

SIMULAÇÃO NUMÉRICA UNIDIMENSIONAL DE PERFIS INDUTIVOS EM POÇO NO CASO DE RESERVATÓRIOS FINAMENTE LAMINADOS

Alfredo M. V. Carrasco,¹ Antonio Abel Gonzáles Carrasquilla²

Recebido em 25 abr., 2003 / Aceito em 6 jan., 2004

Received Apr. 25, 2003 / Accepted Jan. 6, 2004

ABSTRACT

Numerical methods are used to simulate difficult cases of exploration geophysics, and, for this reason, it is always necessary to develop fast and efficient computational algorithms to achieve these results. In this article, we worked in a one-dimensional computational algorithm, in order to simulate conductivities well logs, which were collected in areas considered as complex geological environments. The developed program was used to analyse effects in induction well logs, choosing several sequences of thin horizontal parallel intercalated layers with high contrast of conductivities (shale—sand) as model, which is a very common geological situation of oil reservoirs and, always, in accord with by the petroleum industry, presents difficulties in interpretation. In this form, to perform our modelling, we used ILD, 2C40 and 6FF40 tools, all developed by SCHLUMBERGER and commonly utilised in oil industry. Thus, our results show that focalized tools as 6FF40 has better responses in the studied cases, but among of them, the values of conductivities and thickness of the layers were always very far from the theoretical models.

Keywords: one-dimensional, numerical, simulation, induction, oil, reservoirs

RESUMO

Os métodos numéricos são comumente utilizados na simulação de casos difíceis da geofísica de exploração, e, para esta razão, é sempre necessário desenvolver algoritmos computacionais rápidos e eficientes para atingir esses objetivos. Neste artigo, trabalhamos num algoritmo computacional unidimensional com a finalidade de simular perfis condutivos em poço, que foram coletados em ambientes geológicos complexos. O programa foi usado para analisar efeitos nos perfis de indução, escolhendo como modelo diversas seqüências intercaladas de camadas paralelas horizontais finas (folhelho-areia), com alto contraste de condutividades, o que caracteriza uma situação geológica muito comum nos reservatórios, e, sempre, de acordo com a indústria de petróleo, apresenta dificuldades de interpretação. Dessa forma, para realizar nossa modelagem, utilizamos as ferramentas ILD, 2C40 e 6FF40, desenvolvidas pela SCHLUMBERGER e muito usadas na perfilação de poços. Nossos resultados mostram que as ferramentas focalizadas do tipo 6FF40 possuem melhores respostas nos casos analisados, mas, na maioria das sondas, os valores de condutividades e espessuras das camadas ficam muito longe dos modelos teóricos.

Palavras-chave: Perfilação de indução, modelamento numérico, modelos sintéticos em camadas delgadas

¹ Laboratório de Engenharia e Exploração de Petróleo (LENEP)/Universidade Estadual do Norte Fluminense (UENF) - Rodovia Amaral Peixoto, Km 163 – Avenida Brenand S/N - CEP: 27925-031 – Imboassica – Macaé, RJ – Brasil - Tel.: +55 (22) 2773-6565 - Fax: +55 (22) 2773-6564 - E-mail: alfredo@lenep.uenf.br

² Laboratório de Engenharia e Exploração de Petróleo (LENEP) - Universidade Estadual do Norte Fluminense (UENF) - Rodovia Amaral Peixoto, Km 163 – Avenida Brenand S/N - CEP: 27925-031 – Imboassica – Macaé, RJ – Brasil - Tel.: +55 (22) 2773-6565 - Fax: +55 (22) 2773-6564 - E-mail: abel@lenep.uenf.br

INTRODUÇÃO

A medição da condutividade elétrica é fundamental na avaliação das propriedades petrofísicas de uma formação geológica. Esta propriedade pode ser medida através das perfilagens elétricas ou de indução, sendo que a escolha de uma ou da outra técnica depende, sobretudo, do tipo de lama de perfuração e do contraste de condutividade lama-formação virgem. Entretanto, as medições da condutividade podem ser influenciadas por diversos fatores: a lama de perfuração, as camadas adjacentes (*shoulder effect*) e a zona invadida pelo filtrado da lama. Portanto, é necessário entender esses efeitos para proceder às necessárias correções nas medições (ELLIS, 1987).

