

# Análise pelo Método dos Elementos Finitos do Efeito da Polarização em Problemas de Radiação em Regiões Mistas de Rios e Florestas

Alexandre Cardoso Oliveira e Karlo Queiroz da Costa

**Resumo**— Este artigo estuda o problema de propagação de ondas eletromagnéticas, com 521 MHz de frequência, numa região de quatro meios não magnéticos (ar, solo, água e floresta), onde os efeitos de transmissão, reflexão e perdas são relevantes. O problema é modelado e resolvido através do Método de Elementos Finitos. Apresentamos o módulo e fase do campo magnético para o caso da polarização vertical, e do campo elétrico para o caso da polarização horizontal.

**Palavras-chaves**— método dos elementos finitos, polarização vertical, polarização horizontal, propagação de ondas eletromagnéticas.

**Abstract**— This article studies the problem of propagation in electromagnetic waves, with a frequency of 521 MHz, in a region with four non-magnetic media (air, soil, water and forest), where the effects of transmission, reflection and losses are relevant. The problem is modeled and solved using the Method of Finite Elements. We show the module and phase of the magnetic field in the case of vertical polarization, and of the electric field for the case of horizontal polarization

**Keywords**— finite elements method, vertical polarization, horizontal polarization, propagation of electromagnetic waves.

## I. INTRODUÇÃO

Atualmente nas telecomunicações, deseja-se que os sistemas de transmissão de informação tenham cada vez menos perdas, com maior alcance aos receptores dos sinais. Dentre esses destacam-se as tecnologias sem fio, que utilizam ondas eletromagnéticas propagando-se em meios diversos existentes no planeta. [1]

Para projetar os sistemas de comunicação modernos, são necessários modelos que descrevem o comportamento das ondas nos meios de interesse, e uma propriedade pertinente é a polarização da onda. Em [2], os autores fazem um estudo teórico da propagação da onda polarizada horizontalmente, em regiões estratificadas no espaço com características elétricas diferentes. Já em [3], é estudado o campo atravessando estradas em meio a florestas, considerando os efeitos de difração e reflexão da onda utilizando o modelo de traçado de onda.

Neste trabalho consideramos uma fonte de impulso de corrente elétrica ( $J$ ) para gerar uma onda de polarização horizontal, e uma fonte de impulso de corrente magnética ( $M$ ) para gerar uma onda de polarização vertical num espaço bidimensional. Os campos horizontais irradiados ( $E_z$  e  $H_z$ ) foram obtidos através de métodos numéricos aplicados às Equações de Maxwell, com o auxílio do software COMSOL, em uma região próxima à da Amazônia no Norte Brasileiro.

Alexandre Oliveira, Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Pará, Belém-PA, e-mail: [alexandre.cardoso.oliveira@itec.ufpa.br](mailto:alexandre.cardoso.oliveira@itec.ufpa.br); Karlo Queiroz da Costa, Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Pará, Belém-PA, e-mail: [karlo@ufpa.br](mailto:karlo@ufpa.br).

## II. MODELAGEM DO PROBLEMA

O problema é modelado com uma distribuição de corrente, que será a fonte das ondas eletromagnéticas que propagarão no espaço[4], neste trabalho ela está no plano  $xy$ , como uma linha infinita paralela ao eixo  $z$  conforme a Fig. 1, matematizada pela função Delta de Dirac, como explorado em [2], denotadas pelos vetores  $\vec{M}, \vec{J}$  (corrente magnética e elétrica, respectivamente).

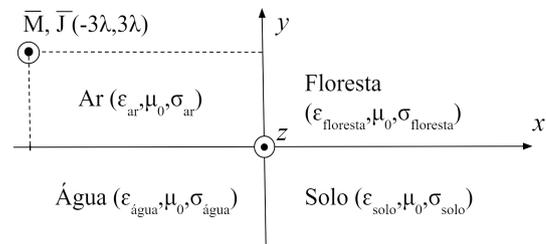


Fig. 1. Configuração espacial dos meios e da fonte de Corrente para a Simulação.  $\lambda=57,58$  cm.

A fase e módulo dos campos eletromagnéticos podem ser solucionadas com métodos numéricos, neste trabalho utilizamos o método de elementos finitos [5].

