



## MODELAGEM DIRETA E INVERSA DE DADOS EM APLICADOS NA EXPLORAÇÃO DE ÓLEO E GÁS

Moacyr S Bezerra e Hédison K Sato, CPGG - UFBA

Copyright 2004, SBGF - Sociedade Brasileira de Geofísica

*Este texto foi preparado para a apresentação no I Simpósio de Geofísica da Sociedade Brasileira de Geofísica, São Paulo, 26-28 de setembro de 2004. Seu conteúdo foi revisado pela Comissão Tecno-científica do I SR-SBGf 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

Nos últimos anos, a aplicação do método eletromagnético tem sido estendida também para a área da indústria do petróleo, como ferramenta no acompanhamento da evolução de plumas de injeção de fluidos em campos maduros de petróleo e na exploração rasa. O CPGG/UFBA e o LENEP/UENF têm atuado nestas áreas através de projetos CTPETRO, em áreas de interesse da Petrobrás. Consideramos como aproximação do meio um modelo de camadas planas e horizontais e, através do processo de inversão, pode-se estimar o contraste de condutividade elétrica causado pelo contato entre o fluido injetado e o óleo ou gás no reservatório.

### Introdução

Esse trabalho faz parte de um projeto pioneiro na área de exploração de óleo e gás utilizando o método eletromagnético, no qual são aplicados resultados de Dias (1968) e Sato (1979), testados em ambientes geológicos visando a exploração mineral. Estes dois trabalhos tratam do método eletromagnético no domínio da frequência considerando-se a existência da polarização elétrica nas rochas. Recentemente, devido a existência de um equipamento FDEM do LENEP/UENF, considerado de quinta geração, essas mesmas idéias foram reaplicadas com duas ênfases geofísicas: (i) Uma escala recorde de profundidade exploratória, e (ii) Investigação das características de um reservatório de petróleo terrestre raso (campo maduro), em fase de recuperação secundária.

O cálculo do campo eletromagnético devido a um dipolo magnético sobre um meio de camadas planas e horizontais possui solução analítica bem conhecida (Ward and Hohmann, 1987). Para isso devemos resolver as equações de Maxwell no domínio da frequência, dentre outras formas, usando os potenciais de Schelkunoff. Para um meio com camadas irregulares, só é possível estimar os campos eletromagnéticos através de métodos numéricos, tais como diferenças finitas ou elementos finitos. Escolhemos esse último para modelar o meio em questão. Devido à forma como foi realizada a aquisição dos dados de campo, nós vamos estudar a componente vertical do campo magnético, e através dela determinar a impedância mútua do meio. O processo de inversão deve levar em consideração que a dependência

dos parâmetros do modelo (condutividade elétrica e espessura das camadas) com o campo eletromagnético é não linear. Por isso, podemos escolher métodos de inversão linearizada (Newton ou Gauss-Newton), como também métodos de pesquisa global, como o *Very Fast Simulated Annealing* (Sen and Stoffa, 1997). Nesse trabalho consideramos a condutividade elétrica do meio como sendo uma grandeza complexa e dependente da frequência, utilizando o modelo de Cole-Cole (Cole and Cole, 1941). O resultado da inversão fornece a espessura de cada camada bem como os parâmetros que descrevem o comportamento da condutividade em função da frequência, seguindo o modelo de Cole-Cole. Como estamos trabalhando com dados provenientes de um poço maduro, temos informações sobre a geologia local, além de outros dados fornecidos por outros métodos geofísicos, como o método sísmico. Observando os resultados obtidos com o nosso modelo e comparando com o que se conhece da geologia do local, podemos inferir em quais áreas a injeção de fluido mais efetiva no processo de recuperação de petróleo.

### Metodologia/ Problema Investigado

No atual estágio do trabalho, trabalhamos com um modelo de três camadas planas e horizontais, permeado por um campo eletromagnético gerado na superfície por uma espira retangular percorrida por uma corrente alternada. A investigação da subsuperfície é feita variando-se a frequência da fonte geradora, obtendo no receptor o campo eletromagnético primário (devido a fonte) e secundário (devido à efeitos de polarização na subsuperfície) e através desses dados obtemos a impedância mútua. A componente vertical do campo magnético secundário na superfície de um meio de camadas planas e horizontais é dada por (Ward and Hohmann, 1987):

$$H_z = \frac{m}{4\pi} \int_0^\infty \left[ e^{-u_0 z} + r_{te} e^{u_0 z} \right] \frac{\lambda^3}{u_0} J_0(\lambda \rho) d\lambda \quad (1)$$

onde  $m$  é o momento de dipolo magnético,  $z$  é a coordenada vertical,  $\rho = \sqrt{x^2 + y^2}$  e  $J_0$  é a função de Bessel de primeira espécie e ordem zero. Se a permeabilidade magnética do meio não variar muito em relação à permeabilidade magnética do ar, os outros parâmetros são dados por:

