

ATERRAMENTOS ELÉTRICOS PARA INSTALAÇÕES HOSPITALARES

Marcelo Aguiar de Campos
Eng.Hospital BIODCOR / UFMG

Silvério Visacro Filho
Depto Eng.Elétrica UFMG/COPPE-UFRJ

RESUMO -- Neste trabalho, os autores apresentam uma ferramenta para aplicação em projetos de aterramentos elétricos para instalações hospitalares. Trata-se de rotina computacional baseada na aproximação potencial constante para os eletrodos. São considerados os aspectos básicos do método e é desenvolvida a correspondente formulação teórica que resulta na expressão matemática do problema. Alguns resultados de simulação ilustram a aplicação desta ferramenta em projetos.

INTRODUÇÃO

No contexto da prática da Engenharia de Instalações Hospitalares, um aspecto de fundamental importância para o desempenho adequado e seguro dos equipamentos elétricos e eletrônicos é o projeto de seus aterramentos elétricos. Interessa, sobretudo no caso de pequenos aterramentos, conseguir instalar as malhas de aterramento com valores de "resistência de terra" suficientemente reduzidos de forma a manter a referência de potencial próxima de um potencial nulo, mesmo na ocorrência de faltas nos equipamentos. No caso de aterramentos maiores, como de substâncias, existe a preocupação adicional de manter os níveis de tensão nas proximidades do aterramento, em caso de falta, em patamares seguros para o pessoal da operação.

Tradicionalmente, os projetos de malhas de aterramento se baseiam em normas que adotam a hipótese de corrente de dispersão constante ao longo dos eletrodos da malha. Contudo, sabe-se que essa premissa apresenta desvios grosseiros da realidade. Modernamente, tem sido aplicada aos projetos de aterramentos a aproximação "potencial constante" nos condutores da malha, e resultados satisfatórios têm sido obtidos, como comprovam experimentos em campo. Neste trabalho, os autores apresentam um pacote computacional desenvolvido a partir da aproximação citada, para projetos de malhas de aterramento, cuja aplicação permite ao projetista atender aos requisitos de serviço e segurança de um projeto. Além do estabelecimento dos conceitos básicos da aproximação, um exemplo prático da aplicação do "software" desenvolvido ilustra o trabalho. Os autores julgam ser esta uma ferramenta importante para os profissionais da Engenharia de Instalações Hospitalares.

CONSIDERAÇÕES BÁSICAS ACERCA DA MODELAGEM

Para fins de projeto de aterramentos elétricos nas condições de regime ou em condições próximas dessas, os métodos de maior emprego no meio técnico adotam a consideração de valor constante para a densidade de corrente de dispersão (J) na superfície dos condutores da malha. Essa hipótese apresenta desvios flagrantemente como a implicação de valor constante para o campo elétrico (E) ao longo de toda a superfície de um eletrodo. Tal implicação pode ser verificada imediatamente a partir da aplicação da Lei de Ohm no meio envolvente ao eletrodo, suposto de resistividade ρ ($E = \rho \cdot J$).

No projeto de malhas de aterramento cujas dimensões não sejam por demais extensas, e para fins de atendimento às solicitações elétricas em que as variações sejam relativamente lentas (frequências representativas não muito diferentes da frequência fundamental dos sistemas elétricos de potência), é válida a aproximação do potencial constante ao longo dos eletrodos da malha. Nessas condições, considera-se que a impedância longitudinal dos eletrodos condutores tem valor tão reduzido, que a queda de tensão ao longo deles pode ser desprezada. A figura 1, resultado de simulação computacional desenvolvida pelos autores, ilustra qualitativamente a diferença resultante das duas aproximações no caso de um eletrodo horizontal de 5 metros de comprimento, numa profundidade de 0,5 m, num meio condutor semi-infinito.

