



Influência Transiente da Temperatura Poço-Formação em Perfis de Resistividade (com invasão)

Klaus Cozzolino

Depto. de Física/UFPA/Brasil

ABSTRACT

The principal aim here is show a transient thermal-resistivity log dependence. The induction devices (ILM and 6ff40), common used in log interpretation, may have some errors and new corrections will be needed. This features are presented when multilayer transient temperature is evaluated and applied to resistivity model. A simple eight meters deep formation is simulated with 2d-thermal and resistivity model, composed by shale and sandstone reservoir, where multiphase radial fluid flow was performed. Due mud circulation, temperature dependence of apparent resistivity formation are evaluated and compared with the resistivity when well-formation temperatures are the same (150°C). Errors into 1% to 12% are expected to medium and deep induction log information with this model.

INTRODUÇÃO

Ao longo dos anos as ferramentas elétricas vêm sendo usadas com o intuito de avaliar as regiões em subsuperfície que possuam elevado teor em hidrocarbonetos. Entre elas podemos citar as de potencial espontâneo, as ferramentas normais, laterais, esféricas e micro-esféricas, as focalizadas, as de indução com duas, três ou mais bobinas, entre outras. Cada uma delas possui características que tornam os perfis confiáveis sob certas condições ideais. Quando em situação adversa (caso normalmente encontrado) há que se tratar os valores dos perfis antes de se avaliar o potencial de um reservatório (avaliação de formação). Este trabalho apresenta o efeito transiente da diferença de temperatura entre poço e formação sobre os perfis de indução das ferramentas 6FF40 e ILM (Schlumberger).

DIFUSÃO DO CALOR

A equação diferencial transiente da difusão do calor, desprovida dos termos de convecção, radiação e de fontes pode ser expressa na forma

$$\nabla \cdot (K \nabla T) = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

onde, $T=T(z,r,t)$ é a temperatura, K é a condutividade térmica, ρ é a densidade, c o calor específico sendo t o tempo. Considerando um meio axialmente simétrico, o modelamento transiente da temperatura é obtido pela aplicação do método misto de *diferenças finitas* no tempo e de *elementos finitos* nas coordenadas espaciais r e z (Davies, 1980). A solução aproximada é expressa por

$$T(z, r, t) = \sum_e^N \left[\sum_{j \in e} \varphi_j^e(t) u_j^e(z, r) \right] \quad (2)$$

onde $\varphi_j(t)$ é a amplitude da temperatura no tempo t e $u_j(z,r)$ são as funções de forma para elementos triangulares. Aplicando o método de Galerkin na equação (1) e considerando a condição homogênea de Neumann em todas as fronteiras obtemos o seguinte conjunto de equações

$$\overline{A} \overline{\varphi} + \overline{B} \frac{\partial \overline{\varphi}}{\partial t} = 0 \rightarrow \overline{\varphi}(t + \Delta t) = \overline{D}^{-1} \overline{E} \overline{\varphi}(t) \quad (3)$$

onde na última passagem usou-se a aproximação da derivada temporal proposta por Cranck-Nicolson. A equação (3) fornece o método iterativo para o cálculo dos coeficientes de temperatura $\overline{\varphi}$ em um tempo posterior bastando para isso, o conhecimento da distribuição de temperatura em um tempo conhecido ($t=0s$). A Figura 1 ilustra a seção poço-formação modelada térmicamente, enquanto a Figura 2 apresenta as distribuições radiais de temperatura. $T(4, r, t)$ em diferentes tempos, na profundidade de 4 metros. A história térmica (0 – 36 horas) da seção poço-formação foi obtida simulando a circulação da lama por um tempo t_C de 8 horas. Durante este tempo a temperatura da lama foi considerada constante e igual a 50°C.

O programa foi testado considerando dois meios cilíndricos concêntricos, com diferentes propriedades e temperaturas. Os resultados foram comparados com a solução analítica proposta por Carslaw-Jaeger (1986) diferindo por menos de 2°C na região do cilindro interno (poço) e adjacências. As mudanças das propriedades térmicas com a invasão alteram a distribuição de temperatura também em torno de 2°C. Estas pequenas variações nas distribuições de temperatura possuem uma influência mínima nos cálculos de resistividade e não foram levadas em consideração, poupando um razoável esforço computacional.

INVASÃO E RESISTIVIDADE

O fenômeno de invasão ocorre em camadas permo-porosas devido à uma diferença radial de pressão entre poço e formação. Cozzolino (1995) apresenta uma extensão da equação de Buckley-Leverett para o caso de simetria cilíndrica e dada por

$$r^2 = r_0^2 + 2 \frac{Q_0 r_0}{\phi} f_w^l(S_w) t \tag{4}$$

onde r representa a posição radial para uma dada saturação S_w , $r_0 = 0.1m$ é o raio do poço, ϕ a porosidade, $f_w^l(S_w)$ a derivada do fluxo fracional de água em relação à saturação, Q_0 é a velocidade com que o filtrado da lama adentra a formação em $r=r_0$ e t é o tempo. O modelo de invasão (equação 4) foi utilizado por Cozzolino et al. (1998) para avaliar a diferença entre resistividades aparentes fornecidas pelas ferramentas de duas bobinas e 6FF40, considerando diferentes valores de porosidade, saturação e razão entre mobilidades do óleo e água. Neste trabalho o modelo radial de invasão é aplicado em cada profundidade z de modo a obtermos a distribuição de saturação da formação $S_w(z, r, t)$.

