

# ***O Método de Simulação de Cargas Aplicado ao Cálculo do Campo Elétrico de Instalações de Alta e Extra Alta Tensão***

**Ricardo Marçal Matias**

## ***Resumo***

*Este artigo apresenta uma metodologia para a determinação do campo elétrico produzido por linhas aéreas de alta tensão, empregando-se o método de simulação de cargas.*

### **1. INTRODUÇÃO**

Com o aumento do nível de tensão para a transmissão de grandes quantidades de energia elétrica, o efeito do campo eletrostático torna-se um fator importante no projeto das linhas de transmissão. Sabe-se que o campo elétrico produzido por uma linha de transmissão ao nível do solo, agindo sobre uma pessoa, pode eventualmente causar sensações desagradáveis, como por exemplo: faiscamento na pele, atração dos cabelos, perturbações orgânicas e fisiológicas, quando a mesma é exposta por um tempo prolongado a um campo de elevada intensidade.

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 linhas de transmissão de EAT (extra alta tensão, na faixa de 345 kV até próximo a 800 kV) e UAT (ultra alta tensão, na faixa de 800 kV até 1500 kV).

Sabe-se que objetos com um grau elevado de isolamento em relação ao solo (como veículos, cercas, antenas e outros) sendo expostos a um campo elétrico, armazenam energia eletrostática. Assim pessoas que porventura entrem em contato com tais objetos, permitem a descarga da energia acumulada e são submetidas a correntes elétricas que podem atingir níveis preocupantes.

Outro efeito do campo elétrico é que se admite que possa haver a ignição de combustível em veículos que estejam sendo abastecidos nas proximidades de linhas de transmissão.

Dessa forma, torna-se de fundamental importância um estudo de compatibilidade eletromagnética entre essas instalações e o ambiente no qual estão inseridas. Uma das maneiras de se avaliar a compatibilidade eletromagnética dessas instalações é através do conhecimento dos valores e da distribuição do campo elétrico.

Com o advento dos computadores, a utilização de métodos numéricos tornou possível a solução de uma série de problemas em que uma solução analítica seria difícil. A inviabilidade está na complexidade das equações a derivadas parciais de segunda ordem que regem a difusão desses campos agravada pela complexidade das configurações envolvidas.

Assim foram desenvolvidos vários métodos de cálculo para determinação do campo elétrico, utilizando computadores. Entre eles apresentaremos o Método de Simulação de Cargas (MSC), evidenciando suas características básicas e sua formulação matemática.

### **2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS DO MÉTODO DE SIMULAÇÃO DE CARGAS**

O MSC baseia-se na substituição da distribuição real de cargas, existentes na superfície dos condutores, por uma distribuição fictícia de cargas elementares, impondo como condição de

contorno a ser satisfeita pela nova distribuição de cargas, o potencial, que é conhecido na superfície dos condutores [9].

Existem vários tipos de cargas elementares que podem ser utilizadas. As mais frequentes são as pontuais, os segmentos lineares infinitos, os segmentos de anéis, etc. A escolha do tipo de carga a ser utilizado, depende basicamente da geometria do problema em questão, devendo ser distribuída de forma mais próxima possível à configuração do eletrodo.

Na aplicação do MSC ao cálculo do campo elétrico de linhas de transmissão, cada condutor é representado por um segmento de reta infinito, apresentando densidade linear de carga elétrica uniforme, colocada em seu centro. Estas cargas são determinadas através da multiplicação da matriz de capacitâncias da linha pelo vetor das tensões fase-terra a que estão submetidos os condutores [1].

De posse do valor das cargas, o campo elétrico em qualquer ponto do espaço pode ser determinado através da composição vetorial dos campos nesse ponto, devido aos diversos eletrodos e suas imagens.

São admitidas no cálculo as seguintes hipóteses simplificadoras [1,2]:

- as cargas são uniformemente distribuídas ao longo dos condutores (o que implica admitir condutores de superfície cilíndrica lisa, extensão infinita e paralelos entre si e à superfície do solo);
- a superfície do solo é plana e apresenta condutividade infinita;
- os condutores são considerados como superfícies equipotenciais com potenciais conhecidos;
- as torres estão bastante distantes do ponto onde se deseja determinar o campo elétrico e, portanto, não distorcem o mesmo.

De maneira geral, as aproximações indicadas acima conduzem a valores mais elevados que os reais, principalmente a última delas.

No entanto, na secção da linha correspondente ao meio do vão, o cálculo é bastante representativo, visto que nesta região os valores de campo elétrico já não são influenciados pela presença das estruturas [2].