A simulação de situações geológicas complexas é geralmente realizada por técnicas numéricas, já que as modelagens físicas se tornam inviáveis em muitos casos. Desta forma, os casos de reservatórios com a presença de zonas laminadas, com seqüências de camadas muito finas, são tratados na indústria do petróleo como casos de geologia complexa e de difícil interpretação. No estudo desses casos, a utilização de modelagens matemáticas se torna imprescindível (ANDERSON; BARBER, 1988).

O termo camada delgada (ou muito fina) é conceituado como uma seqüência de camadas formadas por arenitos limpos, folhelhos e arenitos argilosos intercalados, a maioria das quais possui espessura tal, que as usuais ferramentas de perfilagem empregadas na avaliação de formação são incapazes de registrar a real variação de um determinado parâmetro petrofísico numa forma individual (ALLEN, 1984). Os reservatórios com camadas finas ocorrem em várias partes do mundo, por exemplo, nos campos das costas do Texas, da Louisiana e Meio Oeste americano ou no nordeste da Itália. No Brasil, eles acontecem em vários campos da Bacia de Campos, no campo Rio Preto na Bacia do Espírito Santo, e no campo Pilar na Bacia do Sergipe – Alagoas (ANDRADE, 1992).

Desta maneira, motivados por estas informações, desenvolvemos um algoritmo computacional unidimensional para a simulação de modelos com diferentes situações com camadas plano-paralelas, com a presença de camadas finas, condutoras, resistivas e intercaladas.

CONSIDERAÇÕES TEÓRICAS

Qualquer análise rigorosa da técnica de indução em perfis elétricos começa com as equações de *Maxwell* (NABIGHIAN, 1989), e^{int} dependente do tempo:

$$\nabla \times \vec{E} + \hat{z} \vec{H} = 0, \quad (1)$$

$$\nabla \times \vec{H} - \hat{y} \vec{E} = \vec{J}, \quad (2)$$

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

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

em que $\hat{z} = i\omega\mu$ e $\hat{y} = \sigma + i\omega\epsilon$ são chamados de impedância (ohm/m) e admitividade (S/m), respectivamente, \vec{E} representa o campo elétrico (volt/m), \vec{H} é o campo magnético (ampère/m), \vec{J} é a densidade da corrente elétrica e q_v é a densidade de carga elétrica volumétrica (C/m³), finalmente μ e ϵ são chamados, respectivamente, de permeabilidade magnética (*henry/m*) e permitividade elétrica (*farad/m*). Nessas últimas expressões, s é a condutividade (Siemen/m), $\omega = 2\pi f$ é a conhecida freqüência angular e f a freqüência em hertz (Hz).

Uma forma utilizada para obter as soluções das equações de *Maxwell* é definir \vec{E} e \vec{H} em termos de potenciais, por serem mais fáceis de resolver. Assim, utilizando os potenciais de *Schellkunoff* (\vec{F} e \vec{A}) juntamente com as condições de *Lorentz* nas equações de *Maxwell* vamos obter:

$$\nabla^2 \vec{F} + k^2 \vec{F} = -\vec{J}_m, \quad (5)$$

$$\nabla^2 \vec{A} + k^2 \vec{A} = -\vec{J}_e, \quad (6)$$

nas quais, $k^2 = -\hat{z} \cdot \hat{y} = -i\omega\mu(\sigma + i\omega\epsilon)$ é o número de onda eletromagnética e \vec{J}_m e \vec{J}_e são as fontes magnética e elétrica, respectivamente. Considerando uma fonte magnética ($A=0$) e as bobinas transmissoras e receptoras como dipólos magnéticos, devido ao seu pequeno tamanho, temos:

$$\vec{J}_m = -\hat{z} m \delta(x) \delta(y) \delta(z), \quad (7)$$

onde 'm' é o momento de dipólo magnético e $\delta(x)\delta(y)\delta(z)$ é a função impulso ou delta de Dirac tridimensional. Para resolver a equação (5) consideramos o meio homogêneo e o dipólo 'm' orientado na direção do eixo 'z', portanto essa equação torna-se:

$$\nabla^2 \vec{F}_z + k^2 \vec{F}_z = -\hat{z} m_z \delta(x) \delta(y) \delta(z). \quad (8)$$

