



Modelagem tridimensional do método MCSEM usando COMSOL Multiphysics

Maria de Fátima Lopes Leite* (FAGEOF/UFGA, Brasil), Victor Cezar Tocantins (FAGEOF/UFGA, Brasil)

Copyright 2015, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica.

This paper was prepared for presentation at the 14th International Congress of the Brazilian Geophysical Society, held in Rio de Janeiro, Brazil, August 3-6, 2015.

Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the Twelfth International Congress of The Brazilian Geophysical Society and do not necessarily represent any position of the SBGf, its officers or members. Electronic reproduction or storage of any part of this paper for commercial purposes without the written consent of The Brazilian Geophysical Society is prohibited.

Resumo

In this paper, we propose the use of the COMSOL Multiphysics software to simulate the electromagnetic field propagation related to the marine controlled source electromagnetic (CSEM) method. For this, was simulated two three-dimensional models, both horizontally layered and presenting bodies of anomalous resistivity. The first model was based on one that was presented by Endo et al. (2009) which used other modeling tools and thus validated the results obtained in this study through COMSOL. The second model was built to explore the complexity of the geometries that can be built by the software. Using COMSOL Multiphysics, you can configure and perform simulations that are solved by the finite element method whose equations are implemented in nodes of this software. Therefore, it is a simple interface able to generate satisfactory results for modeling method MCSEM.

Introdução

O MCSEM (Marine controlled-source electromagnetic), também chamado SeaBed Logging (SBL), é um método de exploração geofísica que na última década vem corroborando com a sísmica na redução do risco exploratório em águas profundas (Constable, 2010) e que se destaca por ser sensível a altas resistividades elétricas (parâmetro importante no estudo da viabilidade econômica de reservatórios). O levantamento consiste da transmissão e recepção de ondas eletromagnéticas de baixa frequência (geralmente de 0.1 a 5 Hz) no assoalho oceânico de modo a identificar alvos resistivos soterrados, como reservatórios de hidrocarbonetos. Por ser uma técnica de exploração, o MCSEM requer ferramentas de modelagem numérica onde o método dos elementos finitos (Jin, 2002) se sobressai em relação ao método da equação integral (Endo et al., 2009), por exemplo, devido à sua capacidade de seguir estruturas geológicas mais complexas. No entanto, a reflexão da onda eletromagnética nas fronteiras do domínio do modelo ainda é um desafio, visto que o método MCSEM atua com comprimentos de onda grandes. Neste trabalho, utilizamos o COMSOL Multiphysics (Park et al., 2008) por ser um pacote de modelagem computacional multifísica mais simples e rápido que os tradicionais, além de apresentar uma interface interativa e integrada para configurar, resolver e pós-processar modelos matemáticos, tornando-

se, assim, interessante à simulação do MCSEM.

Metodologia

Foram construídos dois modelos com auxílio do COMSOL Multiphysics, ambos tridimensionais e usando o módulo de Rádio Frequência (RF) especificado em Ondas Eletromagnéticas no domínio da frequência, o qual calcula o campo elétrico com base na equação da onda harmônica para uma ou mais frequências. A equação utilizada é uma combinação das leis de Maxwell-Ampère e Faraday e é dada da seguinte forma:

$$\nabla \times \mu_r^{-1} (\nabla \times \mathbf{E}) - k_0^2 - \left(\epsilon_r - j \frac{\sigma}{\omega \epsilon_0} \right) \mathbf{E} = \mathbf{0} \quad (1)$$

em que $\mu_r = \mu/\mu_0$ é a permeabilidade magnética relativa, $\epsilon_r = \epsilon/\epsilon_0$ é a permissividade elétrica relativa do meio, $\sigma = 1/\rho$ é a condutividade do meio recíproca da resistividade ρ , k_0 é o número de onda no espaço livre e $\omega = 2\pi f$ é a frequência angular de operação. Os valores de permeabilidade magnética μ e permissividade elétrica ϵ usados nas modelagens são iguais aos do espaço livre: $\mu = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m e $\epsilon = 8.854187 \times 10^{-12}$ F/m.

