



Inversão 2D de dados MMT de Ambientes Altamente Resistivos em Águas Profundas

Frayzer Lima de Almeida, UFPA, Brazil

Copyright 2017, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation during the 15th International Congress of the Brazilian Geophysical Society held in Rio de Janeiro, Brazil, 31 July to 3 August, 2017.

Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the 15th 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.

Abstract

We applied the geophysical inversion on synthetic data from the 2D Marine Magnetotelluric method – 2D MMT (TM and TE modes) from a highly resistive geoelectric model characteristic of the exploration of hydrocarbons in deep waters, such as in Brazilian coastal basins. The inversion method used (Marquardt method) uses the a priori introduction of absolute bounds and the inclusion, also a priori, of a given real range of electrical resistivity. The inversion is applied individually on the synthetic data (apparent resistivities and impedance phases) of the 2D MMT, both by the TM mode and by the TE. The synthetic data are obtained through the direct modeling of the 2D MMT (TM and TE modes) according to the two-dimensional finite element method and added with noise. The inversion results are presented and evaluated both in terms of conductivity and in terms of electrical resistivity.

Resumo

Aplicamos a inversão geofísica sobre dados sintéticos do método Magnetotelúrico Marinho 2D – MMT 2D (modos TM e TE) advindos de um modelo geoeletrico altamente resistivo característico da exploração de hidrocarbonetos em águas profundas como, por exemplo, em bacias costeiras brasileiras. O método de inversão utilizado (método de Marquardt) usa a introdução *a priori* de vínculos absolutos e a inclusão, também *a priori*, de um dado intervalo real de resistividade elétrica. Sendo a inversão aplicada, individualmente, sobre os dados sintéticos (resistividades aparentes e fases da impedância) do MMT 2D, tanto pelo modo TM quanto pelo modo TE. Os dados sintéticos são obtidos através da modelagem direta do MMT 2D (modos TM e TE) segundo o método dos elementos finitos bidimensionais e acrescidos com ruído. Os resultados de inversão são apresentados e avaliados tanto em termos da condutividade quanto em termos da resistividade elétrica.

Introdução

Os métodos marinho de fonte controlada – mCSEM e o magnetotelúrico marinho – MMT são métodos geofísicos eletromagnéticos que se destacam na prospecção de hidrocarbonetos em águas profundas e ultra-profundas, pois usados em conjunto com a sísmica podem confirmar a existência de hidrocarbonetos, mapear o contorno de um reservatório e contribuir para a diminuição da ambiguidade na interpretação geofísica. Porém o mCSEM e o método sísmico apresentam algumas

restrições quando aplicados na pesquisa exploratória em ambientes altamente resistivos localizados em águas profundas.

Por um lado, o mCSEM não é capaz de mapear a base da estrutura salina (corpo altamente resistivo) localizado em águas profundas, devido suas medidas serem afetadas pela variação de resistividade interna desta estrutura. Por outro lado, o imageamento sísmico em profundidade apresenta baixa resolução na região abaixo da estrutura salina, pois, geralmente, estas estruturas apresentam elevada velocidade de propagação sísmica em relação às rochas sedimentares circundantes, proporcionando a difração dos caminhos dos raios sísmicos e a diminuição da energia de propagação transferida para os sedimentos abaixo da estrutura salina (Hoversten, 2000). Porém, ambientes geológicos compostos por camada salina contendo em sua base uma camada reservatório com hidrocarbonetos, localizadas em águas profundas, e circundadas por sedimentos menos resistivos são melhor investigados através do método MMT, uma vez que este método eletromagnético é indicado para fornecer informações da distribuição de resistividade elétrica das rochas em subsuperfície, desde que exista significativa razão e/ou contraste de resistividade entre estas rochas.

Inicialmente apresentamos o problema direto do método MMT 2D (modos TM e TE). Em seguida propomos a metodologia de inversão a ser utilizada sobre dados do MMT 2D para os modos TM e TE. Após apresentarmos um modelo geoeletrico bidimensional de ambiente altamente resistivo localizado em águas profundas, mostramos os resultados de inversão bidimensional usando dados sintéticos oriundos da simulação direta do MMT 2D tanto através do modo TM quanto através modo TE.

