



# 2º CONGRESSO BRASILEIRO DE P&D EM PETRÓLEO & GÁS

## MODELAGEM DE DADOS DE GPR ATRAVÉS DO MÉTODO FDTD

Gleide A. N. Dias<sup>1</sup>, Jadir C. Silva<sup>2</sup>, Paula F Rocha<sup>3</sup>, Jorge L. Costa<sup>4</sup>

<sup>1</sup>UFRJ-Depto.Geologia, Av.Brigadeiro Trompowski-CCMN, [gleidealencar@hotmail.com.br](mailto:gleidealencar@hotmail.com.br)

<sup>2</sup>UFRJ- Depto Geologia, Av.Brigadeiro Trompowski-CCMN, [jadir@geologia.ufrj.br](mailto:jadir@geologia.ufrj.br)

<sup>3</sup>UFRJ- Depto Geologia, Av.Brigadeiro Trompowski-CCMN, [ferrucio@acd.ufrj.br](mailto:ferrucio@acd.ufrj.br)

<sup>4</sup>UFRJ- Depto Geologia, Av.Brigadeiro Trompowski-CCMN, [jotalc@yahoo.com.br](mailto:jotalc@yahoo.com.br)

**Resumo** – Atualmente a indústria do petróleo vem cada vez mais se deparando com a necessidade de definir em profundidade estruturas do reservatório. Com a intenção de contribuir para a solução deste problema, fez-se um estudo usando modelos sintéticos para mostrar as respostas do campo eletromagnético referente a um determinado alvo. O algoritmo utilizado baseia-se no método de modelagem numérica de Diferenças Finitas no Domínio do Tempo (FDTD), simulando os resultados de um levantamento e, além disso, fornecendo quais os melhores parâmetros a serem utilizados para determinadas frequências, a exemplo do que é feito com o Radar de Penetração em Solo (GPR). Neste trabalho foram simulados polarização, geometria e parâmetros constitutivos (permissividade dielétrica e condutividade elétrica). Os resultados, apresentados neste trabalho, com as frequências de 50 e 100 MHz mostram os efeitos de atenuação da onda eletromagnética e os problemas de resolução do sinal para identificação do alvo em profundidade.

Palavras-Chave: FDTD; GPR; Reservatório

**Abstract** – Presently the oil industry has shown the importance of defining the structural framework of reservoirs. This study intends to contribute for the solution of this problem, using synthetic models in order to evaluate the electromagnetic signal due to a certain target. Use was made of an algorithm, which is based in the Finite Difference Time Domain Methods (FDTD). The simulated results of this survey found the best parameters for the chosen frequencies. In the present study there were simulated polarization, geometry and constitutive parameters (dielectric permittivity and electric conductivity). The results, using frequencies of 50 and 100 MHz, show clearly the effects of the electromagnetic waves attenuation and their problems related with signal resolution of targets in depth.

Keywords: FDTD, GPR, Reservoir

## 1. Introdução

Mechan & Wang (2002) discute que o detalhamento das estruturas internas de reservatórios são muito importantes para engenharia, água subterrânea, avaliações ambientais e, estudo de análogos de reservatório petrolífero. A vantagem do levantamento de um análogo de reservatório é que este é acessível ao contrário do reservatório real, que se encontra em grandes profundidades. Podem ser realizadas aproximações que envolvem suposições e continuidade de feições podendo-se obter pontos controlados para o desenvolvimento do estudo.

Busca-se atualmente metodologias capazes de definir com maior resolução as estruturas do reservatório. O radar de penetração no solo (GPR) é uma ferramenta geofísica utilizada no estudo de alvos em subsuperfície com alta resolução. Ela consiste de um sistema de geração de pulsos de energia eletromagnética com altas frequências, onde o campo eletromagnético é parcialmente refletido ao incidir em uma interface que separa meios com propriedades eletromagnéticas contrastantes (MARQUES, 1999).

Segundo as leis fundamentais do eletromagnetismo (EM), um campo elétrico é induzido na estrutura geoeletrica pela variação do campo magnético. Em termos gerais, as equações diferenciais parciais, que regem os efeitos EM são expressos pelas equações de Maxwell,

$$\nabla_x \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}, \quad (1)$$

$$\nabla_x \vec{H} = -\frac{\partial \vec{D}}{\partial t} + \vec{J}, \quad (2)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0, \quad (3)$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = q_v, \quad (4)$$

onde  $t$  – tempo,  $q_v$  - o volume de densidade de carga elétrica,  $\vec{E}$  - vetor campo elétrico,  $\vec{H}$  - vetor campo magnético,  $\vec{B}$  - indução eletromagnética,  $\vec{D}$  - vetor deslocamento elétrico e  $\vec{J}$  - densidade de corrente total.

