



## Calibração do campo elétrico in-line de modelos mCSEM 1D, 2D e 3D

Frayzer Lima de Almeida<sup>1</sup> e Luiz Rijo<sup>1</sup>  
[frayzer\\_lima@ig.com.br](mailto:frayzer_lima@ig.com.br), [rijo@amazon.com.br](mailto:rijo@amazon.com.br),  
 (1) CPGf/IG/UFPa

Copyright 2008, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

Este texto foi preparado para a apresentação no III Simpósio Brasileiro de Geofísica, Belém, 26 a 28 de novembro de 2008. Seu conteúdo foi revisado pelo Comitê Técnico do III SimBGf, mas não necessariamente representa a opinião da SBGf ou de seus associados. É proibida a reprodução total ou parcial deste material para propósitos comerciais sem prévia autorização da SBGf.

### Resumo

Marine Controlled Source Eletromagnetic – mCSEM é um método geofísico eletromagnético que nos últimos dez anos vem sendo usado na prospecção de hidrocarboneto com bastante êxito. Este método consiste em um dipolo elétrico horizontal localizado um pouco acima do assoalho marinho, operando em baixa frequência (0.1 - 1.0 Hz) e receptores regularmente distribuídos no fundo do mar que captam os campos eletromagnéticos provenientes da difusão de energia gerada pelo dipolo transmissor. Neste trabalho, propomos soluções numéricas por elementos finitos para modelos geoeletrônicos mCSEM 3D. Para fins de análise de coerência, os resultados obtidos são comparados com soluções semelhantes disponíveis na literatura. As soluções propostas apresentaram boa coerência em relação às soluções do mCSEM 2D, diferentemente das soluções provenientes da literatura mCSEM 3D, quando comparadas às do mCSEM 2D.

### Introdução

A prospecção de hidrocarboneto em águas profundas apresenta risco exploratório muito elevado. Em decorrência disto, faz-se necessário o desenvolvimentos e aprimoramento de novos métodos não-sísmicos para auxiliar a sísmica, com o objetivo da diminuição do risco exploratório. Neste sentido, o método eletromagnético, denominado marine Controlled Source Eletromagnetic - mCSEM é bastante promissor (Constable and Snrka, 2007). Trata-se de nova técnica indireta de detecção e/ou delineação de reservatórios de hidrocarboneto e que vem recebendo nos últimos dez anos grande atenção por parte da indústria exploratória de petróleo. O método mCSEM consiste de um dipolo elétrico horizontal móvel no ambiente marinho, onde suas medidas traçam o contraste de resistividade elétrica entre o reservatório e as camadas sedimentares encaixantes. O método é baseado na difusão de energia eletromagnética gerada por um dipolo elétrico horizontal móvel, onde essa difusão é detectada por uma disposição de receptores distribuídos no fundo do mar.

Este trabalho propõe uma ligeira modificação no algoritmo numérico por elementos finitos tridimensionais propostos por Souza (Souza, 2007) baseado nos potenciais  $(A, \Phi)$ . Para fim de avaliação numérica dos nossos resultados, apresentaremos comparações entre as amplitudes normalizadas da componente  $E_x$  *in-line* (Souza 2007), provenientes de modelos geoeletrônicos 1D, 2D e 3D, os quais serão preliminarmente caracterizados, a seguir.

### Características da modelagem do CSEM 1D

O modelo de referência do mCSEM 1D (Figura 1), é formado por camadas estratificadas plano paralelas onde a camada que representa o ar possui resistividade  $\rho_0$  infinita, o mar com uma resistividade  $\rho_1$  em torno de  $0.3 \Omega$  e espessura  $h_1$ , logo abaixo, rochas sedimentares encaixantes com resistividade  $\rho$  em torno de  $1.0 \Omega m$ , um dipolo elétrico horizontal (DEH) em uma profundidade  $h_0$  e finalmente os receptores, representados por asteriscos localizados no assoalho marinho que registram os campos eletromagnéticos. Por outro lado, estes campos são solucionados teoricamente a partir das equações de Maxwell, no domínio da frequência, por exemplo, em termos dos potenciais de Schelkunoff (Rijo, 2001; Rijo, 2003). Estes campos eletromagnéticos oriundos de um modelo similar ao que é mostrado na Figura 1, são denominados campos primários ou campos NoHc (No Hidrocarboneto) 1D. Já o modelo de referência do mCSEM 1D pode ser também denominado de modelo sem hidrocarboneto ou modelo NoHc - (No Hidrocarboneto) ou modelo mCSEM 1D sem reservatório.