Os dados necessários à determinação do campo elétrico são: as coordenadas cartesianas dos condutores, suas características físicas e a tensão fase-terra a eles aplicada.

É importante salientar que no cálculo do campo elétrico em circuitos simples o faseamento não é importante, porém, para circuitos múltiplos ou

linhas paralelas torna-se de extrema importância, influenciando de maneira significativa os valores de campo elétrico [3].

## 2.1. Determinação da Matriz dos Coeficientes de Potencial

A matriz dos coeficientes de potencial para uma linha de transmissão com  $n$  condutores fase e  $(m - n)$  cabos pára-raios, sendo  $m$  o número total de condutores, é representada em notação matricial da seguinte forma:

$$P = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & \cdot & \cdot & \cdot & P_{1n} & \cdot & \cdot & \cdot & P_{1m} \\ P_{21} & P_{22} & \cdot & \cdot & \cdot & P_{2n} & \cdot & \cdot & \cdot & P_{2m} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ P_{n1} & P_{n2} & \cdot & \cdot & \cdot & P_{nn} & \cdot & \cdot & \cdot & P_{nm} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ P_{m1} & P_{m2} & \cdot & \cdot & \cdot & P_{mn} & \cdot & \cdot & \cdot & P_{mm} \end{bmatrix}$$

Esta matriz tem como característica a simetria em relação à diagonal principal. Seus elementos, considerando o uso de cargas elementares do tipo segmentos lineares infinitos, poderão ser calculados pelas seguintes expressões [4]:

• Os termos da diagonal principal, denominados coeficientes de potencial próprio, representam os potenciais devidos às cargas dos próprios condutores e de suas imagens [5], e são definidos genericamente por:

$$P_{ii} = \frac{1}{2\pi\epsilon} \ln \frac{2h_i}{r_i} \quad (\text{m/F})$$

onde:

$\epsilon$  - Permissividade elétrica do meio (F/m);

$h_i$  - Altura do condutor  $i$  (m);

$r_i$  - Raio do condutor  $i$  (m).

• Os termos fora da diagonal principal, denominados coeficientes de potencial mútuos, representam a influência das cargas do condutor vizinho e de sua imagem sobre cada um dos condutores [5], e são definidos por:

$$P_{ij} = \frac{1}{2\pi\epsilon} \ln \frac{D_{ij}}{d_{ij}} \quad (\text{m/F})$$

onde:

$\epsilon$  - Permissividade elétrica do meio (F/m);

$d_{ij}$  - Distância do condutor  $i$  ao condutor  $j$  (m);

$D_{ij}$  - Distância do condutor  $i$  à imagem do condutor  $j$  (m).

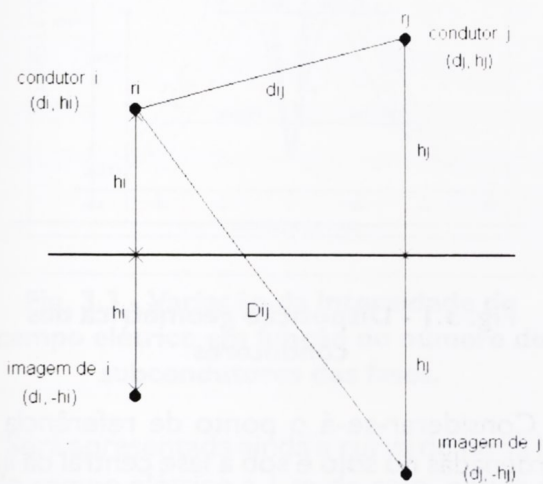
A distância entre um condutor  $i$  e um condutor  $j$  é dada por:

$$d_{ij} = \sqrt{(h_i - h_j)^2 + (d_i - d_j)^2} \quad (m)$$

e a distância entre um condutor  $i$  e a imagem de um condutor  $j$  por:

$$D_{ij} = \sqrt{(h_i + h_j)^2 + (d_i - d_j)^2} \quad (m)$$

conforme ilustra o diagrama mostrado abaixo:



**Fig. 2.1 - Diagrama para o cálculo dos coeficientes de potencial.**

Verifica-se que os valores dos coeficientes de potencial dependem exclusivamente do meio em que os condutores se encontram (representado pela permissividade elétrica do meio  $\epsilon$ ), das dimensões físicas dos condutores e da disposição espacial dos mesmos [5].

A inversa da matriz dos coeficientes de potencial fornece a matriz de capacitâncias da linha, usada no cálculo das cargas elétricas dos condutores, conforme será visto nos próximos itens.

