

# Análise do Campo Elétrico na Interface Ar-Solo em Malhas de Aterramento Usando o Método FDTD

1

S. J. Barberini e W. A. Artuzi Jr.

Departamento de Engenharia – Klabin e Departamento de Engenharia Elétrica - Universidade Federal do Paraná – Curitiba – PR - Brasil

**Resumo**—O objetivo deste trabalho é utilizar o método FDTD (Diferenças Finitas no Domínio do Tempo) como ferramenta para analisar a distribuição do campo elétrico na interface ar-solo de malhas de aterramento, bem como obter os seus valores máximos. Através da Transformada de Fourier serão obtidos os resultados para diversos valores de frequências produzidos por fontes de interferências existentes no ambiente industrial.

**Palavras-chaves**—Campo elétrico, EMC, FDTD, malhas de aterramento, resistividade do solo.

## I. INTRODUÇÃO

Entre as numerosas dificuldades encontradas no desenvolvimento e operação de sistemas de potência e de comunicação, uma grande quantidade está relacionada com problemas de interferência e proteção, que surgem devido a conflitos entre as diferentes naturezas destes sistemas. Alguns destes conflitos residem na forma em que terra é envolvida, seja como condutor de retorno ou, para ambos os tipos de sistemas, durante a operação normal ou no instante de uma falta. A terra também serve como condutor de retorno para descargas atmosféricas que podem produzir distúrbios nos sistemas de potência ou comunicação.

Um outro fator importante é de que pessoas devem ser protegidas frente a uma tensão anormal imposta aos circuitos eletrônicos, de comunicação ou potência ou presentes em estruturas metálicas que possam ser tocadas e que tenham algum contato com o solo.

Do ponto de vista de Compatibilidade Eletromagnética (EMC), também é necessário que se conheça o desempenho dos sistemas sobre uma grande gama de frequências e as ferramentas adotadas devem possibilitar a análise até a região de MHz.

Este trabalho tem como objetivo a análise de uma malha de aterramento, não somente visando o aspecto de segurança e desempenho em baixas frequências, cujo estudos já estão bastante solidificados, mas sim fazer uma análise do ponto de vista de EMC, no domínio da frequência e principalmente nas componentes de frequência mais elevadas dos surtos existentes nos ambientes industriais.

Através da utilização do método FDTD (Diferenças Finitas

no Domínio do Tempo), inicialmente são analisado os perfis do campo elétrico na interface ar-solo em diversas malhas de aterramento nas frequências de 60Hz, 600kHz e 900kHz. Como resultado final são apresentados os valores máximos de campo elétrico desenvolvidos nas estruturas para uma corrente senoidal normalizada em 1000A. Os valores de resistividade de solo utilizados nas simulações foram  $\rho=400\Omega\text{m}$  e  $\rho=100\Omega\text{m}$ .

## II. ESTRUTURAS ANALISADAS E CONFIGURAÇÃO GEOMÉTRICA DOS PROBLEMAS

As malhas analisadas são apresentadas na Fig 1. A malha mínima das estruturas é formada por elementos filamentosares de cobre na forma de um quadrado de 8m de lado, ou seja, a estrutura A possui 16m de lado e a estrutura D possui 48m de lado. A estrutura E apresenta 2 malhas isoladas entre si. Esta configuração será utilizada para análise da influência na malha externa produzida por um transiente introduzido na malha interna.

Para efetuar as simulações das malhas de aterramento, a geometria utilizada é apresentada na Fig. 2. Detalhes da validação desta estrutura e a sua aplicação em eletrodos de aterramento verticais e horizontais são apresentados em [1]. O leitor interessado pode encontrar detalhes do modelo e também das análises realizadas no domínio do tempo e da frequência.

O volume computacional é uma estrutura de 120mx120mx100m. As superfícies externas do volume são limitadas por superfícies de absorção. A malha em estudo está inserida a 0,5m abaixo da superfície do solo na região central do volume computacional. A injeção do transiente de corrente  $i(t)$  é efetuada na malha em estudo através de um condutor filamentar perfeito tangente ao limite computacional, tendo como eletrodo de retorno um condutor perfeito. Todos os condutores são considerados filamentosares,

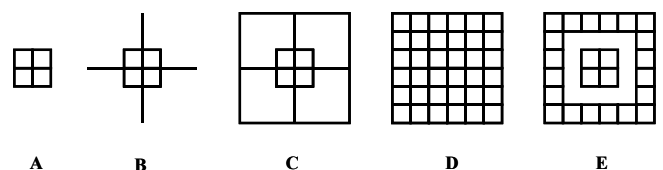


Fig. 1. Malhas utilizadas para análise do campo elétrico.