Dentro da aproximação "potencial constante", um processo eficiente de aplicação em projeto é a partição dos eletrodos em segmentos, cada qual considerado com um valor particular de corrente de dispersão, mas de densidade uniforme de corrente ao longo de sua extensão. O eletrodo é modelado por um conjunto de filamentos colineares colocados em seu eixo e imersos no solo, Heppel (1979), Portela (1985), que dispersam corrente transversalmente. Apesar de fluir de cada segmento um valor diferente de corrente, admite-se uma densidade uniforme de corrente para cada um, ou seja, adota-se para o elemento, isoladamente, a aproximação "corrente constante". Os valores das correntes dos segmentos devem ser tais, que resultem em potencial de valor constante para a região do solo correspondente à superfície dos eletrodos. A figura 2 ilustra essa modelagem.

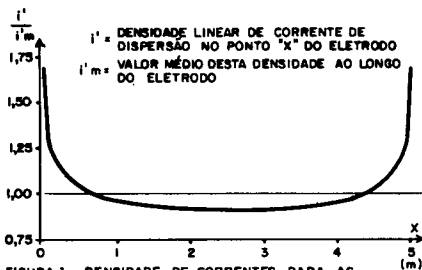


FIGURA 1 - DENSIDADE DE CORRENTES PARA AS DUAS APROXIMAÇÕES.

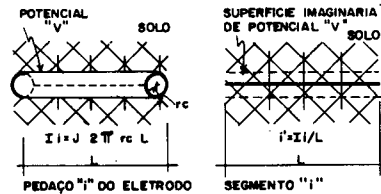


FIGURA 2 - MODELAGEM DO ELETRODO NA APROXIMAÇÃO POTENCIAL CONSTANTE.

A modelagem será tanto mais exata quanto maior for o número de segmentos. Nesse sentido, cabe a determinação de um ponto de compromisso entre a exatidão pretendida e o trabalho de cálculo (em termos de tempo computacional dispendido). É analiticamente viável calcular-se o potencial originado num ponto de um meio por uma fonte linear de corrente de comprimento finito e densidade linear de corrente constante ao longo do seu comprimento. É uma aproximação razoável admitir-se que o potencial "Vi" originado por essa fonte em um condutor finito "i", também colocado nesse meio, seja a média dos potenciais gerados nos pontos da superfície do condutor. Dentro desse contexto, pode-se definir a resistência mútua entre esse condutor e a fonte linear (Rm) como o potencial médio causado no condutor por unidade de corrente dispersada pela fonte.

Por sua vez, a resistência própria de um condutor (R_p) pode ser considerada como o potencial médio na superfície do condutor por unidade de corrente dispersada por uma fonte linear colocada sobre o seu eixo e que se estende ao longo de todo o seu comprimento.

$$R_m = V_i / I_f, \quad R_p = V_i / I_{fi} \quad (1)$$

Assim, o problema do projeto de um aterramento pode ser resumido na solução de um sistema de equações lineares do tipo:

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \dots \\ V_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & \dots & R_{1n} \\ R_{21} & R_{22} & \dots & R_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ R_{n1} & R_{n2} & \dots & R_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \dots \\ I_n \end{bmatrix} \quad (2)$$

onde: I_i : é a corrente de dispersão no segmento i ;
 V_i : é o potencial médio do segmento i ;
 R_{ii} : é a resistência própria do segmento i ;
 R_{ij} : é a resistência mútua entre segmentos i e j ;

(Nos termos "R" estão computados os efeitos das imagens dos segmentos, as características do solo e a geometria da malha).

A partir da determinação das correntes nos segmentos, é possível obter-se prontamente o potencial em qualquer ponto nas proximidades do aterramento, além da resistência da malha. Trabalhando-se com esses parâmetros de projeto, pode-se determinar a melhor configuração para a malha. Na seção seguinte serão desenvolvidas as expressões matemáticas dos termos de "R".

FORMULAÇÃO MATEMÁTICA ESSENCIAL

Para se obter a relação tensão-corrente para os segmentos do aterramento é necessário elaborar algumas formulações básicas.

Potencial Gerado em um Ponto por uma Fonte Linear de Corrente:

Considere-se uma fonte linear de corrente (Figura 3.a), colocada num meio de resistividade ρ , que dispersa a corrente "I" uniformemente ao longo de sua extensão "L", com densidade linear de corrente dada por $i' = I / L$.