Em linhas aéreas, o meio onde se encontram os condutores é o ar, e neste caso usa-se [1,2,4]:

$$\epsilon = \epsilon_0 = 8,854 \times 10^{-12} \quad (F/m)$$

Em geral, as fases das linhas de transmissão apresentam condutores múltiplos. Nesses casos, um raio equivalente deve ser calculado. Ele representa o raio de um condutor fictício, cilíndrico, possuindo a mesma carga e produzindo o

mesmo campo elétrico que o condutor múltiplo [5,6].

Ele pode ser calculado a partir da seguinte expressão [2]:

$$R_{eq} = \frac{D_n \sqrt{nd}}{2} \quad (m)$$

onde:

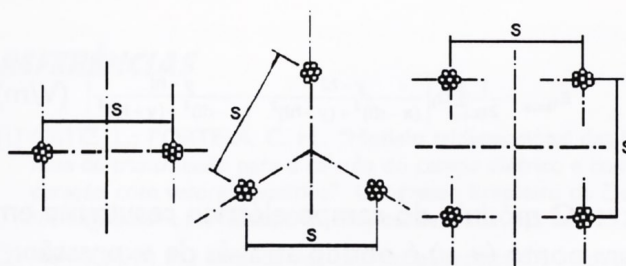
$D$  - é o diâmetro do feixe, ou seja, o diâmetro do círculo que liga o centro dos subcondutores e pode ser determinado através da expressão:

$$D = \frac{S}{\sin(\pi/n)} \quad (m)$$

sendo  $S$  o espaçamento entre os subcondutores em metros e  $n$  o número de subcondutores que compõem o feixe.

$d$  - é o diâmetro de um subcondutor do feixe em metros. Admite-se que todos sejam iguais.

A figura a seguir apresenta as configurações de condutores múltiplos mais usadas na prática [5]:



**Fig. 2.2 - Configurações de condutores múltiplos mais usadas na prática.**

### 2.2 - Determinação Genérica do Vetor das Cargas

Como as linhas de transmissão são energizadas por tensões alternadas senoidais, as tensões e as cargas são representadas na forma fasorial [5].

O vetor de cargas  $[\dot{Q}]$  é determinado a partir do vetor das tensões a que estão submetidos os condutores  $[\dot{V}]$  e da inversa da matriz dos coeficientes de potencial  $[P]$ , que nos fornece a matriz de capacitâncias  $[C]$  da linha. Assim tem-se:

$$[\dot{Q}] = [P]^{-1} [\dot{V}] = [C] [\dot{V}] \quad (C/m)$$

### 2.3 - Cálculo do Campo Elétrico

De posse do valor das cargas, o campo elétrico em qualquer ponto do espaço pode ser determinado pela resolução do teorema de Gauss para um cilindro de comprimento infinito.

O campo elétrico total é o somatório das contribuições de cada condutor e sua imagem. Como as cargas são complexas, o campo elétrico será um vetor complexo, com componentes complexas ao longo dos eixos ortogonais [1].

As componentes horizontal ( $\vec{E}_x$ ) e vertical ( $\vec{E}_y$ ) do campo elétrico são dadas por [4]:

$$\vec{E}_x = \frac{\dot{Q}}{2\pi\epsilon} \left[ \frac{x-d}{(x-d)^2 + (y-h)^2} - \frac{x-d}{(x-d)^2 + (y+h)^2} \right] \quad (\text{V/m})$$

$$\vec{E}_y = \frac{\dot{Q}}{2\pi\epsilon} \left[ \frac{y-h}{(x-d)^2 + (y-h)^2} - \frac{y+h}{(x-d)^2 + (y+h)^2} \right] \quad (\text{V/m})$$

onde:

**d, h** - São as coordenadas dos condutores;  
**x, y** - São as coordenadas do ponto de cálculo.

Para um sistema de  $n$  condutores, tem-se:

$$\vec{E}_{x_{total}} = \frac{1}{2\pi\epsilon} \sum_{i=1}^n \dot{Q}_i \left[ \frac{x-d_i}{(x-d_i)^2 + (y-h_i)^2} - \frac{x-d_i}{(x-d_i)^2 + (y+h_i)^2} \right] \quad (\text{V/m})$$

$$\vec{E}_{y_{total}} = \frac{1}{2\pi\epsilon} \sum_{i=1}^n \dot{Q}_i \left[ \frac{y-h_i}{(x-d_i)^2 + (y-h_i)^2} - \frac{y+h_i}{(x-d_i)^2 + (y+h_i)^2} \right] \quad (\text{V/m})$$

O módulo do campo elétrico resultante em um ponto (x, y) é obtido através da expressão:

$$\vec{E} = \sqrt{|\vec{E}_{x_{total}}|^2 + |\vec{E}_{y_{total}}|^2} \quad (\text{V/m})$$

que representa o campo elétrico eficaz, pois as tensões das fases utilizadas no cálculo são expressas em valores eficazes. Este é o maior valor de campo elétrico eficaz no ponto considerado. Ele independe do ângulo de fase, sendo constante ao longo do tempo [7].