Aplicando a transformada tripla de *Fourier* e posteriormente a transformada de *Hankel*, por considerar uma simetria de rotação, temos:

$$F_z(\lambda, z) = \frac{\hat{z}.m_z}{4\pi} \int_0^\infty \frac{e^{-u|z|}}{u} J_o(\lambda r) \lambda . d\lambda , \quad (9)$$

em que $u^2 = \lambda^2 + k^2$, sendo u a constante de propagação. Esta expressão é conhecida como a integral de *Sommerfeld*, cuja solução é:

$$F_z(x, y, z) = \frac{\hat{z}.m_z}{4\pi} \frac{e^{-ikR}}{R} , \quad (10)$$

onde $R^2 = r^2 + z^2$ e $r^2 = x^2 + y^2$, sendo R e r as distâncias radiais nos sistemas de coordenadas esféricas e cilíndricas. As componentes do campo eletromagnético no sistema de coordenadas cilíndricas são dadas por:

$$E_\phi(r, \phi, z) = -\hat{z} \frac{m_z r}{4\pi R^3} (1 + ikR) e^{-ikR} , \quad (11)$$

$$H_r(r, \phi, z) = \frac{m_z r_z}{4\pi R^5} [3 + 3ikR - k^2 R^2] e^{-ikR} \quad (12)$$

$$H_z(r, \phi, z) = -\hat{y} F_z + \frac{1}{\hat{z}} \frac{\partial^2 F_z}{\partial z^2} e^{-ikR} . \quad (13)$$

Para obter as componentes do campo elétrico e magnético correspondentes a um dipólo magnético vertical situado sobre N camadas homogêneas e isotrópicas, expressamos esses campos em funções escalares q e y, denominadas de potenciais de *Debye*, os quais satisfazem também a equação de *Helmholtz*. Neste ponto, se considerarmos um meio constituído por dois semi-espacos homogêneos e isotrópicos, devemos nos valer que se notar dos modos de propagação e dos coeficientes de reflexão. Desta forma, e levando em conta que os potenciais de *Debye* se comportam como uma onda plana, ao efetuar as seguintes substituições $k_o \text{sen} \theta_i = \lambda$ e $ik_o \text{cos} \theta_i = u_o$ (baseados na Lei de *Snell*), junto ao fato de serem iguais os ângulos de incidência e de reflexão, tem-se:

$$\hat{\psi}^{(i)} = \psi_o (e^{-u_o z} + R_{TE}^{(0)} e^{u_i z}) \quad (14)$$

Para determinar os coeficientes de reflexão 'R', temos de considerar as condições de fronteiras na interface dos semi-espacos, lembrando que as componentes tangenciais dos campos elétrico e magnético devem ser contínuas na interface dos dois meios, temos:

$$\left\{ \begin{array}{l} \psi_1 = \psi_2 , \\ \frac{1}{z_1} \frac{\partial \psi_1}{\partial z} = \frac{1}{z_2} \frac{\partial \psi_2}{\partial z} . \end{array} \right. \quad (15)$$

Portanto, os coeficientes de reflexão R_{TE} são dados por:

$$R_{TE}^{(j)} = \frac{Y_j - \hat{y}_{j+1}}{Y_j + \hat{y}_{j+1}} , \quad (16)$$

onde TM é o modo transversal magnético. As impedâncias e admitâncias aparentes são obtidas através da fórmula de recorrência:

$$\hat{y}_j = Y_j \frac{\hat{y}_{j+1} + Y_j \tanh(u_j h_j)}{Y_j + \hat{y}_{j+1} \tanh(u_j h_j)} , \quad (17)$$

Assim, o campo elétrico é dado pela expressão:

$$E_\phi^{(j)} = -\int_0^\infty \psi_j (e^{-u_j(z-z_j)} + R_{TE}^{(j)} e^{u_j(z-z_j)}) J_1(\lambda r) \lambda .^2 d\lambda , \quad (18)$$

e o campo magnético:

$$H_z^{(j)} = \frac{1}{\hat{z}_j} \int_0^\infty \psi_j (e^{-u_j(z-z_j)} + R_{TE}^{(j)} e^{u_j(z-z_j)}) J_0(\lambda r) \lambda .^3 d\lambda , \quad (19)$$

onde j varia de 1 a N-1 (N é o número de camadas). As constantes ψ_j são dadas pelos coeficientes de reflexão.