O potencial gerado num ponto p do meio devido a essa fonte pode ser obtido pela integração dos potenciais gerados em p pelas equivalentes fontes pontuais de corrente i' que compõem a fonte linear, como está indicado na equação (3). Cada ponto q ao longo do segmento correspondente à fonte contribui para o somatório que resultará no potencial do ponto (onde r_{pq} é a distância entre os pontos p e q).

$$V_p = \int \rho \frac{i'}{4\pi r_{pq}} dl = \int \rho \frac{I}{4\pi L} \left(\frac{1}{r_{pq}} \right) dl \quad (3)$$

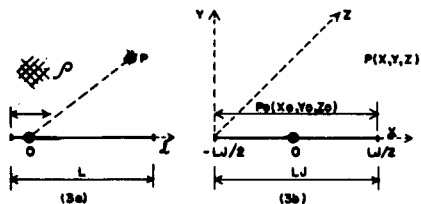


FIGURA 3 - REPRESENTAÇÃO GEOMÉTRICA ASSOCIADA À EQUAÇÃO 3.

Para a configuração geométrica representada em (3.b), a fonte pontual cuja posição está representada por "po", varia sua posição ao longo do eixo x, assumindo nessa coordenada os diversos valores "xo" compreendidos entre $-L_j/2$ e $L_j/2$. A expressão matemática é a equação (4), cuja solução resulta na equação (5).

$$V_p = \frac{\rho}{4\pi} \int_{-L_j/2}^{L_j/2} \frac{i' \cdot dx_o}{\sqrt{(x-x_o)^2 + y^2 + z^2}} \quad (4)$$

$$V_p = \rho \frac{1}{4\pi L_j} \cdot \ln \frac{\sqrt{\left(\frac{L_j}{2} - x\right)^2 + r^2} \cdot \left(\frac{L_j}{2} - x\right)}{\sqrt{\left(\frac{L_j}{2} + x\right)^2 + r^2} \cdot \left(\frac{L_j}{2} + x\right)} \quad (5)$$

onde: $r^2 = y^2 + z^2$

Potencial Gerado num Segmento Condutor por uma Fonte Linear de Corrente de Densidade i' , e Paralela em sua Extensão ao Segmento:

Considere-se a Figura 4:

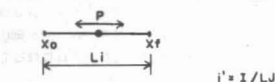


FIGURA 4 - REPRESENTAÇÃO GEOMÉTRICA ASSOCIADA À EQUAÇÃO 8.

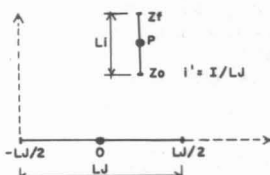


FIGURA 5 - REPRESENTAÇÃO GEOMÉTRICA ASSOCIADA À EQUAÇÃO 11.

Uma vez que se dispõe de uma expressão analítica para o potencial V_p causado num ponto p do segmento i devido à fonte linear de corrente, pode-se determinar o potencial de tal segmento, considerando-o a média dos potenciais gerados em seus pontos (p varia entre xo e xf), como expresso pela equação (6).

$$V_{L_i} = \frac{1}{L_i} \int_{x-x_o}^{x-x_f} V_p \cdot dx \quad (6)$$

Resulta para o potencial gerado no segmento i pela fonte j, a equação (7), cuja solução resulta na equação (8).

$$V_{ij} = \frac{1}{L_i} \int_{x_o}^{x_f} \rho \frac{1}{4\pi L_j} \cdot \ln \left[\frac{\sqrt{\left(\frac{L_j}{2} - x\right)^2 + r^2} \cdot \left(\frac{L_j}{2} - x\right)}{\sqrt{\left(\frac{L_j}{2} + x\right)^2 + r^2} \cdot \left(\frac{L_j}{2} + x\right)} \right] dx \quad (7) \quad V_{ij} = \rho \frac{1}{4\pi L_i L_j} (\lambda_1 - \lambda_2) \quad (8)$$

onde λ_1 e λ_2 têm a formulação apresentada no Anexo 1.