$$r_{te} = \frac{\lambda - \hat{u}_1}{\lambda + \hat{u}_1}$$

$$\hat{u}_n = u_n + \frac{\hat{u}_{n+1} + u_n \tanh(u_1 h_1)}{u_n + \hat{u}_{n+1} \tanh(u_1 h_1)}$$

$$\hat{u}_N = u_N$$

$$u_n = (\lambda^2 - \omega^2 \mu_o \varepsilon_n + i \omega \mu_o \sigma_n)^{1/2}$$

com N sendo o número total de camadas. O campo primário no receptor é dado por:

$$H_z^p = -\frac{m}{4\pi\rho^3} \quad (2)$$

A impedância mútua do meio é obtida resolvendo-se a integral da Eq. (1) e dividindo-se o resultado pela Eq. (2). Além disso, notemos que o campo secundário depende da condutividade elétrica de cada camada  $\sigma_o$ , que por sua vez será complexa e dependente da frequência, de acordo com o modelo de Cole-Cole (Cole-Cole, 1941)

$$\sigma_n = \frac{1}{\sigma_o} \left\{ 1 - \chi \left[ 1 - \frac{1}{1 + (i\omega\tau)^c} \right] \right\} \quad (3)$$

com  $\chi$  sendo a cargabilidade,  $\tau$  é o tempo de relaxação,  $c$  é o termo que expressa a dependência com a frequência e  $\sigma_o$  é a condutividade à frequência zero. Os dados obtidos em campo foram então invertidos usando o método de inversão globalizada *Very Fast Simulated Annealing* – VFSA (Sem and Stoffa, 1997). Nesse método de inversão globalizada é feita uma pesquisa de vários valores para os parâmetros do modelo de Cole-Cole e as espessuras das camadas com base num parâmetro  $T$  (temperatura), que é feito diminuir a cada interação. A função objetivo da inversão é o erro quadrático associado a cada modelo nas interações, definido por:

$$E_n = \frac{1}{M} (Z_n - Z_o)^2 \quad (4)$$

com  $M$  sendo o número de observações e  $Z$  sendo a impedância mútua ( $Z_o$  é a impedância calculada a partir dos dados observados), lembrando que  $Z$  é uma quantidade complexa.

**Resultados**

Foi realizada uma aquisição de dados EM em um campo maduro de petróleo, no estado da Bahia, e com base nesses dados realizamos o processo de inversão para obter a espessura de cada uma das camadas, bem como

os parâmetros do modelo de Cole-Cole para cada camada. Os dados passaram apenas por uma filtragem preliminar, eliminando os pontos correspondentes a frequência múltiplas de 60Hz. A fonte e o receptor começam com um afastamento de 800m indo até 2500m. Obviamente, os dados correspondentes aos menores afastamentos apresentam melhores resultados, pois neles a razão sinal-ruído é grande. Na figura 1 mostramos a Impedância Mútua do meio obtida para um afastamento entre fonte e receptor de 2200m.

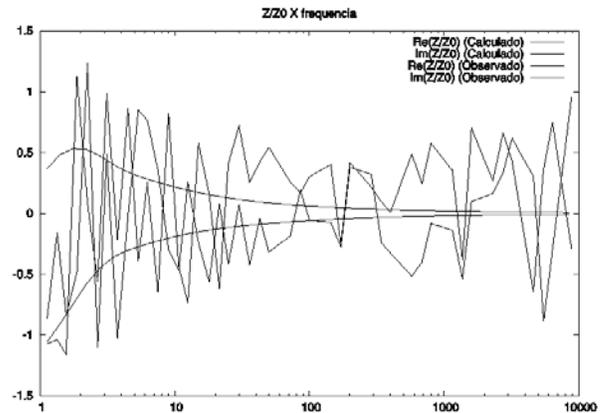


Figura 1 – Impedância mútua em função da Frequência para um afastamento de 2200m

Observa-se uma grande variação no dado observado, principalmente para as frequências mais baixas, ressaltando a grande quantidade de ruído presente no dado. Na figura 2 vemos novamente a impedância mútua em função da frequência, só que para um afastamento de 900m.

