



Modelagem por Elementos Finitos da Propagação de Ondas Eletromagnéticas em Regiões Litorâneas

Murilo Teixeira Silva¹, Lurimar Smera Batista²

¹Graduando em Engenharia Industrial Elétrica – IFBA. Bolsista da FAPESB. e-mail: muriloteixeira@ifba.edu.br

²Professor Doutor em Geofísica – IFBA. e-mail: lurimar@ifba.edu.br

Resumo: A propagação de ondas eletromagnéticas é um objeto de estudo da Engenharia Elétrica desde o desenvolvimento das telecomunicações, que iniciou no século XIX. Ondas eletromagnéticas são formadas por campos elétricos e magnéticos perpendiculares que se alternam no transporte. Os campos elétricos e magnéticos sofrem ação dos meios em que se propagam, o que afeta a amplitude do campo. Em regiões litorâneas, a presença de meios com diferentes condutividades afetam diretamente a propagação do sinal. Para realizar o estudo foi escolhida a simulação através do Método dos Elementos Finitos, sobre duas regiões litorâneas, uma de uma região urbana e outra de uma região não urbana. Através da simulação observou-se uma forte influência do mar sobre o sinal e que sua intensidade é alterada pela presença da região urbana. Este resultado é importante para o estudo da instalação de antenas repetidoras e para analisar os efeitos de regiões litorâneas sobre o transporte de ondas e sinais eletromagnéticos.

Palavras-chave: elementos finitos, modelagem, ondas eletromagnéticas, telecomunicações, regiões litorâneas

1. INTRODUÇÃO

Na Engenharia Elétrica, os campos eletromagnéticos têm sido objeto de estudo exaustivo desde o desenvolvimento das telecomunicações, em meados do século XIX, com a invenção do telégrafo. Nas telecomunicações, os campos eletromagnéticos são utilizados como meio de transporte de informações, sendo a partir destes que os sinais de satélites, celulares, rádio e televisão são transmitidos. (NETO, 2009)

Os campos eletromagnéticos são divididos em campos elétricos e magnéticos, que se transportam ortogonalmente no espaço. O físico James Clerk Maxwell descobriu em suas pesquisas as equações que definem comportamento dos campos elétricos e magnéticos, equações estas que levaram o seu nome. A partir das equações de Maxwell, é possível relacionar os dois campos, gerando assim as equações de onda eletromagnética, que caracteriza tanto transmissões de rádio e TV, como a luz visível e os raios x e gama. Portanto, os campos eletromagnéticos estão presentes na vida cotidiana. O estudo de campos eletromagnéticos permite o desenvolvimento de novas técnicas e a melhoria das técnicas vigentes.

Os campos elétricos e magnéticos podem se propagar em qualquer meio na forma de ondas eletromagnéticas, contudo, estas são influenciadas diretamente pelos meios em que se propagam, pois, a própria incidência do campo eletromagnético por um material gera campos secundários que interferem no sinal emitido pela fonte. Neste princípio é que se baseia, por exemplo, a perfilagem eletromagnética de terrenos. Como meios condutores e isolantes reagem de maneiras diferentes à ação de campos eletromagnéticos, a passagem de sinais por regiões em que existem diferenças de condutividade interfere diretamente na amplitude dos sinais transportados através deles. (BATISTA, 2001)

Ao se propagar em regiões litorâneas a partir de uma fonte suficientemente distante, o campo eletromagnético encontra tanto meios condutores como meios isolantes em seu trajeto, o que pode acarretar variações na amplitude do campo, prejudicial para o transporte de informações. Para a obtenção de informações sobre a propagação dos campos elétricos e magnéticos em meios de diferentes condutividades, um dos métodos utilizados na engenharia é a simulação computacional.



O Método dos Elementos Finitos têm sido utilizados com sucesso nos estudos eletromagnéticos principalmente por causa da natureza das equações que definem os campos elétricos e magnéticos . As equações de campo alteram seus parâmetros a cada meio em que se propagam e o Método dos Elementos Finitos permite essa adaptação do modelo, já que a grande vantagem do Método dos Elementos Finitos é a capacidade de gerar bons resultados em meios de geometria complexa, neste caso, de condições físicas complexas. (SILVESTER & FERRARI, 1996)

O estudo da propagação de ondas eletromagnéticas em regiões litorâneas e continentais é de grande importância para as telecomunicações, pois possibilita um melhor arranjo das estações repetidoras, gerando uma melhoria na cobertura dos serviços de telefonia. Utilizando a simulação computacional, os custos deste estudo são reduzidos, pois, ao fornecer dados precisos ao simulador, os resultados serão suficientemente próximos dos reais, reduzindo também o tempo na implantação destas estações.