O método FDTD aplicado para a solução das equações de Maxwell discretiza o espaço ( $\Delta x$ ,  $\Delta y$ ,  $\Delta z$ ) e o tempo  $\Delta t$ , podendo ser considerado 2D ou 3D. O modelo FDTD representa uma versão discretizada do problema real e de tamanho limitado, sendo que o bloco construído é discretizado, conhecido como uma célula Yee (Figura 1).

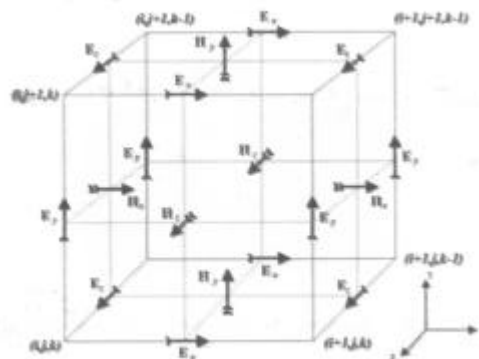


Figura 1. Célula Yee FDTD 3D.

Conforme mencionado por Merwe et al. (2000) a utilização do FDTD é ideal para modelar o espalhamento provocado por heterogeneidades do meio. Os resultados da modelagem da constante dielétrica podem ser usadas no planejamento de aquisição e interpretação dos dados GPR.

Para a aquisição dos dados, os resultados da modelagem podem ser usados para determinar se uma feição ou interface resultará em reflexões mensuráveis, e quais frequências das antenas são adequadas para o imageamento. Para a interpretação, a modelagem numérica resultante pode ser usada para melhor entender os registros do tempo de percurso e variações de amplitude, controlados pelas propriedades dielétricas (Martines and Byrnes, 2001).

## 2. Modelagem de GPR em 2D

### 2.1. Suposições

Para facilitar o estudo de feições importantes na resposta do GPR a um alvo, Giannopoulos (2002) propõe as seguintes suposições: o meio é considerado linear e isotrópico, a antena transmissora é modelada como um dipolo Hertz ideal e os parâmetros constitutivos, na maior parte dos casos, não variam com a frequência. Para quaisquer meios lineares e isotrópicos, os parâmetros constitutivos podem ser incluídos no modelo. Além disso, eles podem modelar dielétricos com frequência dependente da permissividade descrita pela formula de Debye (Giannopoulos, 2002) de acordo com a Equação 5.

$$\epsilon = \epsilon_{\infty} + \frac{\epsilon_s - \epsilon_{\infty}}{1 + j\omega t}, \quad (5)$$

onde  $\epsilon_{\infty}$  é a permissividade dielétrica em altas frequências,  $\epsilon_s$  é a permitividade DC e  $\omega$  é a frequência angular.

### 2.2 Discretização

Em geral, o tamanho da célula é definido de acordo com os critérios de estabilidade numérica. Adicionalmente ajusta-se esse tamanho à resolução necessária para definição do alvo. Portanto, deverá existir uma correlação direta entre a frequência do pulso eletromagnético emitido pela fonte e o tamanho do alvo, para que seja possível a total definição no modelo. Um outro fator que influencia a discretização é o erro associado com a dispersão numérica induzida. Este erro pode ser mantido em um mínimo, se seguida a regra de Thumb (Giannopoulos, 2002), i.e

$$\Delta l = \frac{1}{10}. \quad (6)$$

## 4. Caracterização do modelo

O estudo foi baseado em um modelo com estrutura geoeletrica simples de camadas sobrepostas (Figura 2) com uma malha de  $0.05 \times 0.05 \text{ m}^2$ , utilizando ambas as frequências de excitação de 50 e 100 MHz. A propagação da onda eletromagnética considerada é o modo TE ( $E_z$ ,  $H_x$ ,  $H_y$ ), segundo Liu et al. (2002) e será sempre orientada perpendicular a direção de propagação.