Já o modelo com reservatório 1D (Figura 2), é similar ao modelo descrito anteriormente, referente à Figura 1, a menos de uma camada plano paralela representando um reservatório de hidrocarboneto com resistividade  $\rho_3$  entre  $10$  a  $100 \Omega m$ , e espessura entre  $50$  a  $100$  metros.

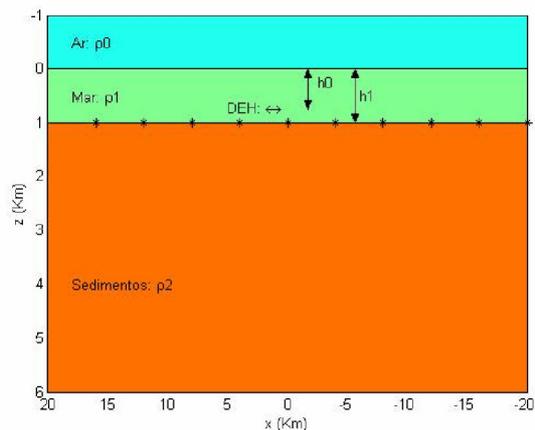


Figura 1: Modelo geoeletrico de referencia 1D.

Os receptores, representados simbolicamente por asteriscos, se localizam no asoalho marinho e registram os campos eletromagnéticos. Como no caso anterior, estes campos também são solucionados teoricamente a partir das equações de Maxwell no domínio da frequência, por exemplo, em termos dos Potenciais de Schelkunoff (Rijo, 2001; Rijo, 2003). Estes campos eletromagnéticos proveniente de um modelo similar ao que é mostrado na Figura 2, são denominados campos com Hc - (Hidrocarboneto) do mCSEM 1D. Já o modelo mCSEM 1D com reservatório pode ser também denominado de modelo com hidrocarboneto ou modelo Hc - (Hidrocarboneto).

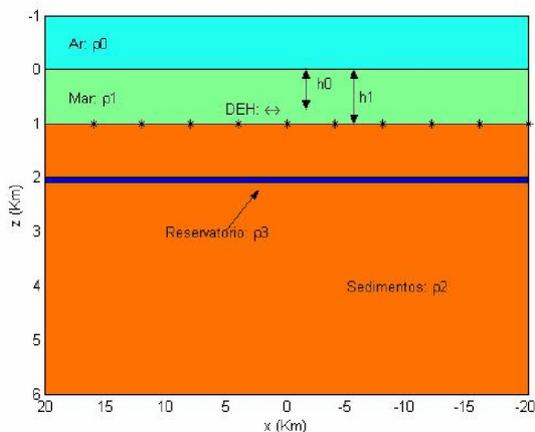


Figura 2: Modelo geoeletrico com reservatório 1D.

**Características da modelagem do CSEM 2D**

O modelo mCSEM bidimensional (Figura 3) é formado por camadas estratificadas onde o ar possui resistividade  $\rho_0$  infinita, o mar com uma resistividade  $\rho_1$  em torno de  $0.3 \Omega m$  e espessura  $h_1$  que varia entre 1 a 3.5 km, as

rochas sedimentares encaixantes com resistividade  $\rho_2$  em torno de  $1.0 \Omega m$ , uma camada plano paralela representando um reservatório de hidrocarboneto com resistividade entre  $10$  e  $100 \Omega$ , com uma

na direção do eixo horizontal  $ox$ . Os receptores, como neste caso não são equacionados de acordo com as equações diferenciais (Rijo, 2003), mostrados na Figura 2, são denominados campos com Hc - (Hidrocarboneto) do modelo mCSEM 2D.

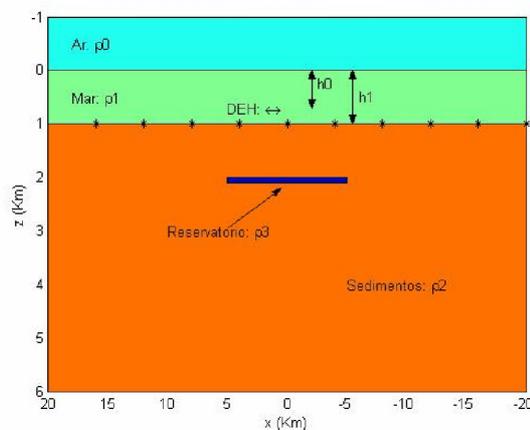


Figura 3: Modelo geoeletrico 2D.