O presente texto propõe um estudo da propagação do campo elétrico em regiões litorâneas e continentais, para que, através do estudo da amplitude do campo em cada região, determinar zonas de atenuação de sinal.

2. MATERIAL E MÉTODOS

A maioria dos fenômenos de transporte de sinal em telecomunicações utilizam como forma de propagação as ondas eletromagnéticas. Como ondas eletromagnéticas são formadas por campos elétricos e magnéticos, as equações de Maxwell são utilizadas para descrever seu comportamento.

O físico escocês James Clerk Maxwell (1831-1879), inspirado nos trabalhos de Faraday, escreveu o artigo em quatro partes intitulado "On Physical Lines of Force", onde apresentava as equações que mais tarde levariam o seu nome. No domínio da frequência, as Equações de Maxwell assumem a seguinte forma.

$$\nabla \times E = -ZH \quad [\text{Eq. 01}]$$

$$\nabla \times H = YE + J_e \quad [\text{Eq. 02}]$$

$$\nabla \cdot (\varepsilon E) = Q_v \quad [\text{Eq. 03}]$$

$$\nabla \cdot (\mu H) = 0 \quad [\text{Eq. 04}]$$

Os parâmetros presentes nas Equações 1 e 2, $Z = j\omega\mu$ e $Y = \sigma + j\omega\varepsilon$, são, respectivamente, a impedância (impedância por unidade de comprimento) e a admitância (admitância por unidade de comprimento) do meio de propagação, onde $j = \sqrt{-1}$; ω representa a frequência angular $\omega = 2\pi/T = 2\pi f$ (rad/s), onde f e T são, respectivamente, a frequência e o período do sinal.

Os campos elétricos e magnéticos, ao incidirem sobre a matéria, geram correntes parasitas que, ao variar, geram um campo magnético em resposta à excitação. Este campo magnético, ao variar no tempo, gera um campo elétrico. Os campos elétricos e magnéticos gerados, podem agir sobre outros meios, causando novos campos, em escala menor. Isso pode ocorrer seguidamente, de forma que surgiriam campos terciários, quartanários, entre outros. O campo incidente se propagando constitui o campo primário, enquanto o campo gerado pelas correntes de Foucault é chamado de campo secundário. Assim, considerando parâmetros elétricos lineares, isotrópicos e independentes do tempo, o campo total, elétrico e magnético pode ser descrito como nas Equações 5 e 6.

$$E_t = E_p + E_s \quad [\text{Eq. 05}]$$

$$H_t = H_p + H_s \quad [\text{Eq. 06}]$$

Nas Equações 5 e 6, E_t e H_t representam respectivamente os campos elétrico e magnético totais; E_p e H_p representam os campos elétricos e magnéticos primários; e E_s e H_s representam os campos elétricos e magnéticos secundários.

A partir das equações de Maxwell no domínio da frequência, deduz-se a equação diferencial dos campos primário e secundário, sendo que a equação do campo primário possui solução analítica para o

caso de ondas planas. As equações do campo elétrico primário e secundário estão demonstradas respectivamente nas Equações 7 e 8.

$$E_p = -j \frac{ZH_o}{k} e^{-jky} \quad [\text{Eq. 07}]$$

$$-\nabla \left(E_s \cdot \frac{\nabla Y}{Y} \right) - \nabla^2 E_s + ZYE_s = \nabla \left[\frac{1}{Y} E_p \cdot \nabla (\Delta Y) \right] + Z\Delta Y E_p \quad [\text{Eq. 08}]$$

Na Equação 7, H_o representam o valor do campo magnético na origem da emissão.

Uma vez de posse das equações que definem o fenômeno, escolhem-se os modelos de estudo. Para o estudo, foram escolhidos dois modelos: o primeiro de uma região litorânea urbana e o segundo de uma região litorânea não urbana. A Figura 1 demonstra a representação tridimensional do modelo da região litorânea urbana. A partir deste, se retirada a região com resistividade ρ_4 , o modelo torna-se o da região litorânea não urbana.