Potencial Gerado num Segmento Condutor por uma Fonte Linear de Corrente de Densidade i' , Perpendicular ao Segmento em sua Extensão:

O potencial gerado no condutor i pode ser considerado a média dos potenciais de seus pontos p originados da fonte linear de corrente, quando p varia na coordenada z entre zo e zf, como demonstra a equação (9).

$$V_{L_i} = \frac{1}{L_i} \int_{z_o}^{z_f} V_p \cdot dz \quad (9)$$

corrente) sucessivamente para todos os segmentos emissores e processar o somatório.

A precisão do método será tanto melhor quanto maior for o número de segmentos considerados para o mesmo caso. Quando um aumento de segmentação não causar alteração significativa dos resultados (dentro de limites especificados) pode-se considerar o resultado satisfatório.

O pacote computacional desenvolvido é composto por dois programas, a saber:

a) PROMATER: calcula a resistência de aterramento, além das correntes e densidades de corrente de cada segmento, gravando estas informações em arquivo de disco, para serem utilizadas no programa de cálculo dos potenciais.

b) CALC_Vp: programa que calcula os potenciais em pontos próximos à malha de aterramento.

EXEMPLO DE APLICAÇÃO

Para ilustrar a aplicação do "software" desenvolvido considera-se o projeto de malha destinada ao aterramento de um laboratório de hemodinâmica, com seus equipamentos de cateterismo; tal como o "CathLab 350", fabricação da Med-Pro Technology Inc. (USA). Este destina-se a diagnósticos angiográficos e eletrofisiológicos, procedimentos terapêuticos (angioplastias coronárias, valvuloplastias e atrioseptostomias) e implantes de marca-passos.

Considerando-se um solo de resistividade $100 \Omega \cdot m$, deseja-se projetar uma malha de resistência inferior a 3Ω , cujos condutores têm um raio de $0,005 m$, enterrada a uma profundidade de $0,5 m$ metro. Após algumas simulações, verificou-se que a malha apresentada na figura 8 se aproximava dos requisitos do projeto, com uma resistência $R_t = 3,13 \Omega$. Tendo em conta limitações locais de dimensão para a instalação da malha, optou-se pela colocação de 4 hastes em suas extremidades. A malha simulada apresentou então $R_t = 2,9 \Omega$, atendendo assim às necessidades do projeto. Na mesma figura mostra-se o perfil de tensões para ambas as malhas em função do valor percentual da tensão total aplicada à malha para as posições correspondentes. Os testes das malhas simulados através de modelos reduzidos colocados em cuba eletrolítica preenchida com água (ρ controlado pela adição de sais minerais à água), confirmaram os resultados obtidos pelo software, com erros inferiores a 3%.

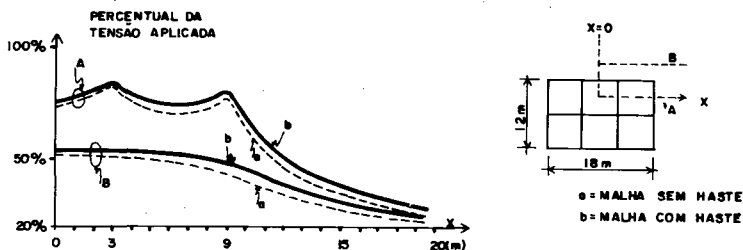


FIGURA 6- PERFIS DE POTENCIAIS.

CONCLUSOES

A partir da modelagem desenvolvida de considerações assentadas na aproximação potencial constante, foi elaborado um pacote

computacional para a simulação do comportamento de aterramentos elétricos. A comparação dos resultados de simulação de configurações usuais de malhas com resultados de medições de modelos reduzidos desses aterramentos comprovam a eficiência do método e demonstrou que o pacote computacional elaborado é uma ferramenta importante para o engenheiro de instalações hospitalares no projeto de aterramentos.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- CALDECOT, R.; KASTEN, D.G. (1983), Scale Model Studies of Station Grounding Grids, Transactions on PAS-IEEE, Vol 102, N.3, March.
- CARNAHAN, B.; LUTHER, H. (1969), Applied Numerical Methods, John Willy & Sons Inc., England.
- HEPPE, R.J. (1979), Computation of Potential at Surface Above an Energized Grid or Other Electrode, Allowing for Non-Uniform Current Distribution, Transactions on PAS-IEEE, Vol.98, N.6, November/December.
- PORTELA, C.M. (1985), Cálculo de Parâmetros e Comportamento de Malhas de Terra, Curso Eletrobrás, Salvador - Bahia, Março.