O Problema direto

Os campos magnético e elétrico, secundários, podem ser expressos a partir das equações de Maxwell (no sistema SI) no domínio da frequência (Rijo, 2002). Assim, sobre estas equações admite-se que suas resistividades variam apenas nas direções z e x, originando dois sistemas de equações diferenciais parciais, os quais caracterizam modos distintos de propagação eletromagnética, isto é, o modo transversal magnético (modo TM) e modo transversal elétrico (modo TE). Tais sistemas de equações são solucionados, individualmente, através do método dos elementos finitos bidimensionais (Rijo, 2002) aplicando o critério de Galerkin (Becker; Carey; Oden, 1981). Quando aplicado o método dos elementos finitos sobre cada sistema acima mencionado, surge (para cada modo de propagação) um sistema linear associado a uma matriz complexa, simétrica e esparsa, em que cada sistema é solucionado numericamente pelo método do gradiente biconjugado (Souza et al., 2005). Para um

entendimento detalhado da modelagem direta do MMT 2D sugerimos os trabalhos de Saito (2009) e Almeida (2015).

O problema inverso

A função objetivo minimizada no presente trabalho é a proposta por Almeida e Rijo (2011), porém os dados observados são as resistividades aparentes e fases (simulados a partir da modelagem direta do MMT 2D (modos TM e TE) e acrescidos de ruídos). O processo de minimização da referida função objetivo é baseado no método de Marquardt (Press et al., 1992), juntamente com a estratégia proposta por Medeiros e Silva (1996) e Luiz (1999), que trata da introdução de informação *a priori* (para o presente problema de inversão é especificamente chamada de introdução de vínculos absolutos). Para o maior entendimento tanto do método de Marquardt, como do algoritmo aqui aplicado na minimização da função objetivo e do seu critério de parada, recomendamos Almeida e Rijo (2011).

O algoritmo acima apresentado e aplicado na inversão de dados 2D do MMT aqui proposta, além de conter a primeira introdução de informação *a priori*, a saber, a introdução de vínculos absolutos, o presente artigo propõe uma segunda introdução de informação *a priori*, a qual é justificada e incluída no referido algoritmo como pode ser melhor compreendido a seguir.

A primeira justificativa é que na prospecção de hidrocarbonetos em águas profundas e ultra-profundas, os estratos geológicos de baixa resistividade elétrica são, geralmente, dominados por folhelhos, arenitos, siltitos e outras variações de rochas sedimentares com resistividade elétrica em torno de 1,0 Ohm-m, já os estratos geológicos com alta resistividade elétrica são, geralmente, as rochas reservatórios com hidrocarbonetos e rochas salinas com resistividade elétrica, respectivamente, entre 10,0 e 200,0 Ohm-m e entre 25,0 e 500,0 Ohm-m (Hoversten et al., 2000; Rijo, 2007; Pinto, 2009). Assim, a partir dessas informações *a priori*, é proposto neste trabalho que os parâmetros de resistividades elétricas estimados possuam resistividades no intervalo entre 0,9 e 250,0 Ohm-m (o qual é aqui denotado por intervalo de resistividades elétricas *a priori*). A segunda justificativa é que, por outro lado, os parâmetros de resistividades elétricas estimados durante o processo de inversão, podem apresentar amplitudes sub ou super estimadas, o que por sua vez, podem ocasionar instabilidade numérica durante o cálculo das respostas advindas do algoritmo de modelagem direta do MMT 2D, modelagem esta que é utilizada em algumas etapas do algoritmo de inversão do MMT 2D aqui proposto. Assim, para evitar esta instabilidade numérica, se faz necessária a introdução do proposto intervalo de resistividade elétrica *a priori* no referido algoritmo de inversão.

A inclusão do referido intervalo *a priori*, no algoritmo proposto, se faz da seguinte maneira: logo após o cálculo das resistividades elétricas estimadas (na iteração atual)

é verificado qual entre estas resistividades elétricas que não pertencem ao referido intervalo *a priori*, e assim estas resistividades elétricas estimadas (as que não pertencentes ao intervalo *a priori*) deixam de apresentar suas atuais amplitudes e/ou valores de resistividades para voltarem a apresentar suas amplitudes de resistividades da iteração anterior, respectivamente.