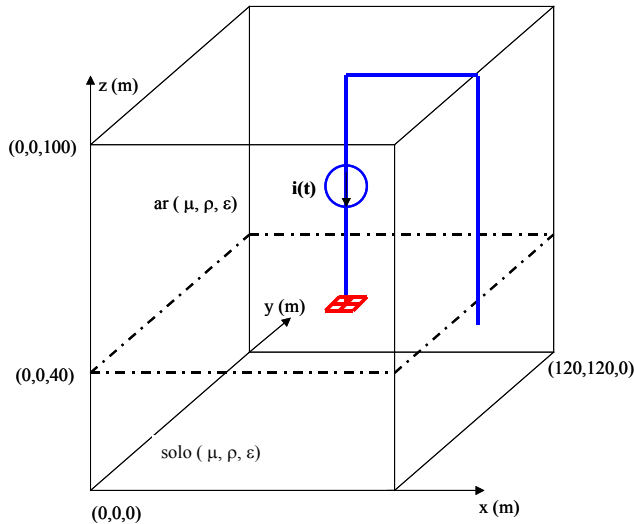


Fig. 2. Modelo para avaliação do campo elétrico na interface ar-solo em malhas de aterramento.

ou seja, se negligencia o valor do raio.

Como as malhas apresentadas na Fig. 1 são simétricas, com o objetivo de se reduzir o tempo de processamento, foi utilizado  $\frac{1}{4}$  de malha, ou seja, os valores de campo elétrico obtidos na interface ar solo foram divididos por 4. Para a permissividade relativa foi utilizado o valor de  $\epsilon_r=10$ .

### III. CAMPOS ELÉTRICOS NA INTERFACE AR-SOLO

Para obtenção do campo elétrico na interface ar-solo, como transiente de corrente foi utilizado o pulso gaussiano  $i(t)$  (1) com amplitude de  $I_0=100A$  e tempo de  $T=350ns$  garantindo excitação acima de 1MHz, que é a frequência máxima adotada na análise.

$$i(t) = I_0 e^{-8\pi \left( \frac{t-1}{T} \right)^2} \quad (1)$$

Foram amostrados valores de campo elétrico para as frequências de 60Hz, 600kHz e 900kHz em todas as estruturas apresentadas e os valores de resistividade de solo utilizados nas simulações foram  $\rho=400\Omega m$  e  $\rho=100\Omega m$ . Como o limite para solos resistivos é em torno de  $\rho=300\Omega m$  [2], foi escolhido um valor acima e um abaixo de  $\rho=300\Omega m$ .

A discretização da estrutura foi implementada utilizando-se células cúbicas com 1m de aresta. Este valor é muito menor que o comprimento de onda no solo em 1MHz a uma resistividade de  $\rho=100\Omega m$ , que é o comprimento de onda

mais curto presente na análise e, conforme [1] e [8], é de  $\lambda=31m$ .

Para a discretização no tempo foi utilizado um passo de 1ns, a fim de preservar a estabilidade numérica do método [3], [6] e [7].

Na Fig. 3 é apresentado o perfil do campo elétrico na interface ar-solo para a malha D, com resistividade de solo de  $\rho=400\Omega m$  e frequência de 60Hz. Na Fig. 4 é apresentado o perfil do campo elétrico na interface ar-solo para a malha D, com resistividade de solo de  $\rho=400\Omega m$  e frequência de 900kHz. Nas Fig. 5 e Fig. 6, são apresentados, respectivamente, os perfis do campo elétrico na interface ar-solo para a malha D, com resistividade de solo de  $\rho=100\Omega m$  e frequências de 60Hz e 900kHz. Conforme mencionado, os perfis apresentados nas figuras representam  $\frac{1}{4}$  da malha.

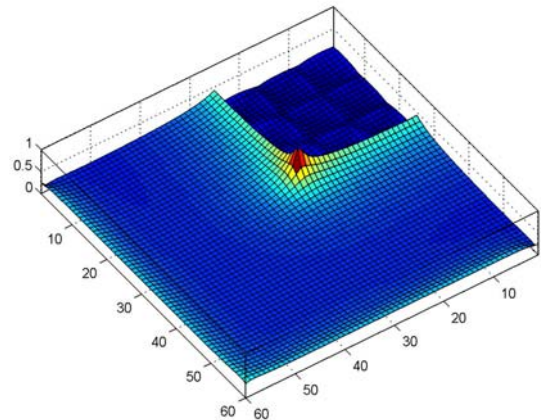


Fig. 3. Distribuição do campo elétrico relativo para a malha D com resistividade do solo de  $400\Omega m$  e frequência de 60Hz.