**Características da modelagem do mCSEM 3D**

Finalmente o modelo tridimensional (Figura 4) é formado por camadas estratificadas onde o ar possui resistividade elétrica infinita, o mar com uma resistividade em torno de  $0.3 \Omega m$ , rochas sedimentares encaixantes com resistividade em torno de  $1.0 \Omega m$ , um volume tabular, paralelo às camadas estratificadas, representando um reservatório de hidrocarboneto com resistividade entre  $10$  e  $100 \Omega$  com uma espessura entre 50 e 100 metros e limitado nas direções dos eixo  $ox$ ,  $oy$  e  $oz$ , um dipolo elétrico horizontal (DEH) e finalmente os receptores localizados no fundo marinho que registram os campos eletromagnéticos. Como no caso anterior, estes campos eletromagnéticos são solucionados numericamente a partir das equações de Maxwell no domínio da frequência, por exemplo, segundo o método dos elementos finitos tridimensionais (Souza, 2007, Souza e Rijo, 2007), como também pelo método de equação integral tridimensional (Ueda e Zhdanov, 2005). Estes campos eletromagnéticos provenientes de um modelo similar ao que é mostrado na Figura 4, são

denominados campos eletromagnéticos com Hc - (Hidrocarboneto) do mCSEM 3D ou simplesmente campos do mCSEM 3D.

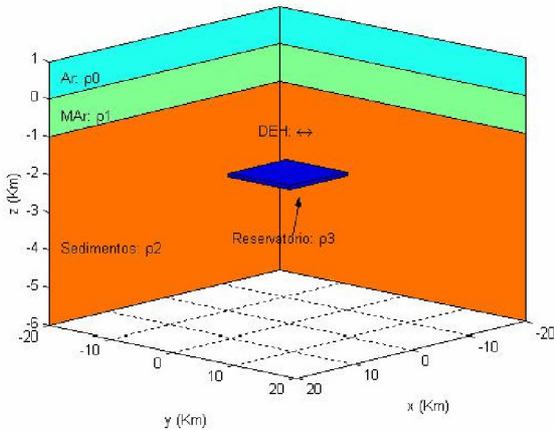


Figura 4: Modelo geoeletrico 3D.

Para fins de comparações entre as amplitudes normalizadas, da componente  $E_x$  *in-line*, do método mCSEM 1D, 2D e 3D, este trabalho propõe uma pequena modificação na formulação por elementos finitos tridimensionais com base nos potenciais  $(A, \Phi)$  para modelagem mCSEM 3D. A seguir mostramos a metodologia empregada neste trabalho

**Metodologia de modelagem do mCSEM 3D segundo os potenciais EM  $(A, \Phi)$**

Usando as equações de Maxwell em um meio não magnético, no domínio da frequência, em termos dos campos secundários  $E^s$  e  $H^s$

$$\nabla \cdot (\epsilon_0 E^s) = 0 \tag{1}$$

$$\nabla \times (-\nabla A^s + \Delta A^s) = J^s \tag{2}$$

$$\nabla \cdot (\nabla \Phi^s) = 0, \tag{3}$$

$$\nabla \times (\nabla \times A^s + \Delta A^s) = 0 \tag{4}$$

em que  $J = \Delta \sigma E$  é a densidade de correntes secundárias..

Em virtude de (3) e (4) podemos expressar os campos  $E^s$  e  $H^s$  em termos do potencial magnético  $A^s$  e do potencial elétrico  $\Phi^s = i\omega\mu\phi^s$  da seguinte forma

$$H^s = \nabla \times A^s, \tag{5}$$

$$E^s = -\nabla \Phi^s - \dot{A}^s \tag{6}$$

De (5) e (6) a equação (4) torna-se a equação rotacional do rotacional

$$\nabla \times \nabla \times A^s + \Delta A^s + \nabla \Phi^s = J^s \tag{7}$$

A equação (7) quando expressa segundo o método dos elementos finitos leva a uma matriz assimétrica apresentando possibilidade de modos espúrios instáveis numericamente. Para evitar esta dificuldade, aplicou-se a identidade vetorial

$$\nabla \times \nabla \times A^s = -\nabla^2 A^s - \nabla(\nabla \cdot A^s),$$

juntamente com a incorporação do calibre de Coulomb:

$$\nabla \cdot A^s = 0,$$

dando origem à equação

$$\nabla^2 A^s - \nabla(\nabla \cdot A^s) + \nabla \phi^s = -J^s, \tag{8}$$

para a qual, sua forma discretizada é estável numericamente. Na derivação da equação (7) definiu-se o potencial escalar reduzido  $\Phi^s = i\omega\mu\phi^s$ , o que resulta em uma matriz de elementos finitos simétrica.