Para o cálculo da voltagem em uma das bobinas, devido à ação da corrente sinusoidal de frequência w na outra bobina, usa-se a Lei de *Faraday*:

$$\nabla \times \bar{E} = -\frac{\partial \bar{B}}{\partial t} , \quad (20)$$

resultando:

$$V = 2\pi . a . N_R E_\phi , \quad (21)$$

na qual, N_R é o número de espiras na bobina receptora e E_ϕ o campo elétrico devido à bobina transmissora. O valor da condutividade do meio pode ser obtido através da voltagem na bobina receptora:

$$V_R = -K\sigma \left(1 - \frac{2}{3} \left(\frac{L}{\delta} \right) \dots \right) , \quad (22)$$

onde K é a constante geométrica da ferramenta, L a distância entre as bobinas e δ o *skin depth* ($503 \cdot (1/f\sigma)^{1/2}$). Com as expressões (18), (21) e (22) podemos definir o perfil de condutividade para uma sonda com múltiplos transmissores e receptores que passa por um meio multiestratificado (RIJO, 1990).

caso, variamos as espessuras das camadas e mantivemos constantes os valores de condutividade (Figura 4), notando-se diferentes valores de convergência nas respostas, sendo este valor de 0.3 mhos/m para o ILD.

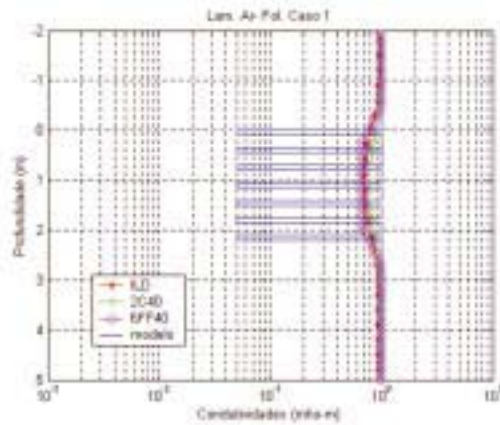


Figura 3 – Intercalações Arenito-Folhelho – Caso 1
Figure 3 – Sand-Shale Intercalations – Case 1

Caso 1		
Litologia	Condut. (mho/m)	Espess. (cm)
Arenito	0,05	10
Folhelho	1	25

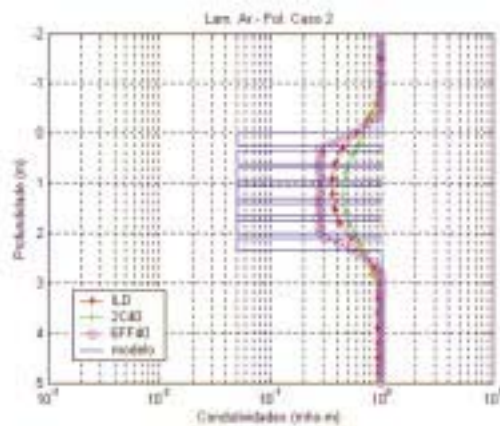


Figura 4 – Intercalações Arenito-Folhelho – Caso 2
Figure 4 – Sand-Shale Intercalations – Case 2

Caso 2		
Litologia	Condut. (mho/m)	Espess. (cm)
Arenito	0,05	25
Folhelho	1	10

No terceiro caso variamos a condutividade do primeiro de 0.05 a 0.01 mho/m e mantemos constantes os demais valores do caso 1. Assim, simulando as respostas das ferramentas de indução obtemos o gráfico da Figura 5, e observamos novamente baixa resolução nas respostas, com um mesmo valor de convergência aproximado de 6 mho/m. Quando varia-mos as espessuras das camadas os valores de convergência são diferentes (Figura 6) – caso 4.

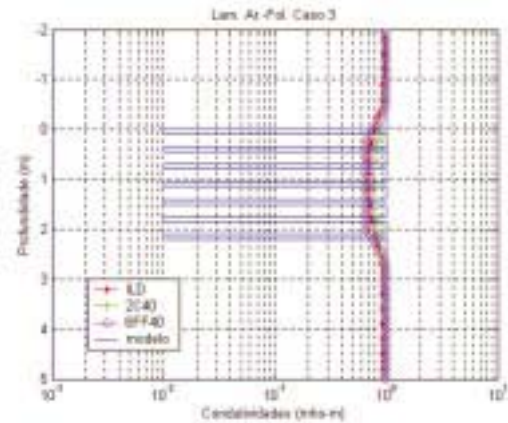


Figura 5 – Intercalações Arenito-Folhelho – Caso 3
Figure 5 – Sand-Shale Intercalations – Case 3