Modelo proposto e os dados observados sintéticos

Inicialmente apresentamos um modelo geológico em ambiente altamente resistivo proveniente da prospecção de hidrocarbonetos em águas profundas, onde é aplicado o método MMT, com características das bacias brasileiras offshore. Tal modelo é submetido à inversão geofísica, através dos dados observados do MMT 2D segundo os modos TM e TE, aplicando a minimização da função objetivo proposta por Almeida e Rijo (2011), a qual é minimizada pelo método de Marquardt (Press et al., 1992).

O modelo geológico MMT 2D segundo características altamente resistivas em águas profundas aqui proposto, (Fig.1), é expresso pela seção segundo a perspectiva do plano $z \times x$. Onde a camada de sal apresenta uma largura na direção x de 24 km, uma espessura h_3 igual a 2000 m e uma resistividade elétrica ρ_3 igual a 100 Ohm-m. A camada que representa o reservatório com hidrocarbonetos possui uma largura na direção x de 20 km, uma espessura h_4 igual 1500 m, está a uma profundidade do assoalho marinho de 3000 m e apresenta uma resistividade ρ_4 igual a 50 Ohm-m.

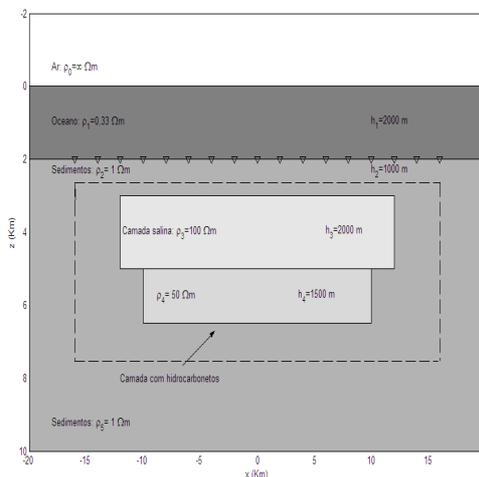


Figura 1 – Seção no plano $z \times x$ referente ao modelo geológico 2D com camada salina e reservatório com hidrocarbonetos.

Observa-se na Fig.1 os receptores localizados e afixados no assoalho marinho, os quais são caracterizados pelo símbolo ∇ e apresentam um espaçamento de 2000 em 2000 metros, totalizando 17 receptores (pontos de

sondagens) do MMT, cobrindo uma extensão de 32 quilômetros, com cada receptor operando em 14 períodos distintos entre 10^0 e 10^4 segundos com distribuição uniforme em escala logarítmica na base dez.

Para realizar a inversão geofísica referente o modelo da Fig. 1, foram realizadas as simulações através das modelagens diretas do MMT 2D tanto segundo o modo TM quanto o modo TE sobre o modelo geoeletrico da Fig. 1, com finalidade de se obter as resistividades aparentes e fases tanto para o modo TM quanto para o modo TE do MMT 2D. Sendo as resistividades aparentes acrescidas com 7% de ruído e as fases acrescidas com 3% de ruído, criando assim os dados observados sintéticos aplicados posteriormente na inversão geofísica 2D do MMT.

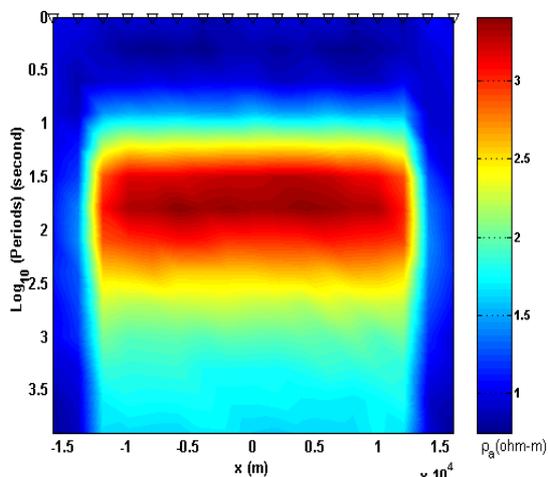


Figura 2 – Pseudo-seção de resistividades aparentes do MMT 2D segundo o modo TM referente ao modelo geoeletrico da Fig.1.