Tomando o divergente da equação (7) e considerando a propriedade  $\nabla \cdot \nabla \times A^s = 0$ , tem-se

$$i\omega\mu \nabla \cdot (\nabla \times A^s + \Delta A^s) = \nabla \cdot J^s \tag{9}$$

Desta forma as equações (8) e (9) são solucionadas simultaneamente através do método dos elementos finitos (Souza, 2007, Souza e Rijo, 2007), do qual se obtém um sistema linear associado a uma matriz complexa, simétrica, bandeda e esparsa. Este sistema é resolvido numericamente pelo método do gradiente biconjugado (Souza, Rijo e Silva, 2005), resultando assim nos potenciais  $A^s$  e  $\phi^s$ .

Na formulação do problema direto usando os potenciais, os campos elétricos primários ( $E^p$ ) (Rijo, 2001) são calculados previamente e armazenados em arquivos numéricos. A determinação destes campos primários foi feita usando convolução numérica com os filtros de Anderson (Anderson, 1989).

A metodologia que este trabalho propõe é quase idêntica à metodologia proposta por Souza (Souza, 2007): Uma vez que ambas aplicam o critério de Galerkin sobre as

equações (8) e (9); Souza aplica a identidade (equação (10)) apenas à esquerda da equação (9), enquanto neste trabalho se aplica a identidade (equação (10)) tanto à esquerda quanto à direita da equação (9), sendo esta a diferença fundamental entre ambas as metodologias. Ao se aplicar a identidade da equação (10) à direita da equação (9), está se admitindo a continuidade da divergência de  $J^s$ .

$$-\int_{\Omega_e} \frac{\partial \mathcal{A}}{\partial \Omega_e} \mathcal{U} = \int_{\Omega_e} \frac{\partial \mathcal{A}}{\partial \Omega_e} \mathcal{U} + \oint_{\partial \Omega_e} N_\kappa N_l d\Sigma_e \quad (10)$$

Esta última equação é uma identidade das funções bases dos elementos finitos tridimensionais.

**Resultados**

Para avaliarmos os sinais eletromagnéticos mCSEM 1D, 2D e 3D, faz-se necessário o uso de modelos geoeletricos em ambientes de prospecção de hidrocarbonetos em águas profundas. Desta forma consideremos, de modo comum a todos os modelos geoeletricos, um dipolo elétrico horizontal (DEH) 30 metros acima do assoalho marinho, nas coordenadas  $x = 0$  e  $y = 0$ , operando a uma frequência de 0.125 Hz igual à usada por Souza, 2007. Inicialmente propomos um modelo geoeletrico de referência (Figura 1) onde o ar com uma resistividade elétrica infinita  $\rho_0 = \infty$ , o mar com uma resistividade  $\rho_1 = 0.3 \Omega m$  e espessura de  $h_1 = 1000$  metros e rochas sedimentares encaixantes com resistividade  $\rho_2 = 1 \Omega m$ . Em seguida, propomos um modelo geoeletrico com reservatório unidimensional, isto é, infinitas direções  $x$  e  $y$ , em conformidade com o modelo de referência acima descrito, a camada plano paralela de hidrocarboneto com resistividade  $\rho_3 = 100 \Omega m$ , espessura de 100 metros a uma profundidade em relação à superfície marinha  $h_2 = 1000$  metros (Figura 5).