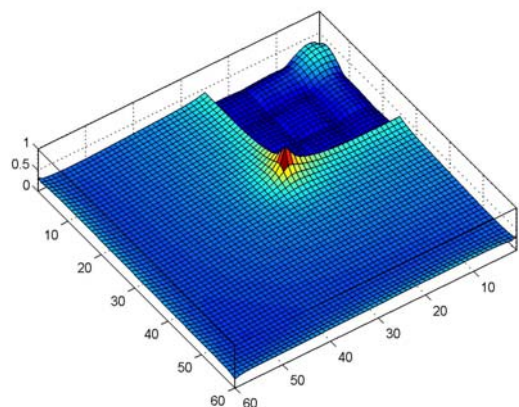


Fig. 4. Distribuição do campo elétrico relativo para a malha D com resistividade do solo de  $400\Omega m$  e frequência de 900kHz.

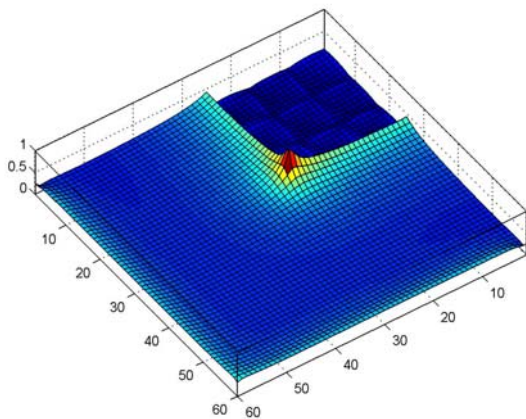


Fig. 5. Distribuição do campo elétrico relativo para a malha D com resistividade do solo de  $100\Omega\text{m}$  e frequência de 60Hz.

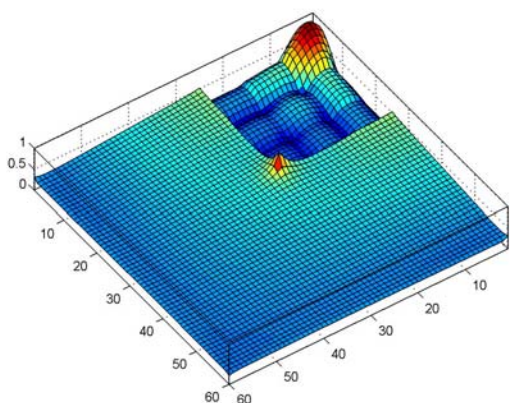


Fig. 6. Distribuição do campo elétrico relativo para a malha D com resistividade do solo de  $100\Omega\text{m}$  e frequência de 900kHz.

Assume-se que o solo é homogêneo e não são considerados efeitos de ionização.

Podemos observar que na estrutura D apresentada nas figuras de perfil de campo elétrico, onde os condutores são segmentados em elementos menores, a equalização é mais acentuada em resistividades maiores ( $\rho=400\Omega\text{m}$ ). Esta conclusão é a mesma apresentada em [1] onde a análise é feita em eletrodos horizontais. Eletrodos curtos e resistividades altas tendem à região capacitiva [1], [4] e [5].

#### IV. VALORES MÁXIMOS DE CAMPO ELÉTRICO

Na Tabela I são apresentados os valores de campo elétrico

máximo, nas frequências de 60Hz, 600kHz e 900kHz, na interface ar-solo, para todas as malhas analisadas.

- De uma maneira geral, há um aumento de eficiência da malha conforme aumenta a sua área e número de eletrodos horizontais (observando-se a tabela no sentido vertical). Os valores de campo elétrico máximo diminuem de A para D.
- Para frequências baixas (60Hz), praticamente não há aumento de eficiência ao se passar da estrutura C para a estrutura D, ou seja, os valores de campo elétrico máximo são praticamente iguais para resistividades de solo alta e baixa. Pode-se dizer que em frequências baixas a eficiência aumentou com o fechamento da área (B para C), mas praticamente não mudou com o aumento de elementos no interior desta área (C para D). Isto não acontece em frequências maiores (600kHz e 900kHz) onde se observa uma queda do campo elétrico máximo na estrutura D em relação a C.
- Praticamente não há interferência na malha que sofre o surto pela presença de uma malha externa (malhas A e E). Provavelmente aconteceria o mesmo caso o surto fosse na malha externa. Num ambiente industrial onde se busca a equipotencialidade, valeria a pena executar a conexão entre as duas malhas.
- Em frequências altas e resistividades baixas (resistividades baixas acentuam efeito indutivo) [1] a mudança da configuração B para C praticamente não produz aumento de eficiência da malha. Este aumento só acontece passando-se para a estrutura D (malha mais fechada).
- O campo elétrico máximo aumenta com o aumento da frequência (sentido horizontal na tabela).
- Como deveria se esperar, resistividades baixas ( $\rho=100\Omega\text{m}$ ) produzem campos bem menores que com