O software COMSOL Multiphysics utiliza o método dos elementos finitos (Jin, 2002) para resolver problemas de valor de fronteira, ele usa elementos de bordas ou nodais, dependendo da natureza do problema: escalar ou vetorial. Para o método MCSEM em 3D, o tipo de elemento empregado foi o tetraédrico. A condição de fronteira empregada no domínio tridimensional foi do tipo ABC (Jin, 2002) representada pela imposição da condição de *Scattering Boundary Condition* para fazer a fronteira transparente à onda espalhada.

Resultados

O primeiro modelo proposto no trabalho de Endo et al. (2009) é formado por três camadas horizontais representando o ar, o mar e uma camada de sedimentos, cujas resistividades equivalem a $\rho_{ar} \rightarrow \infty$, $\rho_{mar} = 0.33 \Omega m$ e $\rho_{sed} = 1 \Omega m$ como ilustra a Figura 1. Três corpos anômalos estão presentes neste modelo, dos quais, dois apresentam a resistividade de $30 \Omega m$ e um de $100 \Omega m$. As dimensões das anomalias em x, y, z são de $3 \times 2 \times 1$ km para os corpos laterais e de $4 \times 2 \times 0.2$ km para o corpo central. Para a simulação deste modelo, usamos para o domínio do *background* dimensões de $20 \times 6 \times 6$ km, considerando o ar como tendo 2 km de espessura, a coluna de água com 1.35 km e uma camada de sedimento de 3 km. Como fonte eletromagnética, usou-se um dipolo elétrico a 50 metros do assoalho oceânico e a frequência de operação foi de 0.75 Hz.

A Figura 2 ilustra a malha resultante da simulação do Modelo 1, na qual utilizamos elementos tetraédricos com discretização não-uniforme nos domínios, mas

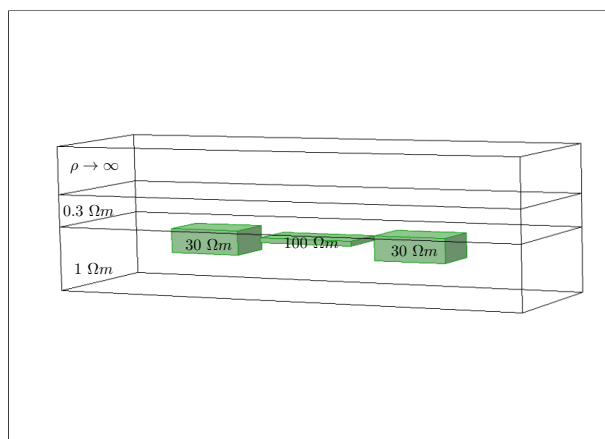


Figura 1: Modelo 1 proposto por Endo et al. (2009), gerado no COMSOL Multiphysics.

observamos que nas regiões de contraste de resistividade a densidade da discretização é muito maior devido a variação do campo eletromagnético

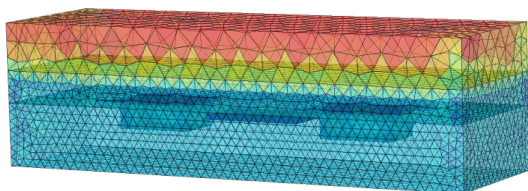


Figura 2: Malha não estruturada tetraédrica para o Modelo 1 gerada no COMSOL Multiphysics.

As curvas de amplitude do campo elétrico versus *offset* para o meio do *background* (cor verde) e do modelo com os corpos anômalos (cor azul) estão mostradas na Figura 3.

A fim de validar a metodologia empregada neste trabalho, geramos a curva do campo elétrico anômalo, definida como a diferença entre as respostas do modelo com e sem corpos anômalos, como está representado na Figura 4. A curva obtida é semelhante a que foi apresentada no trabalho de Endo et al. (2009), cujos resultados são obtidos pelo método da equação integral.

É sabido que a grande vantagem do método dos elementos finitos é a sua capacidade de modelar corpos de alta complexidade geométrica (Zienkiewicz et al., 2005). O segundo modelo proposto (Modelo 2) explora esta característica.