Caso 3		
Litologia	Condut. (mho/m)	Espess. (cm)
Arenito	0,01	10
Folhelho	1	25

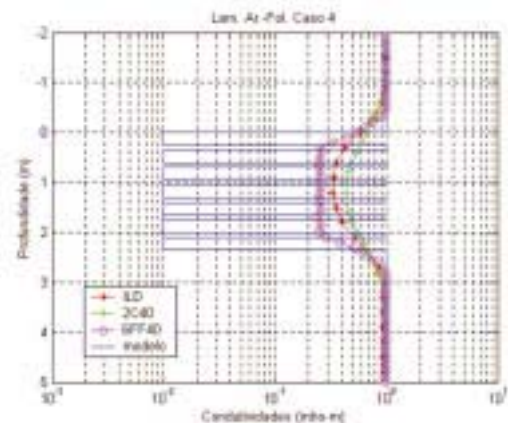


Figura 6 – Intercalações Arenito-Folhelho – Caso 4
Figure 6 – Sand-Shale Intercalations – Case 4

Caso 4		
Litologia	Condut. (mho/m)	Espess. (cm)
Arenito	0,01	25
Folhelho	1	10

b) Intercalações Arenito-Arenito silicificado

Esta modelagem é utilizada para caracterizar reservatórios em que as camadas finas produtoras têm menor condutividade que as camadas não-produtoras. Para este tipo de reservatórios apresentamos também quatro casos básicos: o primeiro com a camada de arenito moderadamente silicificado com maior espessura (Figura 7) e um percentual em volume de arenito de 28%. No segundo caso variamos as espessuras das camadas (Figura 8). Nesta figura, nota-se que a baixa resolução das sondas em camadas de pequena espessura faz com que as respostas das sondas tenham valores aproximadamente constantes.

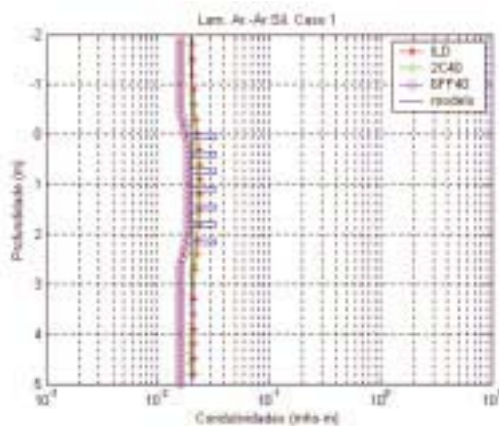


Figura 7 – Intercalações Arenito-Arenito silicificado – Caso 1
 Figure 7 – Silted Sand-Sand Intercalations – Case 1

Caso 1		
Litologia	Condut. (mho/m)	Espess. (cm)
Arenito	0,33	10
Ar. Silic.	0,2	25

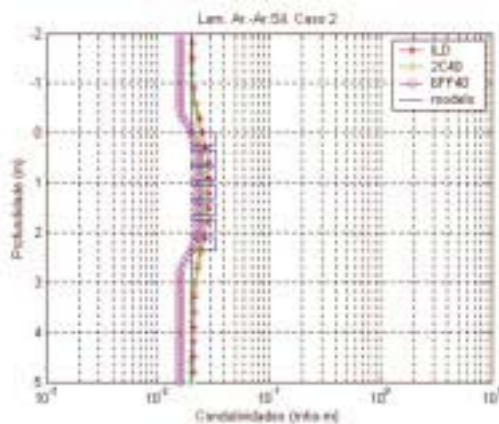


Figura 8 – Intercalações Arenito-Arenito silicificado – Caso 2
 Figure 8 – Silted Sand-Sand Intercalations – Case 2

Caso 2		
Litologia	Condut. (mho/m)	Espess. (cm)
Arenito	0,33	25
Ar. Silic.	0,2	10

Nos terceiro e quarto casos deste tipo de reservatório, variamos a condutividade da camada do arenito silicificado para 0.01 mho/m em relação aos casos 1 e 2, respectivamente. Nas respostas destes modelos, a convergência dos valores das condutividades apresenta valores similares para os três tipos de sondas, aproximando-se ao da condutividade do arenito quando o valor da espessura do arenito é maior. A baixa resolução continua sendo uma característica neste tipo de reservatórios (Figuras 9 e 10).