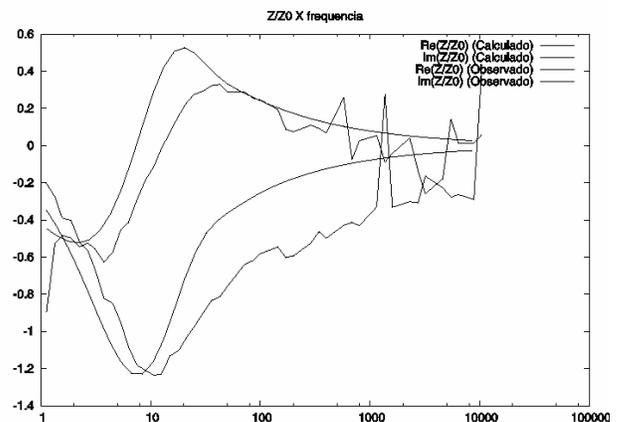


Figura 2 – Impedância Mútua em função da frequência para um afastamento de 900m

Observamos aqui um comportamento melhor dos dados observados, apenas com alguns pontos nas frequências muito baixas e nas últimas frequência que têm variações inesperadas, mas de uma maneira geral a concordância entre o modelo calculado e o observado é muito boa,

como se pode observar no gráfico do erro percentual em função do número de interações, na figura 3.

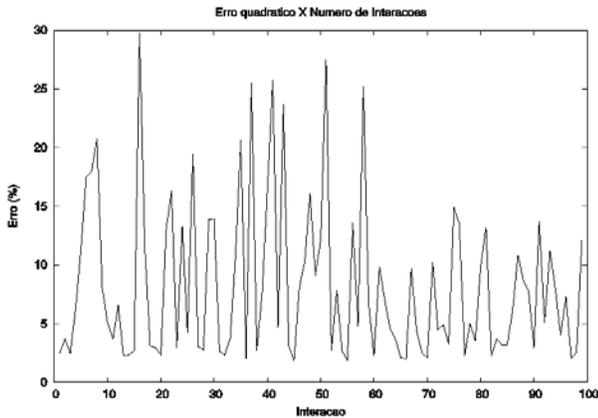


Figura 3 – Erro em função do número de interações (afastamento de 900m)

Como o método VFSA é um processo de pesquisa aleatória, a aceitação de um modelo ruim é tolerada até um certo momento, sendo que quanto maior for o número de interações, menor é a probabilidade de um modelo que aumente o erro ser aceito. Para gerar esses resultados, foram realizadas ao todo 50000 interações, consumindo um tempo médio de 4h. Foram geradas figuras como essas para cada afastamento fonte – receptor de 800m a 2500m variando-se a distância de 100m em 100m. Isso foi feito para posições diretas e reversas, ou seja, quando permutou-se a posição da fonte e do receptor. Com base nesses resultados, e nos parâmetros do modelo de Cole-Cole obtidos a cada inversão é possível reconstituir aproximadamente uma imagem da subsuperfície, com as espessuras de cada camada e seu valor médio de condutividade elétrica, o que servirá de base para comparação com as seções de resistividade elétrica aparente  $e_a$ , em outro momento, com seções provenientes de outros métodos geofísicos.

### Discussão e Conclusões

Todos os resultados apresentados aqui baseiam-se no cálculo da Impedância mútua do meio devido a um modelo de camadas planas e horizontais. Essa limitação será superada com o cálculo do modelo direto utilizando-se o método de elementos finitos, a fim de generalizarmos o processo para um meio com camadas irregulares. Além disso, fica claro que os dados observados necessitam passar por um processo de filtragem mais rigoroso, tal como um filtro IIR (*Infinite Impulse Response*) para que possamos avaliar quais componentes de frequência contribuem mais para o processo de inversão. A construção da "imagem" da subsuperfície ainda é motivo de discussão, pois há divergências sobre o ponto no interior da camada que corresponde exatamente ao campo magnético observado na superfície, além de podermos representar o comportamento da condutividade elétrica em função da

frequência por outros modelos que não o de Cole-Cole, que é uma primeira aproximação. Apesar disso, as seções e imagens de subsuperfície construídas até agora, não apresentadas aqui, fornecem uma tendência geral da geologia local que é observada em outros trabalhos na mesma região, além de indicar zonas de maior contraste de condutividade, ressaltando o contato entre o fluido injetado e o óleo do reservatório. A ideia a ser perseguida é criar um processo automático de geração dessas imagens com base nos resultados da inversão, tendo em vista que é necessário otimizar o processo que hoje dura cerca de 4h. Isso pode servir de ferramenta para uma primeira avaliação do processo de injeção de fluido, e que poderá ser feita no momento em que os dados estão sendo adquiridos, tornando o processo de recuperação de óleo mais dinâmico e eficiente.

### Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer ao CPGG, pela estrutura e apoio ao desenvolvimento do trabalho e à ANP pelo financiamento do trabalho na forma de bolsa de doutorado.