Usando a equação de Archie na seção de arenito, e a distribuição de saturação do modelo de invasão, obtemos a resistividade em cada ponto da formação pelas equações

$$R(z, r, t) = \frac{0.81 R_{eq}(z, r, t)}{\phi^2 S_w^2(z, r, t)} \quad \frac{1}{R_{eq}} = \frac{[1 - F_w(z, r, t)]}{R_{mf}(z, r, t)} + \frac{F_w(z, r, t)}{R_w(z, r, t)} \quad F_w = \frac{S_{wi}}{S_w(z, r, t)} \tag{5}$$

onde as resistividades do filtrado da lama R_{mf} , e da água da formação R_w são alteradas pela temperatura segundo a equação

$$R_x(z, r, t) @ T(z, r, t) = R_x(T_{ref}) \cdot \left(\frac{T_{ref} + 21.5}{T(z, r, t) + 21.5} \right) \tag{6}$$

sendo T_{ref} a temperatura de referência para a resistividade R_x . As resistividades da lama e do folhelho também são alteradas pela temperatura segundo a equação (5). A Tabela 1 contém os dados utilizados para aquisição das resistividades da formação, enquanto a Figura 3, ilustra as distribuições radiais de resistividade nas profundidades de 0m, 4m e 8m no tempo de 10 horas. As linhas contínuas representam as resistividades obtidas para uma distribuição não uniforme de temperatura, enquanto as linhas pontilhadas representam as resistividades supondo poço e formação à uma temperatura homogênea de 150°C. Nota-se claramente o efeito da temperatura sobre estas resistividades principalmente nas proximidades do poço.

PERFIS DE RESISTIVIDADE E INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA

Os perfis de resistividade são obtidos pela equação

$$\frac{1}{R_{ap}(z, t)} = \iint G(z - z', r, \sigma_0) \frac{1}{R(z - z', r, t)} dz' dr \tag{7}$$

que representa uma convolução do fator geométrico da ferramenta de indução ($G(z, r, \sigma_0)$) com a condutividade da formação. O valor utilizado para a condutividade de fundo (σ_0) foi 0,1 S/m. Os perfis calculados nos tempos de 1h, 4hs, 10hs, 12hs, 24hs e 36hs estão apresentados nas Figuras 4(a) e 5(a) para a ferramenta ILM. Os resultados frente a camada de folhelho estão em acordo com os publicados por Howard et. al. (1995). Podemos verificar como as resistividades variam devido ao efeito conjugado da invasão e da temperatura. As linhas tracejadas representam os mesmos perfis se a temperatura poço-formação fosse homogênea e igual a 150°C ($t = \infty$). Para avaliar o efeito da temperatura fez-se uso da relação

$$Erro(z, t) \% = \frac{R_{ap}(z, t) - R_{ap}(z, \infty)}{R_{ap}(z, \infty)} \cdot 100 \% \tag{8}$$

que representa o erro ou diferença relativa percentual entre os perfis. Podemos ver nas Figuras 4(b) e 5(b) como estes erros se comportam no tempo.

Os mesmos cálculos foram realizados para a ferramenta 6FF40 e estão ilustrados nas Figuras 6 e 7. Como podemos constatar, os perfis de resistividade obtidos pela 6FF40 possuem erros inferiores aos da ferramenta ILM. Isto acontece pois a profundidade de investigação da 6FF40 é aproximadamente o dobro da ferramenta ILM, sendo assim menos influenciada pela zona invadida, seja pelo filtrado da lama, seja térmicamente.

CONCLUSÕES

Este trabalho mostra, de forma simples, que perfis elétricos sofrem uma razoável influência da distribuição não uniforme de temperatura, decorrente da circulação da lama durante a perfuração do poço. O efeito será pronunciado quanto maior for a diferença de temperatura poço-formação, bem como em situações de elevado tempo de circulação da lama. As diferenças relativas entre os perfis cresce com o tempo durante a circulação da lama e, decrescem após seu término. Os perfis em frente a camada de folhelho possuem erros aproximados de 1 – 4% quando obtidos pela ferramenta ILM. Os reservatórios com menor saturação em água apresentam erros superiores aos reservatórios com maior saturação. Nestes reservatórios os erros flutuam com o tempo entre 2% e 12%. Finalmente, as ferramentas de

indução com investigação profunda são menos afetadas pela distribuição transiente de temperatura, necessitando de correções entre 1% e 6%.

REFERÊNCIAS

Carslaw, H. S. e Jaeger, J. C., 1986. *Conduction of heat in solids*. 2. Ed., Oxford University Press, p. 346.

Cozzolino, K. (1995). *Estimativas da Condutividade Térmica dos Minerais e Rochas e Influência dos Parâmetros Térmicos e Petrofísicos na Resistividade Aparente da Formação*. Tese de mestrado, DGf, UFPA, |Brasil.