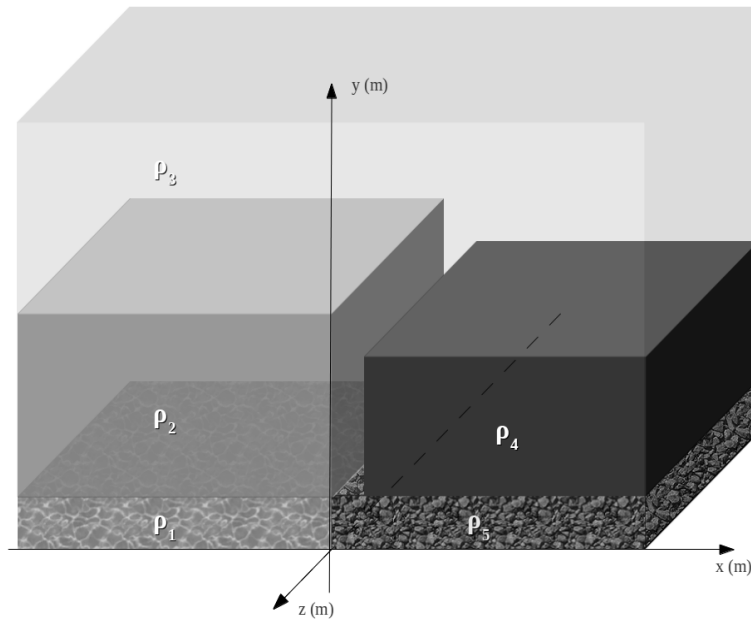


Figura 1 - Representação física e geométrica tridimensional do modelo de uma região litorânea urbana: ρ_1 - Água Salgada (mar); ρ_2 - Suspensão Salina (Ar + Água Salgada); ρ_3 - Ar; ρ_4 - Concreto; ρ_5 - Rocha

Em ambos os modelos utilizaram-se 2 km de largura para 300 m de altura, sendo que a origem do modelo divide as faixas de terra e água salgada. A fonte do campo elétrico está situada suficientemente distante para que gerem ondas planas, na frequência de 1kHz. A faixa de rocha e água possuem os mesmos comprimentos, cada uma com 1 km de extensão, por 30 m de altura. Devido ao movimento das marés no modelo litorâneo, surge uma região de suspensão salina, constituída de uma mistura de ar e água salgada em suspensão, 150 m acima do nível do mar e com a mesma extensão da região de água salgada. Acima do solo no modelo urbano, existe uma região de concreto que está situada a uma distância de 100 m do mar, possuindo 50 m de altura e 900m de comprimento.

Cada modelo possui diferentes meios de propagação, com suas respectivas resistividades elétricas, apresentadas a seguir na Tabela 1.

Uma vez conhecidos os modelos, estes devem ser submetidos à ação do campo eletromagnético. O campo eletromagnético é obtido através da expressão analítica da Equação 7, enquanto os campos secundários de cada uma das regiões do modelo. Para tal, faz-se o uso da Equação 8, alterando seus

parâmetros a em cada região do modelo. A técnica escolhida para a resolução da equação diferencial do campo secundário foi o Método dos Elementos Finitos.

Tabela 1: Resistividade dos Meios de Propagação

Meio	Resistividade ρ (Ωm)
Água do Mar **	0,1886
Ar	$1,3 \cdot 10^{16}$
Concreto	150
Rocha	340
Suspensão Salina	$6,5 \cdot 10^{15}$

** salinidade 35 g/kg, 25°C

A partir dos modelos e da resistividade de cada meio de propagação, construiu-se um simulador do Método dos Elementos Finitos, utilizando a linguagem de programação C para cada modelo. O método de discretização de domínio utilizado foi o das divisões regulares. (BATISTA, 1991) O simulador tem como parâmetros de entrada as dimensões do modelo, o número de divisões para cada eixo para a geração da malha, a frequência da fonte, as resistividades de cada meio de propagação e suas devidas posições. Uma vez que o simulador recebe os parâmetros de entrada, este os processa e retorna os valores do campo elétrico secundário em cada região do modelo, que, pela Equação 8, resulta no campo elétrico total se somada ao campo elétrico primário no ponto de estudo. Portanto, o campo elétrico primário é calculado e somado ao campo elétrico secundário, resultando no campo elétrico total.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 2 expressa a amplitude do campo elétrico na região litorânea urbana.