Já para o modelo geoeletrico com reservatório bidimensional, propomos uma camada plano paralela de reservatório de hidrocarboneto com resistividade  $\rho_3 = 100 \Omega m$ , espessura de 100 metros a uma profundidade em relação à superfície marinha  $h_2 = 1000$  metros e largura limitada na direção  $x$  (veja

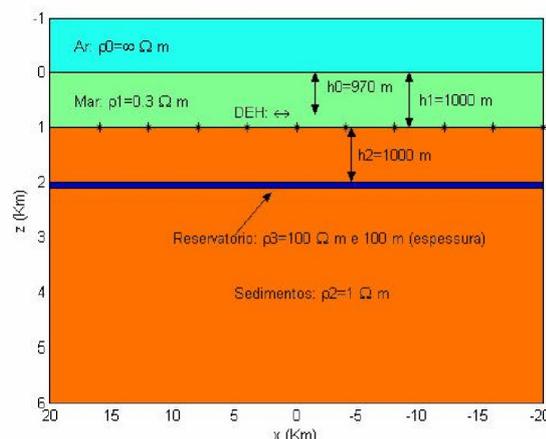


Figura 5: Modelo geoeletrico com reservatório 1D.

Figura 3). Finalmente para o modelo geoeletrico com reservatório tridimensional, consideramos um volume tabular de reservatório de hidrocarboneto com resistividade  $\rho_3 = 100 \Omega m$ , espessura de 100 metros a uma profundidade em relação ao assoalho marinho  $h_2 = 1000$  metros, largura limitada na direção  $x$  e comprimento também limitado na direção  $y$  (veja Figura 4).

Inicialmente compararmos as amplitudes da componente  $E_x$  in-line provenientes dos modelos com hidrocarboneto 1D e 2D propostos, sendo tais amplitudes normalizadas pelas amplitudes das componentes  $E_x$  in-line resultante do modelo de referência 1D acima descrito.

Os experimentos que serão discutidos a seguir seguem a mesma nomenclatura usada por Souza (Souza, 2007) semelhante a da Figura 7.

O experimento 2 – 2D (Figura 6) corresponde ao modelo 2D acima caracterizado, com uma largura na direção  $x$  de 5 km; já o Experimento 4 – 2D (Figura 6), também corresponde ao modelo 2D acima caracterizado, porém com uma largura na direção  $x$  de 10 Km. Os resultados 1D e 2D (Figura 6) foram obtidos por Rijo (2003).

Observa-se na Figura 6 a coerência física dos gráficos referentes ao Experimento 2 – 2D e Experimento 4 – 2D, uma vez que o primeiro advém de um resistor de apenas 5 Km de largura e o segundo de um resistor de 10 km de largura, onde tais resistores propiciaram sinais

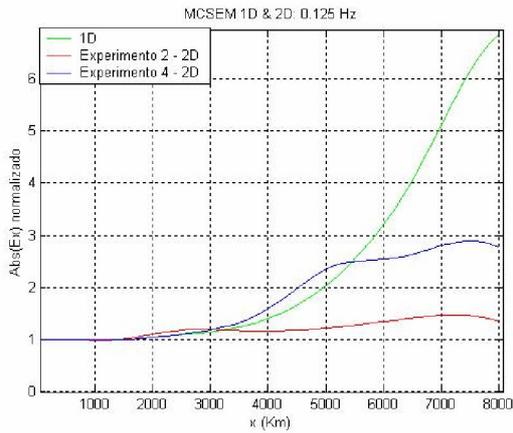


Figura 6: Respostas normalizadas da componente  $E_x$  *in-line* provenientes de modelos com reservatório 1D e 2D propostos.

de menor amplitude para o primeiro gráfico (Experimento 2 – 2D, cor vermelha) e de maior amplitude para o segundo gráfico (Experimento 2 – 2D, cor azul). O gráfico em verde (Figura 6) possui pelo menos duas funções: a primeira consiste em analisar a anomalia proveniente de um reservatório unidimensional, e a segunda, é de servir como gráfico padrão e/ou de referência para avaliar propostas de soluções numéricas de modelagens mCSEM 2D e 3D.

Agora compararemos as amplitudes da componente  $E_x$  *in-line* provenientes dos modelos 3D com hidrocarboneto, sendo tais amplitudes normalizadas pelas amplitudes das componentes  $E_x$  *in-line*, geradas pelo modelo de referência 1D. As amplitudes normalizadas e observadas na Figura 7 provêm de Souza (Souza, 2007); já as amplitudes normalizadas e observadas na Figura 8 provêm das simulações feitas através do algoritmo proposto neste trabalho, ou seja, segundo a metodologia de modelagem mCSEM 3D através dos potenciais EM ( $A, \Phi$ ) acima.