As dimensões do *background* são de $12 \times 10 \times 3.5$ km, cujas camadas de ar, mar e sedimento possuem 1, 0.5

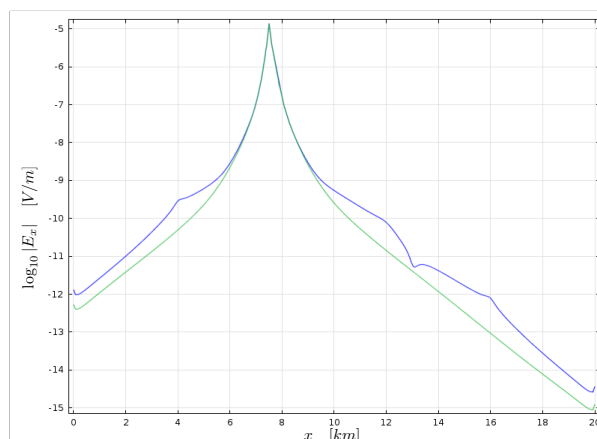


Figura 3: Amplitude do $\log_{10} |E_x|$ versus *offset* sem corpos anômalos (verde) e com corpos anômalos (azul) para o Modelo 1.

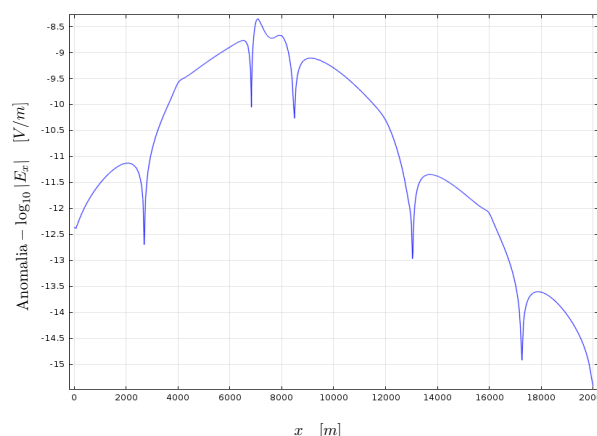


Figura 4: Campo anômalo para o Modelo 1.

e 2 km, respectivamente. Para este modelo, considerou-se também um reservatório de aproximadamente 50 m de espessura localizado a 1 km da interface mar-sedimento, o qual apresenta forma irregular e resistividade igual a $\rho = 100 \Omega m$. As resistividades do ar, da água do mar e do sedimento consideradas foram as mesmas definidas no Modelo 1. Neste modelo, ilustrado na Figura 5, a frequência utilizada foi de 1 Hz.

A malha para o Modelo 2 está ilustrada na Figura 6. Novamente, observa-se que existe uma maior densidade na discretização da malha nas regiões mais delgadas e com contrastes de resistividade. A curva em \log do valor absoluto do campo elétrico versus *offset* está ilustrada na Figura 7. Uma apresentação muito comum das curvas de anomalia no método MCSEM é através da razão dos valores absolutos do campo elétrico do modelo com corpo anômalo (reservatório) e do campo elétrico do *background* (Srňka et al., 2006). Esta curva para o Modelo 2 está ilustrada na Figura 8 onde nota-se o maior efeito da presença da anomalia. Devido a complexidade e irregularidade da forma do reservatório, a curva se apresenta assimétrica.

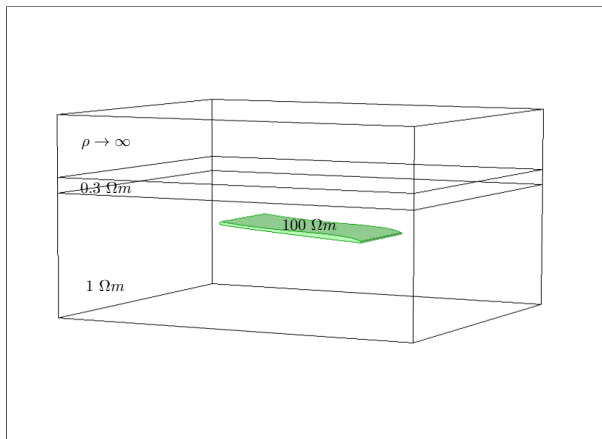


Figura 5: Modelo 2 com reservatório de geometria complexa gerado no COMSOL Multiphysics.