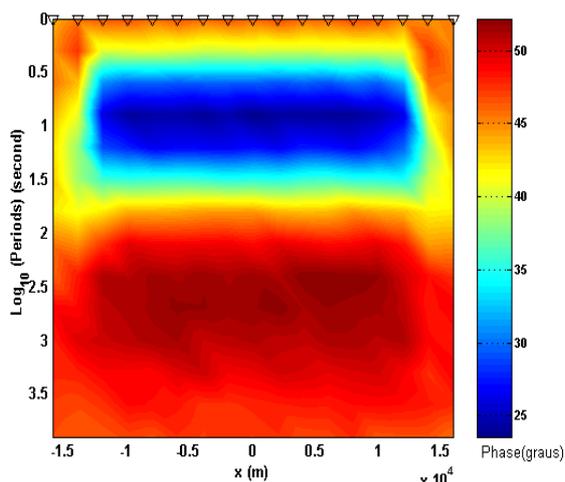


Figura 3 – Seção de fase da impedância do MMT 2D segundo o modo TM referente ao modelo geoeletrico da Fig.1.

São apresentadas nas Figs. 2 e 3, acima e respectivamente, a pseudo-seção de resistividades aparentes (em Ohm-m) e a seção de fases da impedância (em graus), segundo o modo TM, referentes

ao modelo geoeletrico do MMT 2D (Fig.1). Estas seções apresentam os períodos em escala logarítmica na base dez, e estão associadas à seção no plano $z \times x$ apresentada na Fig.1.

Finalmente são apresentadas nas Figs. 4 e 5 a pseudo-seção de resistividades aparentes (em Ohm-m) e a seção de fases da impedância (em graus), respectivamente, segundo o modo TE, referentes ao modelo geoeletrico do MMT 2D (Fig.1). Estas seções também apresentam os períodos em escala logarítmica na base dez, e estão associadas à seção no plano $z \times x$ apresentada na Fig.1.

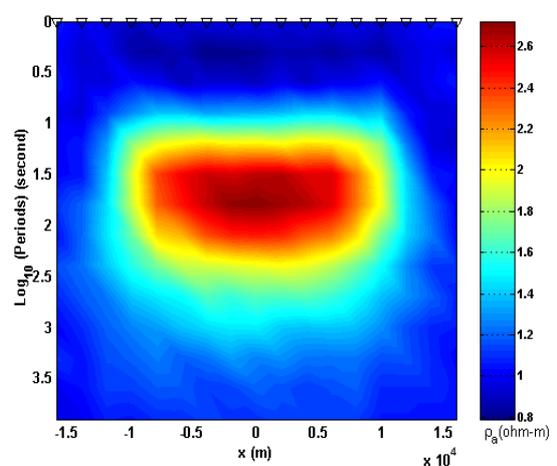


Figura 4 – Pseudo-seção de resistividades aparentes do MMT 2D segundo o modo TE referente ao modelo geoeletrico da Fig.1.

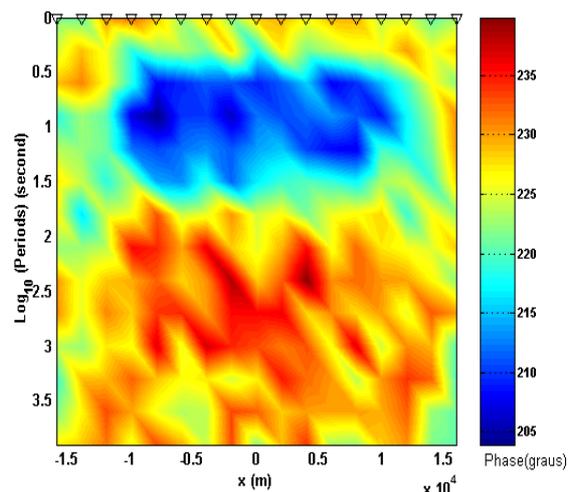


Figura 5 – Seção de fase da impedância do MMT 2D segundo o modo TE referente ao modelo geoeletrico da Fig.1.

Resultados de inversão

Observa-se na Fig.1 uma área delimitada por um retângulo tracejado, esta área é a região de interesse (aqui proposta) para a inversão geofísica de dados 2D do MMT segundo os modos TM e TE. Na prática a região de interesse pode ser delimitada através da interpretação de seções sísmicas em profundidade e, em particular quanto a sua extensão, pelas pseudo-seções de resistividades aparentes Figs.2 e 4 . A região de interesse proposta é dividida em células retangulares, menores, as quais apresentam uma determinada amplitude de resistividade elétrica durante o processo de inversão, porém para o início de cada processo de inversão (MMT 2D modos TM e TE) foi admitido o valor de 1,0 Ohm-m para cada célula. Totalizando para cada processo de inversão, tanto através do modo TM quanto pelo modo TE, 176 células de resistividades elétricas. Entre estas 176 células, 16 células são vinculadas através de vínculos absolutos, isto é, para cada uma destas 16 células admitimos amplitudes fixas de resistividades elétricas iguais a 1,0 ohm-m, em que estas células vinculadas estão localizadas a uma profundidade entre 2250 e 2500 metros em relação à superfície do oceano e abrangem uma extensão de 32 quilômetros.