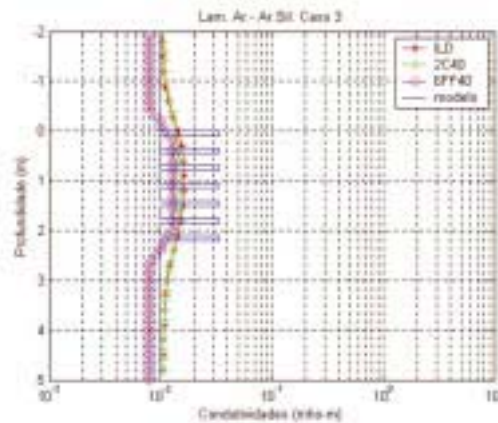


Figura 9 – Intercalações Arenito-Arenito silicificado Caso 3
 Figure 9 – Silted Sand-Sand Intercalations – Case 3

Caso 3		
Litologia	Condut. (mho/m)	Espess. (cm)
Arenito	0,033	10
Ar. Silic.	0,01	25

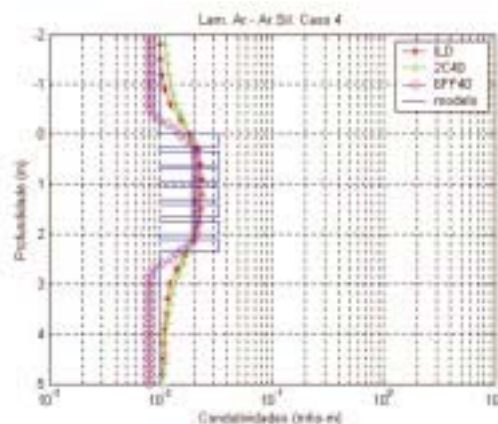


Figura 10 – Intercalações Arenito-Arenito silicificado – Caso 4
 Figure 10 – Silted Sand-Sand Intercalations – Case 4

Caso 4		
Litologia	Condut. (mho/m)	Espess. (cm)
Arenito	0,033	25
Ar. Silic.	0,01	10

c) Intercalações Arenito silicificado-Arenito-Folhelho

Este tipo de reservatório pode ser descrito como um modelo geológico onde a camada fina de arenito de interesse está entre uma camada de menor condutividade (arenito silicificado) e outra de maior condutividade (folhelho). Para este modelo simulamos dois casos. No primeiro caso (Figura 11), as camadas de arenito possuem uma espessura de 10 cm, ainda notamos a baixa resolução das sondas, melhorando ligeiramente com a sonda 6FF40, mostrando alguma sinuosidade pela influência das camadas de maior condutividade (folhelho) e das camadas de menor condutividade (arenito silicificado).

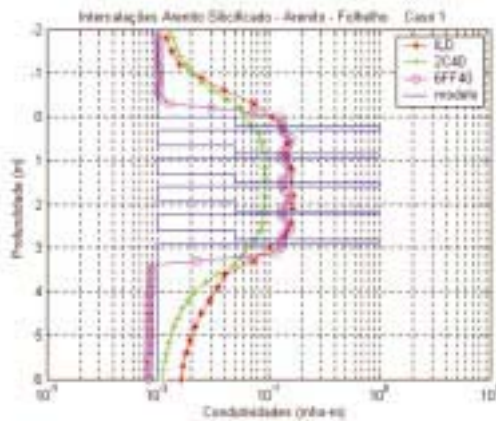


Figura 11 – Intercalações Arenito silicificado – Arenito – Folhelho – Caso 1
 Figure 11 – Silted Sand – Sand – Shale Intercalations – Case 1

Caso 1		
Litologia	Condut. (mho/m)	Espess. (cm)
Ar. Silic.	0,01	35
Arenito	0,05	10
Folhelho	1	10

No segundo caso deste modelo, incrementamos a espessura da camada de arenito até 35cm, mantendo constantes os demais valores do primeiro caso (Figura 12). Para este tipo de reservatório notamos ainda a baixa resolução das sondas, aparecendo melhor resposta na sonda 6FF40 ao apresentar uma pequena sinuosidade. Embora não seja possível determinar os valores da condutividade e da espessura para este modelo, com a sonda 6FF40 podemos notar que o modelo geológico compõe-se de camadas finas, sendo possível também

quantificar simplesmente o número de camadas mais condutoras (folhelho).