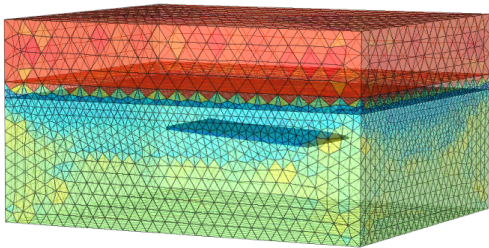


Figura 6: Malha não estruturada tetraédral gerada no COMSOL Multiphysics para o Modelo 2.

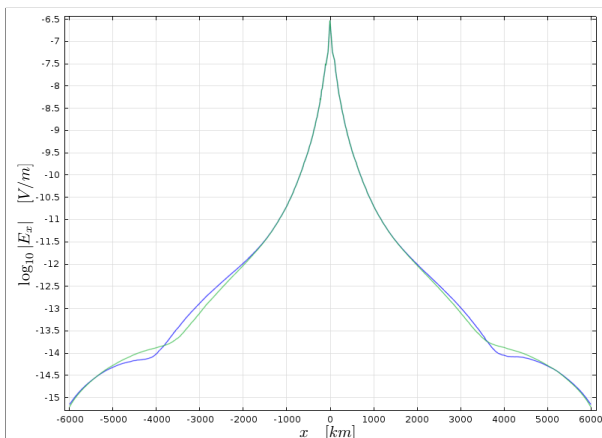


Figura 7: Amplitude do $\log_{10} |E_x|$ versus *offset* sem corpo anômalo (verde) e com corpo anômalo (azul) para o Modelo 2.

Conclusões

A metodologia utilizada neste trabalho para a simulação de modelos da técnica MCSEM mostrou-se válida. Modelos

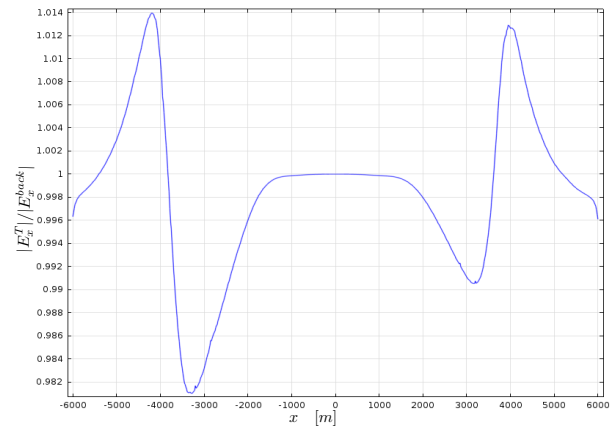


Figura 8: Campo anômalo para o Modelo 2.

propostos neste trabalho mostraram que o emprego do software COMSOL Multiphysics apresenta uma ferramenta adequada na construção de ambientes geoeletricos com geometrias complexas, além de apresentar interfaces amigáveis e *solvers* otimizados na solução de sistemas lineares.

Referências

- Constable, S. (2010) Ten years of marine csem for hydrocarbon exploration. *Geophysics*, **75**(5), 75A67–75A81, doi:10.1190/1.3483451.
- Endo, M., Cuma, M. & Zhdanov, M.S. (2009) Large-scale electromagnetic modeling for multiple inhomogeneous domains. *Communications in Computational Physics*, **6**, 269–289.
- Jin, J. (2002) *The Finite Element method in Electromagnetics*. New York, John Wiley & Sons, Inc., 2nd edn.
- Park, J., Bjørnarå, T.I., Westerdah, H. & Gonzalez, E. (2008) On boundary conditions for csem finite element modeling. *I COMSOL Multiphysics conference, November*, Hanover, Germany, 1–4.
- Srnka, L.J., Carazzone, J.J., Ephron, M.S. & Eriksen, E.A. (2006) Remote reservoir resistivity mapping. *The Leading Edge*, **25**(8), 972–975, doi:10.1190/1.2335169.
- Zienkiewicz, O.C., Taylor, R.L. & Zhu, J.Z. (2005) *The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals*. Elsevier Butterworth-Heinemann., 6th edn.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia de Geofísica do Petróleo (INCT-GP). Gostaríamos também de agradecer à PETROBRAS pelo suporte financeiro e ao Curso de Pós-Graduação em Geofísica (CPGf-UFPA) pelo apoio tecnológico oferecido.