A simulação denominada de Experimento 1 (Figuras 7 e 8), corresponde ao modelo 3D acima caracterizado, com uma largura na direção x de 5 km e comprimento na direção y de 5 km; já a simulação denominada de Experimento 2 (Figuras 7 e 8), também corresponde ao modelo 3D acima caracterizado, com uma largura na direção x de 5 km e comprimento na direção y de 10 km; a simulação denominada de Experimento 3 (Figuras 7 e 8) também corresponde ao modelo 3D acima citado, com uma largura na direção x de 10 km e comprimento na direção y de 5 km; finalmente a simulação denominada de Experimento 4 (Figura 7 e 8), também corresponde ao modelo 3D acima caracterizado, com uma largura na direção x de 10 km e comprimento na direção y de 10 km. Os resultados 3D vistos na Figuras 7 são propostos

por Souza, (Souza, 2007) e os resultados vistos na Figura 8 resultam deste trabalho.

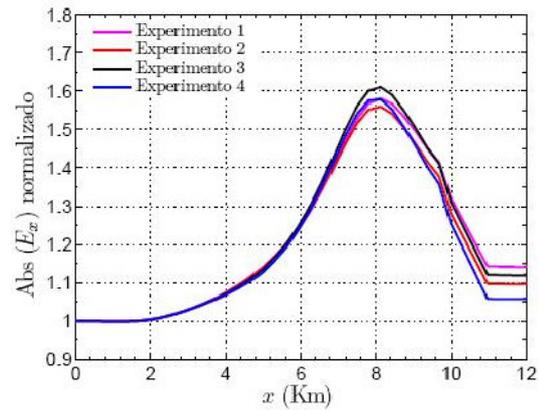


Figura 7: Respostas normalizadas *in-line* do campo  $E_x$  para os experimentos 1, 2, 3 e 4 (Souza, 2007).

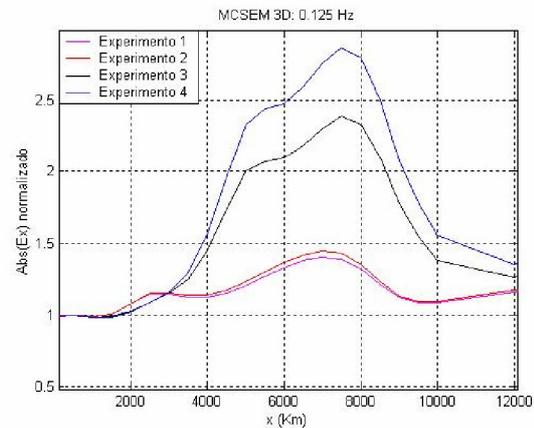


Figura 8: Respostas normalizadas *in-line* do campo  $E_x$  para os experimentos 1, 2, 3 e 4 propostos neste trabalho.

Comparando as duas figuras (7 e 8), observa-se que os campos normalizados na Figura 8 apresentam comportamento mais coerentes com a realidade dos modelos do que as respostas contidas na Figura 7. As amplitudes dos campos normalizados mostradas na Figura 8 e associadas aos experimentos 3 e 4 mostram-se maiores que as dos experimentos 1 e 2, dada a maior largura na direção x dos reservatórios e ao fato do eixo do dipolo elétrico horizontal ser também na direção x, em contraste com as amplitudes dos campos normalizados da Figura 7 em que os resultados dos experimentos 3 e 4 (Souza, 2007) praticamente não apresentam nenhuma variação com relação aos experimentos 1 e 2.

Finalmente comparamos as amplitudes da componente  $E_x$  *in-line* provenientes dos modelos com hidrocarboneto 1D, 2D e 3D propostos, sendo tais amplitudes normalizadas pelas amplitudes das componentes  $E_x$  *in-line* provenientes do modelo de referência 1D. Mais especificamente, se faz a comparação do campo normalizado do experimento 2 – 2D (Figura 6) em relação ao campo normalizado do experimento 2 - 3D (Figura 8) e também se compara o campo normalizado proveniente do experimento 4 – 2D (Figura 6) em relação ao campo normalizado proveniente do experimento 4 (Figura 8).

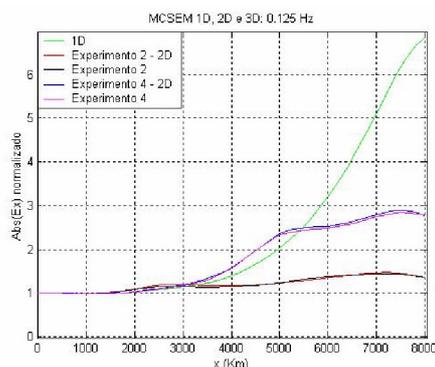


Figura 9: Respostas normalizadas da componente  $E_x$  *in-line* provenientes de modelos com reservatório do MCSEM 1D e 2D propostos (Figura 6) e dos experimentos 2 e 4 (Figura 8).

