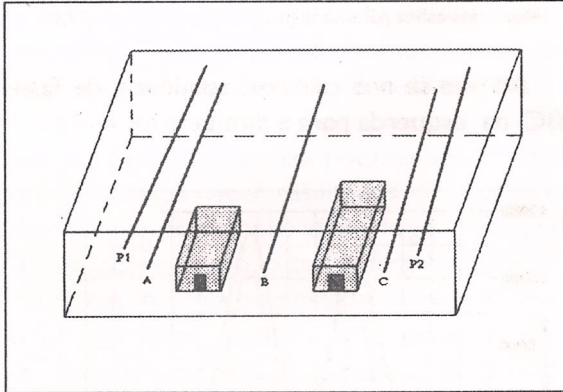


Fig. 3: Domínio de estudo.

A Fig. 4, mostrada a seguir, apresenta uma vista no plano das linhas equipotenciais, obtidas para este caso.

Observa-se a influência dos objetos sob a linha, na distribuição do potencial e conseqüentemente na distribuição e nos valores do campo elétrico.

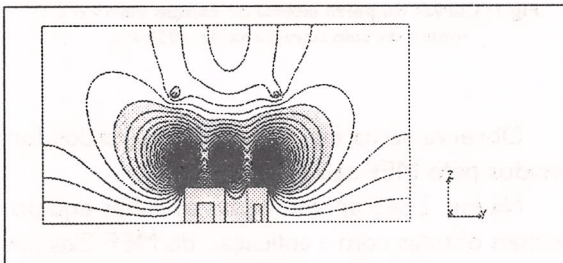


Fig. 4: Linhas equipotenciais.

Caso hipotético do cruzamento entre duas LT's

Neste caso é suposto o cruzamento (a 90°) entre duas LT's, uma de 138 kV e outra de 500 kV acima desta. Na literatura, não foi encontrado nenhum caso semelhante a este, o que se justifica pela dificuldade ou até mesmo impossibilidade de se fazer tal análise, com os métodos até então disponíveis. Para este caso, são obtidas duas curvas do perfil lateral do campo elétrico, uma segundo o eixo y, ou seja, sobre a fase central da linha de 138 kV (Fig. 5) e outra segundo o eixo x, ou seja, sobre a fase central da linha de 500 kV (Fig. 6). Apresenta-se ainda as linhas equipotenciais para este caso (Fig. 7). As Tabelas II e III mostradas a seguir, apresentam as características de cada uma das linhas consideradas.

Tabela II - Características principais da linha de 138 kV.

Tensão da linha (kV)	138
Número de condutores por fase	1
Diâmetro dos condutores (m)	0,03195
Distâncias entre as fases (m)	7,0
Altura das fases (m)	10,0

Tabela III- Características principais da linha de 500 kV.

Tensão da linha (kV)	500
Número de condutores por fase	2
Diâmetro dos condutores (m)	0,03195
Espaçamento entre os subcondutores (i)	0,40
Distâncias entre as fases (m)	15,0
Altura das fases (m)	18,0

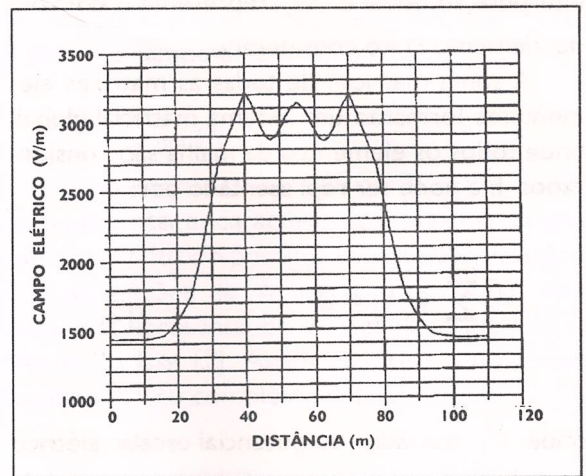


Fig. 5: Curva do perfil lateral do campo elétrico segundo o eixo y.

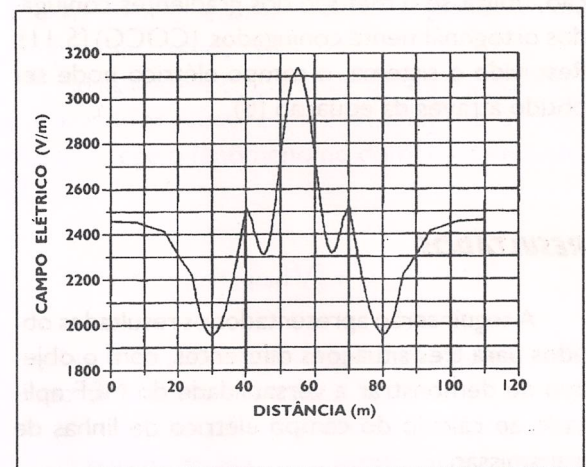


Fig. 6: Curva do perfil lateral do campo elétrico segundo o eixo x.