A fonte considerada para a modelagem é uma linha de corrente do tipo *wavelet Ricker* com amplitude igual a 1. O modelo tem dimensões  $7 \times 7 \text{ m}^2$ , composto por 4 camadas, como mostra a figura 2. Sendo considerado como alvo principal a heterogeneidade dentro da camada de areia. Para a caracterização deste modelo foram utilizados 26 traços (amostras) separados de 0.25 m. A separação entre as antenas transmissora e receptora é de 0.5 m e o tempo total de amostragem  $1e-7 \text{ s}$ . A posição inicial da antena transmissora está em (0.00, 5.01) e deslocando-se a cada 0.25 m na direção x. Já a posição inicial da antena receptora é de (0.50, 5.01), deslocando-se conjuntamente com a antena transmissora.

O modelo é não magnético. Os parâmetros como permissividade dielétrica relativa (a qual controla a velocidade de propagação) e condutividade elétrica (que controla a atenuação) são mostrados na tabela 1.

Tabela 1. Parâmetros.

Meio	Permissividade Dielétrica (F/m)	Condutividade Elétrica (S/m)
Espaço Livre	1	0
Areia Seca	10	0.001
Folhelho	20	0.01
Areia	10	0.001
Corpo Condutivo	30	10

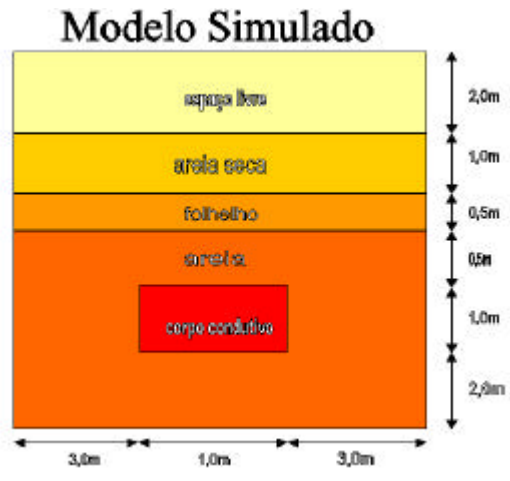


Figura 2 – Caso estudado para análise das interfaces em 2D.

O coeficiente de reflexão (RC) de sinais do GPR em materiais não magnéticos são dados em função da impedância EM, substituindo o seu equivalente a  $\epsilon_{r1}$ , que é a constante dielétrica do meio superior, e  $\epsilon_{r2}$  a constante dielétrica do meio inferior, em interfaces de materiais de diferentes litologias ou saturações de água. O coeficiente de reflexão pode ser calculado da seguinte forma,

$$RC = [(\epsilon_{r1})^{1/2} - (\epsilon_{r2})^{1/2}] / [(\epsilon_{r1})^{1/2} + (\epsilon_{r2})^{1/2}] \tag{7}$$

#### 4. Resultados

As principais feições obtidas para as respostas do GPR ao modelo sintético nas figuras 3 e 4 mostram o detalhamento da propagação da onda eletromagnética em um mesmo modelo, com diferentes frequências da antena. As interfaces das camadas são melhor visualizadas na figura 4. Pode-se também observar com melhor clareza a presença do alvo identificado pela difração.

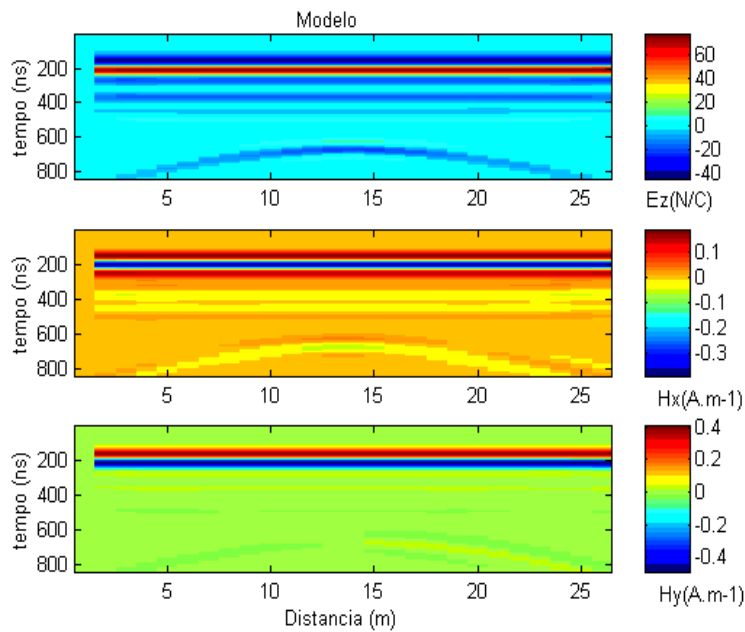


Figura 3 – Perfil dos campos campo elétrico e magnético com antena de 50 MHz.