Observa-se na Figura 9 as aproximações dos campos normalizados da componente  $E_x$  *in-line* devido aos Experimentos 2 e 4 - 3D (Figura 8), em relação aos campos normalizados da componente  $E_x$  *in-line* devido aos Experimento 2 – 2D e Experimento 4 – 2D (Figura 6), respectivamente.

### Discussão e Conclusões

Entre os métodos geofísicos eletromagnéticos usados na exploração de hidrocarbonetos, o método mCSEM - marine Controlled - Source Electromagnetic vem, nos últimos dez anos, se destacando como uma alternativa promissora na exploração/detecção direta de petróleo. Devido sua importância, faz-se necessário investir em pesquisa deste método, tanto na prática quanto nos seus aspectos teóricos. Desse modo, este trabalho propôs soluções numéricas para o mCSEM 3D através do método dos elementos finitos. Para fins de análise de coerência das soluções obtidas (Figura 8), fizemos a comparação com outras soluções da literatura tanto para o caso 2D (Figura 6) como 3D (Figura 7). As soluções propostas apresentaram boa coerência em relação às soluções do mCSEM 2D (Figura 9), diferentemente das soluções provenientes da literatura do mCSEM 3D (Figura 7), quando comparadas às do mCSEM 2D (Figura 6). Este bom resultado foi obtido em virtude de

uma ligeira modificação do algoritmo usado por Souza (2007). Para uma avaliação mais aprofunda acerca do mCSEM 3D, faz-se necessário fazer comparações com outros métodos numéricos, como por exemplo, diferenças finitas, equação integral e por que não, elementos finitos também.

### Agradecimentos

Os autores agradecem à ANP/PRH-06 pela infraestrutura do Laboratório PROEM do IG/UFGA. O autor (F.L.A.) agradece ao CNPq pela bolsa de doutorado e, em particular, também agradece ao Victor C. T. Souza, da Petrobrás, pelas discussões esclarecedoras sobre o método dos elementos finitos tridimensionais. O segundo autor (L.R.) agradece à ANP/PRH-06 pela bolsa de Pesquisador Visitante.

### Referências

- Constable, S. and Snrka, L. J., 2007, An introduction to marine controlled-source electromagnetic methods for hydrocarbon exploration. *Geophysics*, **72**, WA3 –WA11.
- Anderson, W. L., 1989. A hybrid fast Hankel transform algorithm for electromagnetic modeling. *Geophysics*, **54**: 263-266.
- Rijo, L., 2001. " Teoria dos Métodos Eletromagnético I, II e III ". UFPA, Departamento de Geofísica. ([www.rijo.pro.br](http://www.rijo.pro.br), acesso: novembro 2006 )
- Rijo, L., 2003. Modelagem de dados MCSEM 1D. Relatório de Atividade do Convênio UFPA-PETROBRAS FADESP.
- Rijo, L., 2004. Modelagem de dados MCSEM 2.5D. Relatório de Atividade do Convênio UFPA-PETROBRAS FADESP.
- Rijo, L., 2007. Cooperação Universidade – Indústria: O caso do método marine Controlled - Source Electromagnetic (CSEM) na exploração de hidrocarbonetos.
- Souza, V. C. T., Rijo, L. e Silva, M. W. C., 2005. The preconditioned biconjugate gradient algorithm applied to geophysical electromagnetic modeling. 9<sup>th</sup> International Congress of the Brazilian Geophysical Society held in Salvador, Brazil. Expanded Abstract, CDROM
- Souza, V. C. T., 2007. Modelagem numérica de dados MCSEM 3D usando computação paralela. Tese de Doutorado, UFPA.
- Souza, V. C. T., Rijo, 2007. Modelagem de dados mCSEM 3D usando computação paralela. 10<sup>th</sup> International Congress of the Brazilian Geophysical Society held in Rio , Brazil. Expanded Abstract, CDROM
- Ueda, T., Zhdanov, M. S., 2005. Fast numerical modeling of marine controlled-source electromagnetic data using quasi-linear approximation. SEG/Houston 2005 Annual Meeting, 506-509 p.