Foram adicionados 4 meios (ar, água, solo e floresta) onde a onda irá se propagar, seguindo os parâmetros eletromagnéticos da Tabela I [2] para meios não magnéticos ( $\mu=\mu_0$  para qualquer dos meios).

TABELA I. CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS DOS MEIOS.

Características Elétricas do Meio	AR	ÁGUA	SOLO	FLORESTA
Permissividade elétrica relativa $\epsilon_r$	1	80	1,9	1,1
Condutividade Elétrica $\sigma$ (mS/m)	0	50	20	0,1

Para utilizar Método dos Elementos Finitos, discretizamos da malha e o formato dos elementos, decidimos o triângulo pela simplicidade. Para melhor precisão, precisamos ter as dimensões de cada elemento comparáveis ao comprimento de onda (57,58 cm no ar), que é proporcional a  $1/\sqrt{\epsilon}$ , disto resulta que na água os elementos devem ser menores, sem que comprometa o tempo computacional para executar as simulações.

Será considerada uma região circular de raio igual a 13 vezes o comprimento de onda. A Fig. 2 apresenta um zoom no centro desta circunferência, para melhor visualização da discretização das malhas em cada meio e nas interfaces.

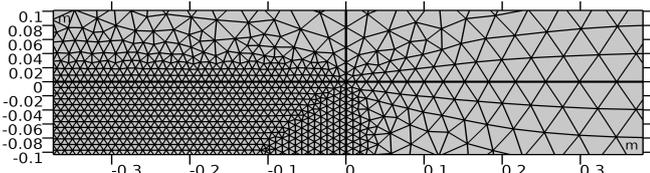


Fig. 2. Discretização da malha nos quatro meios.

Serão apresentados os gráficos de linha, mostrando o módulo da componente de campo magnético  $H_z$  para polarização vertical, e o módulo da componente de campo elétrico  $E_z$  para polarização horizontal para diferentes alturas, bem como os gráficos de superfície para os campos citados em toda a geometria do problema.

### III. RESULTADOS NUMÉRICOS

As simulações foram feitas em um computador com processador Intel Core i5-8250U e memória RAM de 24 GB, o tempo de simulação foi de 3 horas, 8 minutos e 30 segundos para o caso de polarização horizontal, e 2 horas, 18 minutos e 31 segundos para polarização vertical.

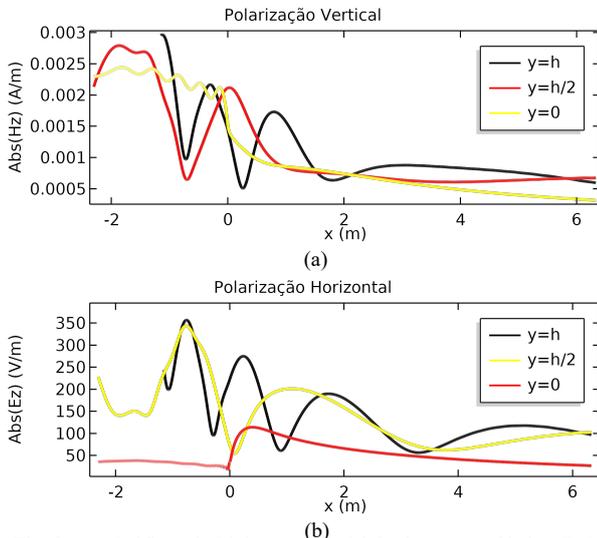


Fig. 3. Gráficos de Linha para o módulo do campo elétrico  $E_z$  (a) e do campo magnético  $H_z$  (b).