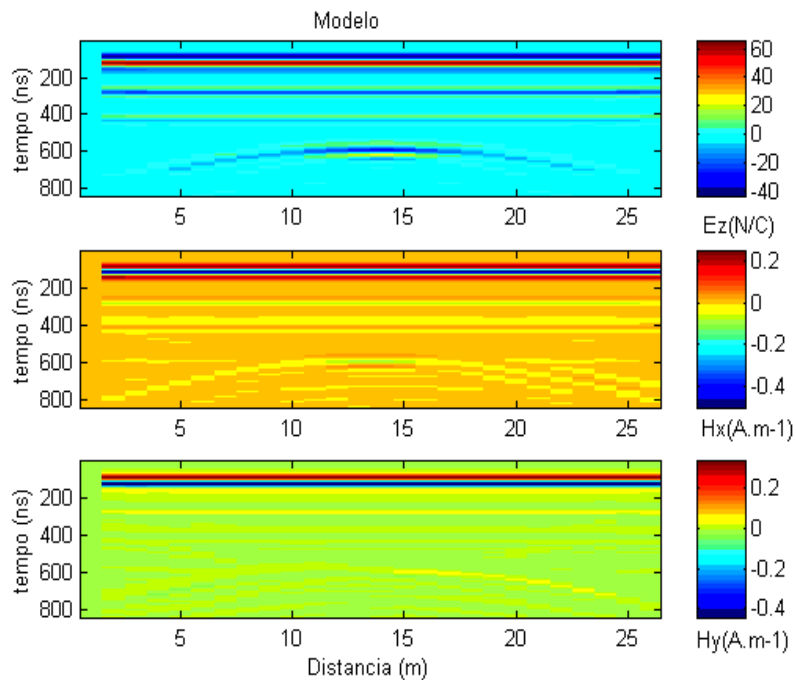


Figura 4 – Perfil dos campos campo elétrico e magnético com antena de 100 MHz.

## 7. Conclusões

A modelagem de FDTD mostrou-se viável para simulação, análise e entendimento do modelo, fornecendo resposta acurada e eficiente. Com a frequência mais alta (100 MHz) obteve-se uma maior resolução quando comparada com a frequência de 50 MHz. A forma hiperbólica clássica determina a posição e geometria do alvo.

Este estudo mostrou a utilidade de dados sintéticos no processo de seleção dos melhores parâmetros de aquisição a serem utilizados nos trabalhos de campo. Uma vez obtido o perfil, a migração da imagem dos dados de radar pode ser feita para reconstruir o aspecto do alvo, recuperando sua geometria original.

## 8. Agradecimentos

À Agência Nacional do Petróleo ANP pelo apoio financeiro.

## 9. Referências

- GIANNOPOULOS, A. GPRMAX2d. User's Manual. Version 1.5. 2002.
- LIU., L. & Arcone S. A. Numerical Simulation of Near -Surface GPR in TE and TM Modes. Ninth International Conference on Ground Penetrating Radar. April Penetrating Radar. April 29 – May 2, 2002, Santa Bárbara, Califórnia USA. P273-278.
- MARQUES J.J. E. Curso – O Radar de Penetração de Solo - GPR. Teoria – Aquisição Processamento Interpretação. 1999.
- MARTINEZ & BYRNES. Modelling Dielectric-Constant Values of Geologic Materials: Na aid To Ground – Penetrating radar Data Colletion and Interpretaion-- page 4 of 13. Kansas Geological Survey, Current Research in Earth Science, Bulletin 247, part 1. 2001.
- MERWE, A., V., D & GUPTA, I., J., A Novel Signal Processing Technique for Clutter Reduction in GPR Measurements of Small, Shallow Land Mines. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 38, no. 6, november 2000.
- WANG, D. & MCMECHAN G. A. Finite-difference Modeling of Borehole Ground Penetrating Radar Data. Journal of Applied Geophysics 49 (2002) 111-127.