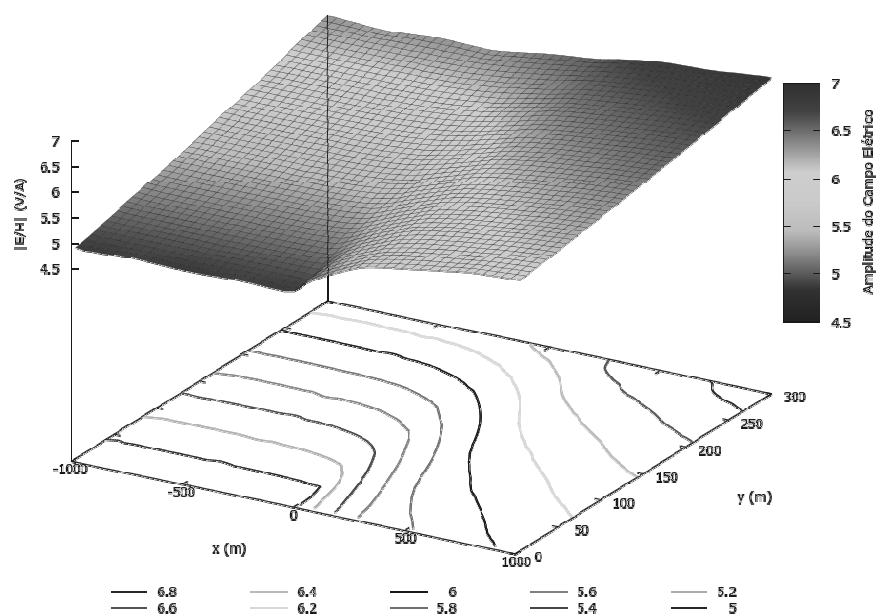


Figura 2 - Amplitude do campo elétrico sobre a região litorânea urbana

A partir da Figura 2 é possível observar uma clara diferença na amplitude do sinal na faixa litorânea e na faixa continental. Esta diferença se dá graças às diferentes condutividades dos meios. Na região com suspensão salina, a amplitude do campo elétrico tende rapidamente a se aproximar das características de amplitude da região de água salgada. O concreto e a água do mar são ambos mais condutores que o ar, o que os torna meios preferenciais para a propagação do campo. A diferença na amplitude das regiões se dá pela diferença entre as amplitudes da água e do concreto, que são da ordem de 10^2 . A região de maior amplitude do campo se dá nas proximidades da faixa de concreto pois, como o meio desta região é mais condutor que o ar e que a suspensão salina, o campo tende a passar por ela. Observa-se também uma região de transição entre a faixa litorânea e continental, e que esta transição ultrapassa a região entre o mar e o concreto, causando regiões com menor amplitude dentro da área de concreto.

A Figura 3 representa a amplitude do campo elétrico na região litorânea, contudo sem a presença do concreto.