Comum a ambos os processos de inversão, MMT 2D modos TM e TE, as amplitudes para os parâmetros de Marquardt e de Lagrange foram admitidos de forma empírica, isto é, para o parâmetro de Marquardt foi admitido um valor igual a 1,0, e para o parâmetro de Lagrange foi admitido um valor positivo, os quais minimize a função objetivos e proporcione a convergência, para um dado valor de tolerância, da norma do máximo aplicada sobre o vetor resultante da diferença entre dois vetores de iterações consecutivas dos parâmetros de resistividades elétricas estimados, donde se chegou no valor de 650,0 para o parâmetro de Lagrange na inversão do MMT 2D segundo o modo TM e no valor de 1000,0 também para o parâmetro de Lagrange, mas na inversão do MMT 2D segundo o modo TE, dado um valor de tolerância para a norma do máximo igual a 10^{-3} .

Apresentamos a seguir os resultados de inversão utilizando os dados do MMT 2D através do modo TM (Fig.6) e do modo TE (Fig.7). Estes resultados são apresentados, inicialmente, em termos da condutividade elétrica (S/m), uma vez que é possível uma melhor distinção entre o meio menos condutivo (rochas salinas e rochas reservatório com hidrocarbonetos) e o meio mais condutivo (rochas sedimentares como folhelhos, siltitos, arenitos e outros).

Ambas as inversões foram calculadas em uma máquina com CPU 2,83 GHz, 3,46 GB de RAM e administrado por um sistema operacional Windows XP Professional. Dessa forma, cada processo de inversão, aqui proposto, teve duração média de 4 horas e 23 minutos.

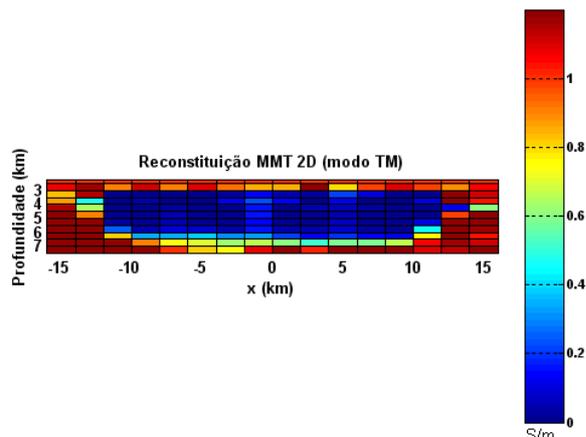


Figura 6 – Reconstituição do modelo geoeletrico 2D (Fig.1) através das resistividades aparentes (Fig.2) e das fases de impedância (Fig.3) do MMT 2D (modo TM) em termos da condutividade elétrica.

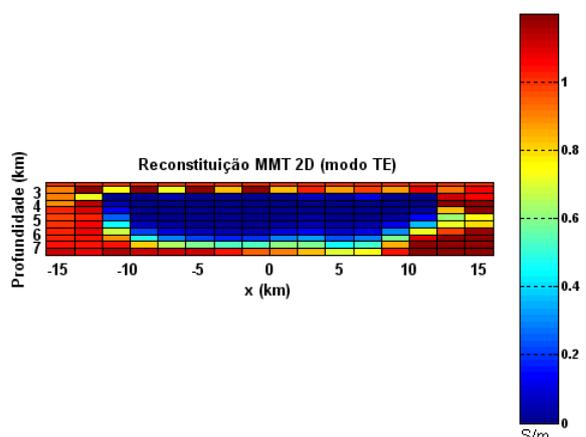


Figura 7 – Reconstituição do modelo geoeletrico 2D (Fig.1) através das resistividades aparentes (Fig.4) e das fases de impedância (Fig.5) do MMT 2D (modo TE) em termos da condutividade elétrica.