TABELA I

Valor máximo do campo elétrico [V/m]				
Estrutura	Resistividade	Frequência		
	$\Omega\text{m}$	60Hz	600kHz	900kHz
A	100	413	518	576
	400	1579	1725	1846
B	100	321	411	505
	400	1207	1420	1573
C	100	146	410	525
	400	508	929	1257
D	100	145	223	308
	400	506	761	1043
E	100	417	503	539
	400	1585	1736	1846

resistividades altas ( $\rho=400\Omega\text{m}$ ).

## V. CONCLUSÕES

Neste trabalho foram apresentados modelos para a aplicação do método FDTD com o objetivo de avaliar o campo elétrico na interface ar-solo de malhas de aterramento no domínio da frequência.

A análise mostra que malhas mais fechadas, compostas de eletrodos curtos e mais segmentados e em solos com alta resistividade acentuam o efeito capacitivo. Por outro lado, malhas com eletrodos longos e pouco segmentadas e em solos com resistividade baixa acentuam o efeito indutivo. Estes resultados estão em concordância com os apresentados em [1] e [4], ou seja, malhas com maior número de elementos curtos em solos com altas resistividades equalizam mais as altas frequências. Esta característica de certa forma não justifica a busca de solos com resistividades altas, pois as baixas resistividades têm maior condição de dissipar surtos industriais (em solos resistivos os campos elétricos desenvolvidos são mais elevados).

Nas simulações, para obtenção dos campos elétricos, todos os valores foram normalizados em 1000A. Transientes lentos terão um conteúdo energético bem menor nas frequências elevadas, logo os resultados de campo elétrico em frequências elevadas, por exemplo, de uma descarga atmosférica, seriam relativamente menores.

Em relação ao processamento observamos que a análise exigiu grandes estruturas comparadas com o tamanho do elemento em teste. Isto acontece devido às grandes distâncias necessárias para os eletrodos remotos fazendo com que o número de células aumentasse elevando o tempo de processamento. Outro fator foi a redução do comprimento de onda no solo devido a alta condutividade, exigindo redução no tamanho das células e conseqüentemente aumentado o tempo de processamento.

O método apresentado se mostrou bastante versátil e possibilita a análise com formas variadas para a corrente de excitação, bem como mudanças nas características elétricas e magnéticas do solo são facilmente implementadas.

Com relação a trabalhos futuros, poderiam ser inseridas não linearidades para tratar o assunto de ionização do solo. Também poderia ser efetuada a estratificação do solo com o objetivo de entender o comportamento do campo no interior deste com mudanças abruptas de suas características elétricas e magnéticas e estender a análise à frequências maiores.

## REFERÊNCIAS

- [1] S J. Barberini, W. A. Artuzi Jr., "Análise Eletrodinâmica em Eletrodos de Aterramento Usando o Método FDTD", MOMAG 2004, São Paulo, Agosto 2004.
- [2] S. Bourg, B. Sacepe and T. Debu, "Deep Earth Electrodes in Highly Resistive Ground: Frequency Behavior", *Proceedings of the IEEE 1995 International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, 95CH3577-2, pp.584-589.
- [3] C. J. Macdonald-Bradley, P. Jennings, R. Ball, P. Lever e S. Baker, "The Effects of Cell Size on FDTD Calculations for Cubic Structures", *Proceedings EMC - 67K4*, Zurich 1999.
- [4] L. D. Grcev, "Improved Earthing System Design Practices for Reduction of Transient Voltages", *CIGRE 36-302*, Session 1998.
- [5] IEEE Standard STD 80 Guide for Safety in AC Substation Grounding, 1986.
- [6] W. X. A. Taflove, S. C. Hagness, "Computational electrodynamics: the finite-difference time-domain method - 2nd ed.", Artech House, Inc., 2000.
- [7] W. A. Artuzi Jr., "Finite Element Time Domain Method Using Piecewise Constants Basis Functions", *SBMO/IEEE International Microwave and Optoelectronics Conference*, Vol no. 2, pp. 1029-1032, Foz do Iguaçu 2003.
- [8] S. Ramo, J. R. Whinnery, T. van Duzer, "Campos e Ondas em Eletrônica das Comunicações", Rio: Guanabara Dois, S.A., 1981.