ANEXO 1

$$\lambda_1 = \Lambda_x \cdot \ln \left[\frac{1}{r_i} \sqrt{\Lambda_x^2 + r_i^2} + \Lambda_x \right] - \sqrt{\Lambda_x^2 + r_i^2} - C_x \cdot \ln \left[\frac{1}{r_i} (\sqrt{C_x^2 + r_i^2} + C_x) \right] + \sqrt{C_x^2 + r_i^2}$$

$$\lambda_2 = B_x \cdot \ln \left[\frac{1}{r_i} \sqrt{B_x^2 + r_i^2} - B_x \right] - \sqrt{B_x^2 + r_i^2} + D_x \cdot \ln \left[\frac{1}{r_i} \sqrt{D_x^2 + r_i^2} - D_x \right] + \sqrt{D_x^2 + r_i^2}$$

onde: $(L_j/2) - x_o = \Lambda_x$ $(L_j/2) + x_o = B_x$
 $(L_j/2) - x_f = C_x$ $(L_j/2) + x_f = D_x$
 $r_i^2 = y^2 + z^2$

ANEXO 2

$$\lambda_n = z_f \left[\frac{\sqrt{M_x^2 + y_i^2 + z_f^2} - M_x}{\sqrt{N_x^2 + y_i^2 + z_f^2} - N_x} \right] + Z_o \cdot \ln \left[\frac{\sqrt{N_x^2 + y_i^2 + z_o^2} - N_x}{\sqrt{M_x^2 + y_i^2 + z_o^2} - M_x} \right] + M_x \cdot \ln \left[\frac{\sqrt{M_x^2 + y_i^2 + z_f^2} - M_x}{\sqrt{N_x^2 + y_i^2 + z_f^2} - N_x} \right] + N_x \cdot \ln \left[\frac{\sqrt{N_x^2 + y_i^2 + z_o^2} - N_x}{\sqrt{M_x^2 + y_i^2 + z_o^2} - M_x} \right] + 2|y_i| \cdot \tan^{-1} \left[\frac{(\sqrt{M_x^2 + y_i^2} - M_x)^{-1/2}}{(\sqrt{M_x^2 + y_i^2} + M_x)^{-1/2}} \right] \cdot \tan \left(\frac{1}{2} \cdot \tan^{-1} \frac{z_f}{\sqrt{M_x^2 + y_i^2}} \right)$$

$$- \tan^{-1} \left[\frac{(\sqrt{N_x^2 + y_i^2} - N_x)^{-1/2}}{(\sqrt{N_x^2 + y_i^2} + N_x)^{-1/2}} \right] \cdot \tan \left(\frac{1}{2} \cdot \tan^{-1} \frac{z_f}{\sqrt{N_x^2 + y_i^2}} \right) + \tan^{-1} \left[\frac{(\sqrt{N_x^2 + y_i^2} - N_x)^{-1/2}}{(\sqrt{N_x^2 + y_i^2} + N_x)^{-1/2}} \right] \cdot \tan \left(\frac{1}{2} \cdot \tan^{-1} \frac{z_o}{\sqrt{N_x^2 + y_i^2}} \right) - \tan^{-1} \left[\frac{(\sqrt{M_x^2 + y_i^2} - M_x)^{-1/2}}{(\sqrt{M_x^2 + y_i^2} + M_x)^{-1/2}} \right] \cdot \tan \left(\frac{1}{2} \cdot \tan^{-1} \frac{z_o}{\sqrt{M_x^2 + y_i^2}} \right)$$

onde: $L_j/2 - x_i = M_x$ e $L_j/2 + x_i = N_x$.