De fato, em ambos os resultados a cima, Figs.6 e 7, é possível observar a distinção do meio menos condutivo (em azul escuro) em relação ao meio mais condutivo (em vermelho escuro), uma vez que tais resultados são expressos em termos de suas condutividades elétricas. Em ambos os resultados, é possível localizar tanto o topo quanto a base do corpo menos condutivo, assim como sua extensão, resultando em um bom delineamento do corpo menos condutivo (em azul escuro) em relação ao meio mais condutivo das rochas encaixantes (em vermelho escuro).

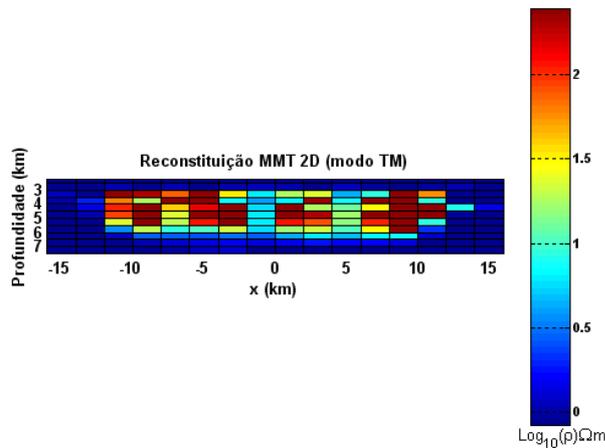


Figura 8 – Reconstituição do modelo geológico 2D (Fig.1) através das resistividades aparentes (Fig.2) e das fases da impedância (Fig.3) do MMT 2D (modo TM) em termos da resistividade elétrica.

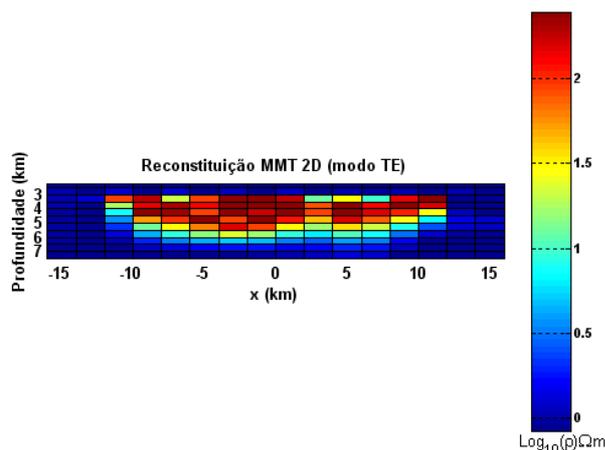


Figura 9 – Reconstituição do modelo geológico 2D (Fig.1) através das resistividades aparentes (Fig.4) e das fases da impedância (Fig.5) do MMT 2D (modo TE) em termos da resistividade elétrica.

Ao lado esquerdo, apresentamos os resultados de inversão utilizando os dados do MMT 2D através do modo TM (Fig.8) e do modo TE (Fig.9) em termos da resistividade elétrica (Ohm-m). Para uma melhor distinção entre o meio mais resistivo (rochas salinas e rochas reservatório com hidrocarbonetos) e o meio menos resistivo (rochas sedimentares como folhelhos, siltitos, arenitos e outros) apresentamos as amplitudes das resistividades elétrica em escala logarítmica na base dez.

Observa-se na Fig.8 uma não uniformidade na distribuição da resistividade elétrica do corpo mais resistivo, que varia entre 10,0 e 250,0 Ohm-m, porém na Fig.9 observa-se uma melhor uniformidade de distribuição da resistividade elétrica, o que está em

melhor acordo com a distribuição das resistividades aparentes observado nas Figs. 2 e 4. Porém, em ambas as figuras, é possível distinguir o meio mais resistivo do meio menos resistivo, uma vez que é possível verificar o topo, a base e a extensão do corpo mais resistivo.

Em ambos os resultados acima, Figs. 8 e 9, não é possível distinguir entre o corpo salino e corpo reservatório com hidrocarbonetos de acordo com o modelo geológico bidimensional (Fig.1) (utilizado como modelo para o desenvolvimento e análise das inversões de dados MMT 2D (modos TM e TE)). Isto se dá, devido tanto ao corpo salino quanto ao corpo com hidrocarbonetos possuírem altas resistividades elétricas, resultando em um “baixo” contraste e/ou razão de resistividade elétrica.