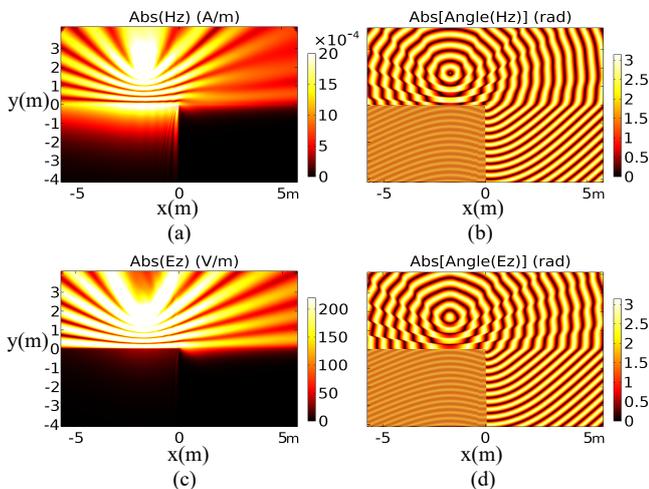


Fig. 4. Módulo do campo magnético  $H_z$  (a); módulo da fase do campo magnético  $H_z$  (b); módulo do campo elétrico  $E_z$  (c); módulo da fase do campo elétrico  $E_z$  (d).

A Fig. 3 mostra o módulo dos campos ao longo do eixo  $x$  (veja Fig. 1) para três alturas diferentes no eixo  $y$ . Já a Fig. 4 mostra comportamentos ondulatórios bem semelhantes, havendo entretanto maior perda no campo elétrico no caso de polarização horizontal no meio aquático. Já quanto à fase da onda, é perceptível a defasagem entre campo elétrico e magnético se compararmos os gráficos de linha entre si e os gráficos do módulo da fase na Fig. 4 (b e d).

O fator de atenuação exponencial ( $\alpha$ ) e fator de fase ( $\beta$ ) que descrevem a perda da magnitude da onda e a fase em função da distância são calculados, através das equações (1) e (2)[6]:

$$\alpha = \omega \sqrt{\frac{\mu\epsilon}{2} \left[ \sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega\epsilon}\right)^2} - 1 \right]} \quad (1)$$

$$\beta = \omega \sqrt{\frac{\mu\epsilon}{2} \left[ \sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega\epsilon}\right)^2} + 1 \right]} \quad (2)$$

Para o ar não há atenuação devido à ausência de condutividade elétrica, mas para a floresta, que tem características bem parecidas com o ar, há uma perda de 15 dB a cada 96 metros, o que já não pode ser desprezado quando lidamos com as vastas distâncias que entre emissores e receptores em aplicações práticas. Já o fator de fase na floresta é de 11,45 rad/m, apenas 4,8% maior do que no ar.

### IV. CONCLUSÕES

Os campos horizontais para cada tipo de polarização têm características semelhantes conforme a altura se aproxima da fonte ( $y=h$ ), havendo maior diferença conforme a coordenada  $y$  se aproxima dos meios aquático e terrestre. No limite, quando  $y=0$ , vemos a maior diferença entre cada caso, para a polarização vertical, o campo magnético  $H_z$  diminui de intensidade abruptamente quando é transmitido da água para o solo, todavia, para a polarização horizontal, o campo elétrico  $E_z$  aumenta abruptamente quando é transmitido entre estes meios. Observamos também menos intensidade do módulo do campo magnético na floresta, devido à maior taxa de reflexão.

Em futuros trabalhos pretende-se aumentar a complexidade da floresta com modelos mais detalhados para as árvores, observando também o efeito de difração e com frequências diferentes, como o sinal 5G.

### REFERÊNCIAS

- [1] T. S. Rappaport, “Comunicações sem Fio, Princípios e Práticas”. Pearson, 2008.
- [2] K. Q. Costa e J. B. N. Leite, “Radiação Bidimensional de Uma Linha de Corrente em Regiões Estratificadas na Horizontal e Vertical”. SbrT 2022, 25-28 de Setembro de 2022, Sta. Rita do Sapucaí, MG.
- [3] D. C. De Souza e G. P. S. Cavalcante, “A k-Ray Model for Mobile Systems in Environments with Abrupt Terrain Discontinuities”, *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*, 1996.
- [4] Constantine A. Balanis, “Antenna Theory: Analysis and Design”, 2ª Edição, John Wiley & Sons, Inc. 1997.
- [5] T. L. S de Oliveira, “Análise Numérica de Programação de Ondas Eletromagnéticas em Meios Mistos”, Faculdade de Engenharia Elétrica da UFPA, 2019.
- [6] M. Sadiku, “Elementos de Eletromagnetismo”. 3ª Edição. Porto Alegre. Editora Bookman, 2004.
- [7] Comsol MultiPhysics: <https://www.comsol.com/>