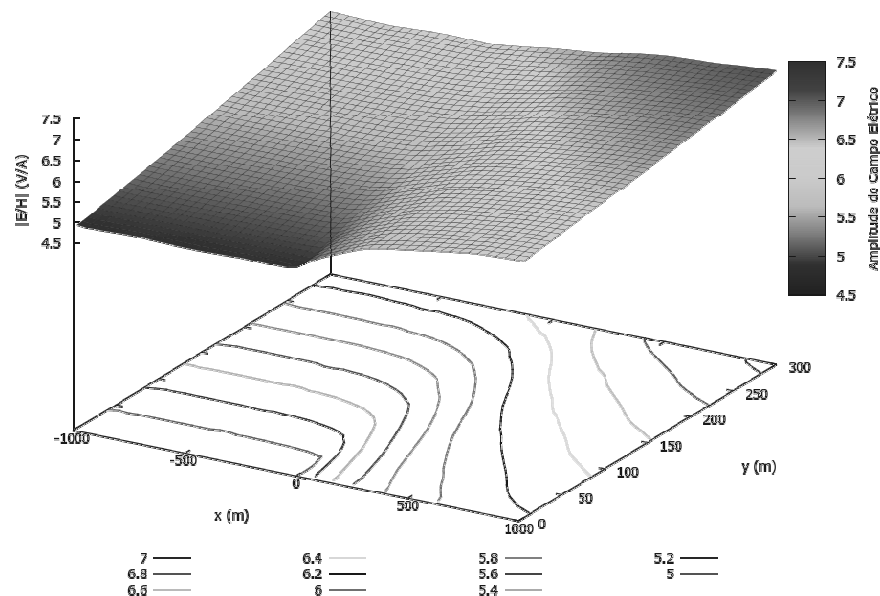


Figura 3 - Amplitude do campo elétrico sobre a região litorânea não urbana

A Figura 3 representa a amplitude do campo elétrico na região litorânea, contudo sem a presença do concreto. Surge novamente o padrão observado na Figura 2, devido à presença do mar. Por não haver um meio mais condutor que o ar e a suspensão salina na região de terra, as amplitudes dos campos são afetadas, apresentando regiões com maior amplitude na região de terra.

Analisando as Figuras 2 e 3, é possível constatar que o concreto, mesmo sendo um meio mais condutor que o ar, oferece dificuldade no transporte do campo elétrico. O contraste de resistividades apresentado na região litorânea gera uma zona de transição, onde as amplitudes mudam de patamar. Esta região de transição persiste no modelo sem a presença do concreto.

Assim, observa-se que a propagação de ondas eletromagnéticas é afetada pela presença de diferentes resistividades elétricas nos meios em que atravessa, apresentando distorções nos níveis da amplitude de sinal das regiões vizinhas, mesmo que estas possuam resistividades diferentes. Constatou-se também que a presença de uma zona urbana no modelo reduz os níveis de sinal na faixa de terra.



6. CONCLUSÕES

Em face dos dados apresentados e discutidos, observa-se que existe uma distorção na amplitude do sinal emitidos da fonte devido ao contraste de resistividades na região litorânea, e que as regiões urbanas apenas agravam esta diferença, o que diminui a amplitude do sinal na região de terra, em comparação com as regiões em que não há presença da zona urbana.

Os resultados apresentados podem ser utilizados na engenharia para estudos de atenuação de sinal, considerando meios com grandes contrastes de resistividade elétrica. Estes dados ainda podem ser utilizados para planejamento de instalações de antenas repetidoras, pois uma vez detectados os pontos onde o sinal sofre atenuação e suas causas, pode-se planejar melhor as zonas de cobertura.

Contudo, deve-se observar que a frequência de sinal utilizada para a simulação não é a usualmente empregada para o transporte de sinais em telecomunicações. Contudo, isto não inutiliza os resultados obtidos, pois a influência da maritimidade sobre o sinal existe independente da frequência, mesmo que os sinais de alta frequência sejam mais energéticos. Em trabalhos futuros, objetiva-se o uso de frequências mais próximas das faixas de uso comercial nas telecomunicações, comparando a sua propagação com a dos campos de frequências penetrantes, como a utilizada no presente trabalho.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à FAPESB pelo apoio financeiro do projeto com bolsa de Iniciação científica.

REFERÊNCIAS

BATISTA, L.S. **Otimização Computacional da Técnica de Elementos Finitos Para o Modelamento Geofísico Eletromagnético**. Pará: Universidade Federal do Pará, 1991.

BATISTA, L.S. **Espalhamento de Ondas Planas Eletromagnéticas Por Um Dique Vertical Com Cobertura**. Bahia: Universidade Federal da Bahia, 2000

NETO, P.A. **História das Comunicações e das Telecomunicações**. Pernambuco: Universidade Federal de Pernambuco. 2009. Disponível em: <[http://www2.ee.ufpe.br/codec/Historia das comunicaes e das telecomunicaes_UPE.pdf](http://www2.ee.ufpe.br/codec/Historia%20das%20comunicaes%20e%20das%20telecomunicaes_UPE.pdf)>. Acesso em 07 ago 2012.

SYLVESTER, P.P.; FERRARI, R.L. **Finite Elements for Electrical Engineers**. 3. ed. Cambridge: 1996.