Para este caso não conseguimos valores medidos para fins de comparação, no entanto, fazendo-se a análise para as duas linhas separadamente, observa-se que os resultados obtidos são coerentes.

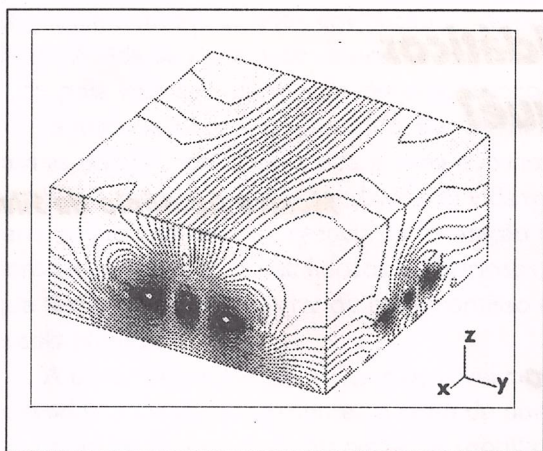


Fig. 7: Linhas equipotenciais para o cruzamento entre as LT's.

CONCLUSÕES

Neste trabalho foi apresentado um modelo para análise tridimensional do campo elétrico produzido por LT's. São apresentados valores de campo elétrico para duas situações: uma linha trifásica de 1050 kV e um caso hipotético do cruzamento entre duas LT's. Apresentou-se ainda a distribuição do potencial sob a linha de 1050 kV, considerando a presença de objetos condutores sob a mesma.

Verifica-se a grande flexibilidade do MEF, o qual permite com facilidade a análise de uma série de situações práticas interessantes, tais como, a avaliação dos valores e da distribuição do campo elétrico sob o cruzamento entre duas ou mais LT's, permite levar em consideração nos cálculos, as estruturas das linhas e também a presença de objetos condutores e/ou dielétricos sob as mesmas. É possível ainda, levar em consideração as irregularidades do terreno.

Verifica-se portanto que, a metodologia utilizada permite uma análise de situações mais realistas e conseqüentemente nos leva a obter resultados mais corretos.

REFERÊNCIAS

- [1] Singer, H.; Steinbigler, H.; Weiss, P. *A Charge Simulation Method for the Calculation of High Voltage Fields*, IEEE Trans. on PAS, Vol. 73, pp. 1660-1668, 1974.
- [2] Pinho, A. Carlos, Raizer, A. *Calculation of Tri and Hexa-Phase Transmission Line Electric Field by Finite Element Method and Charge Simulation Method*, International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Session III - Power System EMC - Paper 11 São Paulo, December, 1994.
- [3] Raizer, A. *Contribuição a Elaboração de um Sistema Tridimensional de Cálculo de Campos Elétricos e Magnéticos, Usando a Técnica de Elementos Finitos*, Dissertação de Mestrado, UFSC, julho, 1987.
- [4] Deno, D.W. *Transmission Line Fields*, IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-95, No.5, September/October, 1976, pp. 1600-1611.
- [5] Mesquita, R. C. *Método de Gradientes Conjugados com Pré-Condiçãoamento na Solução de Sistemas de Equações Geradas por Elementos Finitos*, Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo Aplicado, Belo Horizonte, 1982, pp. 165-174.
- [6] Deno, D.W. *Transmission line fields*, IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-95, No.5, pp. 1600-1611, September/October, 1976.
- [7] L. Ortiz N.; L. Perez B. *Application of Charge Simulation Method for Calculating Substation and Transmission Line Electric Field*, 9th COMPUMAG, Miami - Florida, 1993.
- [8] M. Beasley et al. *A Comparative Study of Three Methods for Computation Electric Fields*, Proc. IEEE Vol. 126, No.1, pp. 126-131, 1979.
- [9] R. N. Allan; S. K. Salman. *Electrostatic Fields Underneath Power Lines Operated at Very High Voltages*, Proc. IEE, Vol. 121, November, 1974.
- [10] Nathan Ida; João P. A. Bastos. *Electromagnetics and Calculation of Fields*, Springer-Verlag, New York, 1993.
- [11] Van der Vorst, H. A.; Mellissen, J. B. M. *A Petrov-Galerkin Type Method for Solving $Ax=b$, Where A is Symmetric Complex*, IEEE Trans. on Magn., MAG-26, 1990, pp. 706-708.