### Referências

- Avdeev, Dmitry B., 2005, Three Dimensional Electromagnetic modelling and inversion from theory to application, *Surveys in Geophysics* 26, 767-799.
- Axelsson, O. and Barker, V.A., 2001, Finite Element Solution of Boundary Value Problems, Society for Industrial and Applied Mathematics.
- Coggon, J.H., 1971, Electromagnetic and electrical modeling by finite element method, *Geophysics* 36, 132-155.
- Dias, C.A., 1968, A non-grounded method for measuring induced electrical polarization and conductivity, PhD Dissertation, Univ. da California, Berkley, USA.
- Glenn, W.E., Ward, S.H. e Peebles, W.J., 1973, The inversion of vertical magnetic dipole soundig data, *Geophysics* 38, 1109-1129.
- He, ZhangXiang, Jiang, WenBo e Liu, PingSheng, 2005, Hydrocarbon detection with high-power spectral induced polarization, two cases, SEG/Houston Annual Meeting Abstracts, 599-601.
- Imhof, M. G., 2003, Scale dependence of reflection and transmission coefficients, *Geophysics* 68, 322-336.
- Jin, J., 2002, The Finite Element Method in Electromagnetics, Wiley-Interscience.
- Lee, K.H., e Morrison, H.F., 1985, A numerical solution for the electromagnetic scattering by a two-dimensional inhomogeneity. *Geophysics* 50, 466-472.

- Lima, O. A. L. e Sharma, M. M., 1992, A generalized Maxwell-Wagner theory for membrane polarization in shaly sands. *Geophysics* 57, 789-799.
- Menke, W., 1984, *Geophysical Data Analysis: Discrete inverse theory*, Academic Press
- Mitsuhata, Yuji, 2000, 2D electromagnetic modelling by finite-element method with a dipole source and topography, *Geophysics* 65, 465-475.
- Paulsen, K. D., Linch, D. R., and Strohbehm, J. W., 1988, Three dimensional finite, boundary, and hybrid element solutions of the Maxwell equations for lossy dielectric media, *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* 36, 682-693}
- Pridmore, D. F., Hohmann, G. W., Ward, S. H., and Still, W. R., 1981, An investigation of Finite-Element Modeling for Electrical and Electromagnetic Data in three dimensions, *Geophysics* 46, 1009-1024.
- Reddy, I. K., Rankin, D., and Phillips, R. J., 1977, Three Dimensional modelling in magnetotelluric inversion, *Geophysics* 66, 174-187.
- Sato, H.K., 1979, Método Eletromagnético para interpretação de polarização induzida e resistividade usando o protótipo de um sistema a multi-freqüência, Dissertação de mestrado, UFBA, Salvador-BA.
- Sen, M. and Stoffa, P.L., 1997, *Global optimization methods in geophysical inversion*, Elsevier.
- Sheard, S. N., T. J. Ritchie, Cristopherson, K. R. and Brand, E., 2005, Mining, Environmental, Petroleum and Engeneering industry applications of electromagnetic techniques in geophysics, *Surveys in Geophysics*} 653-669.
- Stoyer, C.H., e Greenfield, R.J., 1976, Numerical solutions of the response of a two-dimensional earth to an oscillating magnetic dipole source, *Geophysics*, 41, 519-530.}
- Torres-Verdin, C., and Habashy, T. M., 2002, Rapid 2.5D Forward modelling and Inversion via a New Non-linear Sacttering Approximation, *Radio Sci* 29, 1051-1079.
- Torres-Verdin, C., and Habashy, T. M., 2002, Rapid numerical Simulations of Axisymmetric Single-Well Induction Data Using the extended Born Approximation, *Radio Sci.*36, 1287-1306.
- Tseng, H., Lee, K. H., and Becker, A., 2003, 3-D interpretation of Electromagnetic data Using a modified extended Born Approximation, *Geophysics* 68, 127-137.}
- Ward, S. H., and Hohmann, G. W., 1988, Electromagnetic Theory for Geophysical applications, in Nabighian, M. N., *Electromagnetic methods in applied geophysics, 1, Theory: Soc. Explor. Geophys.*
- Wilt, M., Little, J., Zhang, P., Chen, J. e Morea, M., 2005, Using crosswell EM to TRack Waterflooding at the lost Hills Oil Field, *SEG/Houston Annual Meeting Abstracts*, 1269-1272.
- Zhdanov, M.S. e Varentsov, I.M., 1983, Interpretation of local two dimensional electromagnetic anomalies by formalized trial procedure, *Geophys. J. Roy. Astr. Soc.*, 75, 623-638
- Zhdanov, M.S., Fang, S. and Hursan, G., 2000, Electromagnetic Inversion using Quasi-Lienar aproximation, *Geophysics* 65, 1501-1513.}
- Zyserman, F., Guarracino, L. and Santos, J., 1999, A hybridized mixed finite element domain decomposed method for two dimensional magnetotelluric modelling, *Earth Planets Space*, 51, 297-306.