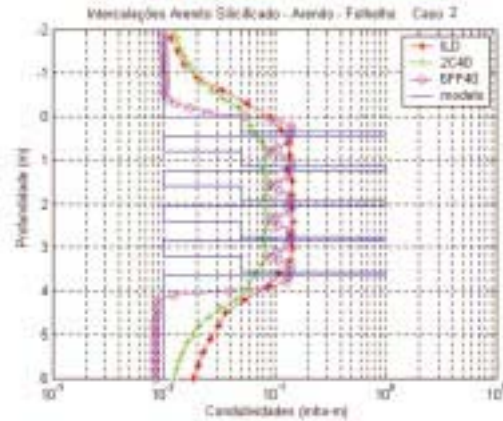


Figura 12 – Intercalações Arenito silicificado – Arenito – Folhelho – Caso 2
 Figure 12 – Silted Sand – Sand – Shale – Case 2

Caso 2		
Litologia	Condut. (mho/m)	Espess. (cm)
Ar. Silic.	0,01	35
Arenito	0,05	35
Folhelho	1	10

CONCLUSÕES

Este trabalho mostra o comportamento das sondas de indução ILD, 2C40 e 6FF40 em reservatórios com intercalações de camadas finas. Para todos os modelos e casos apresentados, a sonda 6FF40 focalizada caracterizou-se por ter uma melhor resolução na localização da posição das camadas, embora com ela não seja possível a determinação dos valores de resistividade e espessura do modelo geológico.

Também, testamos a eficiência do algoritmo 1D, que calculou os modelos testados com um tempo computacional menor de 3 segundos aproximadamente, considerando um sistema computacional com uma memória virtual total de 894,180 kB, disco rígido de 31.3GB e um processador de 996 M Hz, em ambiente LINUX. Isto disponibiliza um algoritmo rápido e eficiente, que pode ser usado para obtenção de catálogos de correção do efeito das camadas adjacentes (*shoulder effect*), tal como fizeram Anderson e Barber (1988).

Finalmente, na seqüência da nossa pesquisa, a efetivação deste algoritmo possibilitará a sua utilização em futuras modelagens com sondas de indução em ambientes tridimensionais, pois esta solução

representa o campo primário, que não é mais do que o primeiro termo da equação integral de *Fredholm*.

REFERÊNCIAS

- ALLEN, D. *Laminated Sand Analysis*. Transactions of the XXV Annual Logging Symposium, New Orleans, 1984. p. 30-34.
- ANDERSON, B.; BARBER, T. D. Strange induction logs: a catalog of environmental effects. *The Log Analyst*, v. 29, n. 4, p. 229-243, 1988.
- ANDRADE, A. *Deconvolução de Perfis de Poço*. Tese (Mestrado)-Universidade Federal do Pará, Belém, 1992.
- ELLIS, D. V. *Well Logging for Earth Scientists*. New York: Elsevier, 1987.
- NABIGHIAN, M. N. Electromagnetic methods in applied geophysics. *Society of Exploration Geophysicists*, Tulsa, v. 2, 1989. Applications part A and part B
- RIJO, L. *Teoria dos métodos eletromagnéticos*. Notas de aula. Centro de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 269p., 1990. No Prelo.
- ROJAS, P. A. *The forward and inverse problems in induction logging*. 223p., Tese (Ph.D)-Colorado School of Mines, Golden, Colorado, 1995.
- VIEIRA, A. *Modelamento de perfis de indução*. 1990. Tese (Mestrado)-Universidade Federal do Pará, Belém, 1990.

NOTAS SOBRE OS AUTORES

Alfredo M. V. Carrasco é doutorando no programa de Pós Graduação em Exploração e Engenharia de Petróleo (LENEP) da Universidade Estadual do Norte Fluminense (UNEF), Macaé — Brasil, onde está aplicando o algoritmo unidimensional desenvolvido para modelos tridimensionais usando a técnica das equações integrais.

Antonio Abel González Carrasquilla é Doutor pela UFPa (Universidade Federal do Pará). Especialista em métodos geofísicos eletromagnéticos de superfície e poço, atualmente é professor associado no Laboratório de Engenharia de Reservatório e Exploração da Universidade Estadual do Norte Fluminense em Macaé — Rio de Janeiro, Brasil.