Discussão e Conclusões

Nas figs.6 e 7 é possível observar um melhor delineamento do corpo menos condutivo (em azul escuro) quando os resultados de inversão são expressos através da condutividade elétrica que é o inverso da resistividade, propiciando uma “normalização” sobre os parâmetros estimados, uma vez que as condutividades restringem-se ao intervalo real unitário, onde é possível melhor diferenciar através de cores entre os parâmetros mais condutivos (em vermelho) dos menos condutivos (em azul).

Nas figs. 8 e 9 é possível observar uma não uniformidade dos valores de resistividades elétrica do corpo mais resistivo, porém estes valores estão, em sua maioria, entre 10 Ohm-m e 200 Ohm-m o que é indicativo de ambiente resistivo, o que, por outro lado, consta de fato no modelo geológico proposto (Fig.1). Esta não uniformidade dos valores de resistividades elétrica do corpo mais resistivo, observado nas Figs. 8 e 9, é devido ao fato dos dados observados das resistividades aparentes (modos TM e TE) possuírem alto percentual de ruído.

A metodologia de inversão proposta por Almeida e Rijo (2011) aplicada na inversão 2D de dados do MMT (modos TM e TE) à qual inclui informação *a priori* de vínculos absolutos e a introdução do intervalo real de resistividades elétrica *a priori*, mostra-se adequada, uma vez que nas figs. 6-9 é possível distinguir a base, o topo e a extensão do corpo mais resistivo em relação às rochas encaixantes menos resistivas.

Agradecimentos

O autor agradece ao Conselho da Faculdade de Matemática e também ao Conselho do Campus Universitário de Castanhal da Universidade Federal do Pará pela aprovação do projeto de pesquisa, que a partir do qual foi possível o desenvolvimento deste trabalho.

Referências

ALMEIDA, F.L de, RIJO, L. -2011- Modelagens Direta e Inversa de Dados mCSEM 3D. RBGf. v.29(2), p. 289-308.

ALMEIDA, F. L.-2015- Modelagem e Análise de dados MMT 1D e 2D segundo Ambientes Altamente Resistivos em Águas Profundas. 14th International Congress of the Brazilian Geophysical Society held in Rio de Janeiro, Brazil. 1 CD-ROM.

BECKER, E. B., CAREY, G. F., ODEN, J. T. -1981- Finit elements – An introduction. New Jersey: Prentice-Hall, 258p.

LUIZ, J. G.-1999- Informação a priori na inversão de dados Magnetotelúricos. Tese de Doutorado, UFFA. 92 p.

HOVERSTEN, G. M., CONSTABLE, S. C., MORRISON, H. F.-2000- Marine magnetotellurics for base-of-salt mapping: Gulf of Mexico field test at the Gemini structure. Geophysics, n. 5, p. 1476-1488.

MEDEIROS, W. E. & SILVA, J. B. C.-1996- Geophysical inversion using approximate equality constrains. Geophysics, vol. 61, p. 1678 – 1688.

PINTO, V. R.-2009- O Método Magnetotelúrico Marinho (MMT) na Exploração de Hidrocarbonetos. Dissertação de Mestrado, ON, 63 p.

PRESS, W. H., TEUKOLSKY, S. A., VETTERLING, W. T. and FLANNERY, B. P.-1992- Numerical Recipes in Fortran 77. Cambridge University Press. 2nd ed, p. 678-680.

RIJO, L.-2002- Teoria dos Métodos Eletromagnético I, II e III – Notas de aula. Departamento de Geofísica, UFFA.

RIJO, L.-2007- Cooperação Universidade-Indústria: O caso do método marine Controlled Source Electromagnetic (CSEM) na exploração de hidrocarbonetos. 10th International Congress of the Brazilian Geophysical Society held in Rio de Janeiro, Brazil. 1 CD-ROM.

SAITO, K. K. S.-2009- Modelagem Computacional de Dados Magnetotelúricos Marinhos 2-D. Dissertação de Mestrado, UFFA, 46 p.

SOUZA, V. C. T., RIJO, L. e SILVA, M. W. C.- 2005- The preconditioned biconjugate gradient algorithm applied to geophysical electromagnetic modeling. 9th International Congress of the Brazilian Geophysical Society held in Salvador, Brazil.