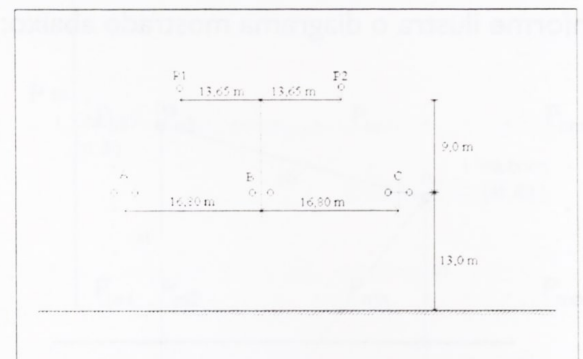
Todo procedimento descrito acima é válido para domínios com apenas um meio dielétrico, por exemplo um sistema de eletrodos no ar. Em princípio, o MSC também pode ser aplicado a domínios com mais de um dielétrico. No entanto, neste caso é necessário utilizar equações auxiliares para representar o potencial e o campo elétrico em cada um deles.

### 3. APRESENTAÇÃO DE RESULTADOS

Para exemplo de aplicação prática do método, será apresentada a curva do perfil lateral do campo elétrico, obtida a 1 m do solo, para uma linha de transmissão de 500 kV. A mesma será comparada com valores medidos.

As fases são formadas por um arranjo geminado de dois subcondutores, com espaçamento de 0,40 m entre si e com diâmetro de 0,03195 m. Os dois cabos pára-raios são de aço galvanizado de diâmetro 0,01905 m, aterrados em todas as estruturas.

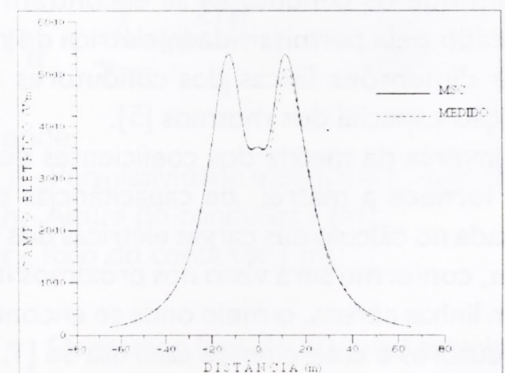
A figura abaixo apresenta a disposição geométrica dos condutores no meio do vão da linha de transmissão em estudo.



**Fig. 3.1 - Disposição geométrica dos condutores**

Considerar-se-á o ponto de referência das coordenadas no solo e sob a fase central da linha. É admitida nos cálculos a seqüência de fase ABC, da esquerda para a direita.

A figura a seguir apresenta as curvas do perfil lateral do campo elétrico a 1 m do solo, obtidas pelo MSC e a partir de valores medidos.

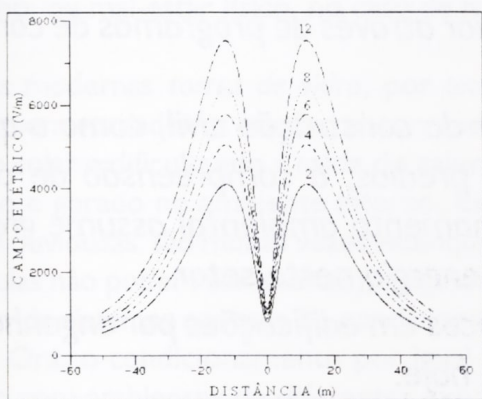


**Fig. 3.2 - Curvas do perfil lateral do campo elétrico a 1 m do solo para linha de 500 kV.**

As medições do campo elétrico foram realizadas com o medidor de campo elétrico de frequência industrial, modelo 113 da Electric Field Measurement Co. Foi utilizado o procedimento

de medição do IEEE, que recomenda manter o medidor a 1 m do solo e a uma distância mínima de 2,5 m do operador [1]. Os resultados mostram que o campo elétrico máximo ocorre aproximadamente sob as fases externas da linha.

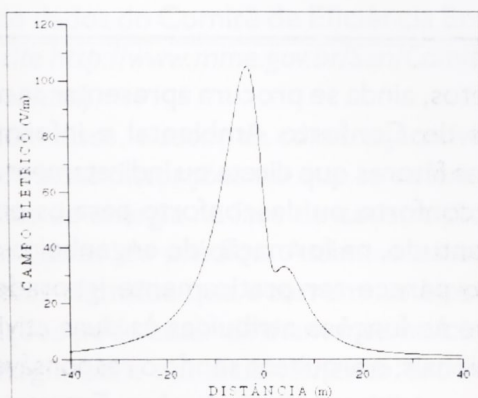
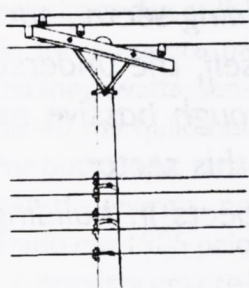
Foi verificado também que o campo eletrostático ao nível do solo aumenta, com o aumento do número de subcondutores por fase [8]. Este efeito é mostrado na Fig. 3.3, para uma linha de transmissão trifásica de 1100 kV, onde o número de subcondutores varia entre 2 e 12, para um espaçamento entre as fases de 6,0 m e uma altura de 19,3 m. Os números apresentados sobre as curvas representam o número de subcondutores das fases.



**Fig. 3.3 - Variação da intensidade do campo elétrico em função do número de subcondutores das fases.**

Será apresentada ainda a curva do perfil lateral do campo elétrico a 1 m do solo, obtida para uma rede de distribuição urbana, apresentando dois níveis de tensão (13,8 kV na alta tensão e 220 V na baixa tensão). A Fig. 3.4 apresenta a estrutura em estudo e a Fig. 3.5 a curva do campo elétrico obtida.

**Fig. 3.4 - Estrutura em estudo.**



**Fig. 3.5 - Curva do perfil lateral campo elétrico.**

## 4 - CONCLUSÃO

Observou-se que o MSC, quando aplicado em cálculos bidimensionais e na presença de apenas um meio dielétrico, é bastante simples, de fácil implementação e utilização, fornecendo bons resultados.

As diferenças observadas entre os valores calculados e os valores medidos são decorrentes tanto das simplificações assumidas no cálculo como também das limitações de medição. A precisão dos valores medidos é afetada por uma série de fatores, entre eles citam-se: distorção do campo elétrico pelo corpo da pessoa que segura o cabo de suporte do instrumento, condutividade do cabo, dificuldade de se posicionar o centro do aparelho na mesma orientação do eixo de medição, erros de leitura do instrumento, a vegetação existente no local, variação da tensão da linha, variação da altura e da posição angular dos condutores no momento da medição.

Já a precisão dos valores calculados é afetada pelas simplificações assumidas no cálculo tais como: supor o solo plano e com potencial nulo, admitir os condutores a um potencial constante e não se considerar os efeitos das condições atmosféricas, como temperatura, umidade relativa do ar e ventos.

## REFERÊNCIAS

- [1] ORTIZ, L.; PORTELA, C. M.; "Modelo tridimensional das linhas de transmissão para o cálculo do campo elétrico e comparação com valores medidos". Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo Aplicado, Belo Horizonte, 1982, pp. 243-252.
- [2] FRANÇA, A. M.; "Efeitos dos campos eletrostáticos - Aplicações e medições". I Seminário Sobre Pesquisas Aplicáveis em Sistemas de Transmissão, Rio de Janeiro, 1983.
- [3] FERNANDES, C.; "Estudos de efeitos eletrostáticos em objetos localizados próximos ou embaixo de linhas aéreas de transmissão". Encontro Pan-Americano de Engenharia Eletrostática e Eletrônica, Salvador, 1978, pp. 1-20.
- [4] GARY, C.; "Le champ électrique des ouvrages a tres haute tension et ses effets". I Simpósio Franco-Brasileiro Sobre Cálculo de Campos Elétricos e Magnéticos, Florianópolis, 1987, pp. 199-220.
- [5] FUCHS, R. D.; Transmissão de energia elétrica. Livros Técnicos e Científicos, 2ª Edição, Rio de Janeiro, 1979.
- [6] CAMARGO, C. C. B.; Transmissão de energia elétrica - Aspectos fundamentais. UFSC, 2ª Edição, Florianópolis, 1991.
- [7] DENO, D. W.; "Transmission line fields". IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-95, No.5, September/October, 1976, pp 1600-1611.
- [8] R. N. ALLAN; S. K. SALMAN; "Electrostatic fields underneath power lines operated at very high voltages". PROC. IEE, Vol. 121, No.11, November, 1974, pp. 1404-1408.
- [9] STEINBIGLER, H.; "Charge simulation method for the calculation of electrostatic fields in high voltage engineering". Seminário Sobre Cálculo de Campos Elétricos com Métodos Numéricos, São Paulo, 1985, pp. 1-24.