Cozzolino, K., Howard, A. Q. Jr. and Protázio, J. S., 1998. *A New Look at Multiphase Invasion with Applications to Borehole Resistivity Interpretation*, *Journal of Applied Geophysics*, waiting for publication.

Davies, A. J., 1980. *The Finite Element Method: a first approach*, Clarendon Press. – Oxford, chapters 4 and 6.

Howard, A. Q. Jr., Cozzolino, K., Decoster, E., Allen, D. and Seydoux, J., 1995. *LWD and Wireline Resistivity Logs: for Time and Temperature Dependent Resistivity*, *Anais of 4th International Congress of Brazilian Geophysical Society*. p. 727 – 729.

AGRADECIMENTOS

O autor agradece aos Profs. Drs. André Andrade, Jesse Costa, João Protázio e Allen Howard, as facilidades computacionais do DGf/UFPA, bem como ao Departamento de Física/UFPA.

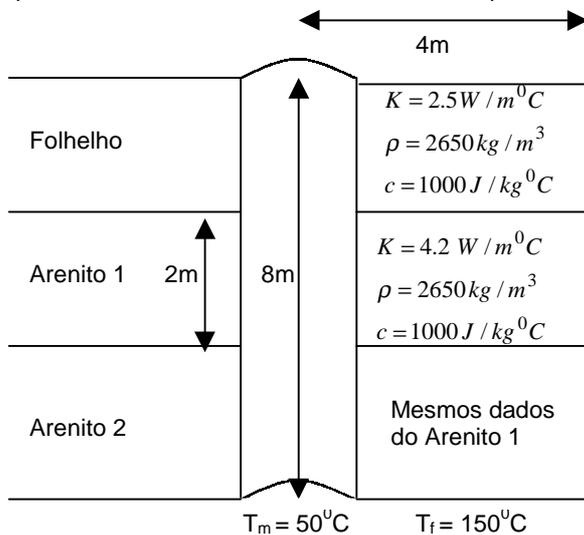


Figura 1 – Modelo de camadas usado no trabalho. As propriedades térmicas da lama são $K = 1.22 \text{ W/m}^\circ\text{C}$, $\rho = 1100 \text{ kg/m}^3$ e $c = 3430 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$.

Figura 2 – Distribuições radiais de temperatura relativas a $z = 4 \text{ m}$ nos tempos de 1 h, 4 hs, 10hs, 12 hs, 24 hs e 36 hs.

Descrição	Propriedades
Lama	$R_m = 2.5 \Omega \cdot \text{m} @ 27.22^\circ\text{C}$
Filtrado da lama	$R_{mf} = 0.5 \Omega \cdot \text{m} @ 27.22^\circ\text{C}$
Folhelho	$R_{sh} = 16 \Omega \cdot \text{m} @ 25^\circ\text{C}$
Água da formação	$R_w = 0.05 \Omega \cdot \text{m} @ 23.22^\circ\text{C}$
Arenito 1	$\phi = 20\%$, $S_{wi} = 15\%$ $S_{or} = 16\%$ $Q_0 = 1.38 \text{e-}2 \text{ m/s}$ $\beta = 1.0$
Arenito 2	Igual ao Arenito 1 porém com $S_{wi} = 20\%$

Tabela 1 – Propriedades usadas para avaliar a resistividade e modelar a invasão do filtrado da lama na formação.

Figura 3 – Distribuições radiais de resistividade em $z=0,4$ e 8 metros, no tempo de 10hs. Linhas contínuas – distribuição não uniforme de temperatura. Linhas tracejadas – $T(z,r,\infty) = 150^\circ\text{C}$.

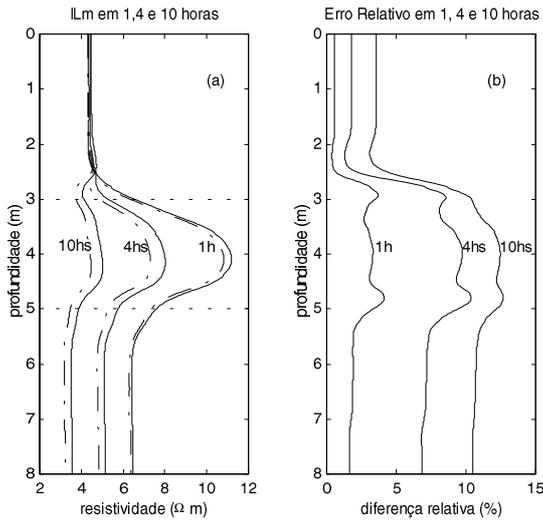


Figura 4 – (a) Dependência transiente dos perfis de resistividade da ferramenta ILM devido à invasão do filtrado da lama e da temperatura, nos tempos de 1h, 4hs e 10hs. As linhas contínuas representam os perfis obtidos para distribuição não uniforme de temperatura enquanto as linhas tracejadas representam os perfis supondo poço e formação com temperatura igual a 150°C. (b) Diferença relativa percentual entre os perfis para

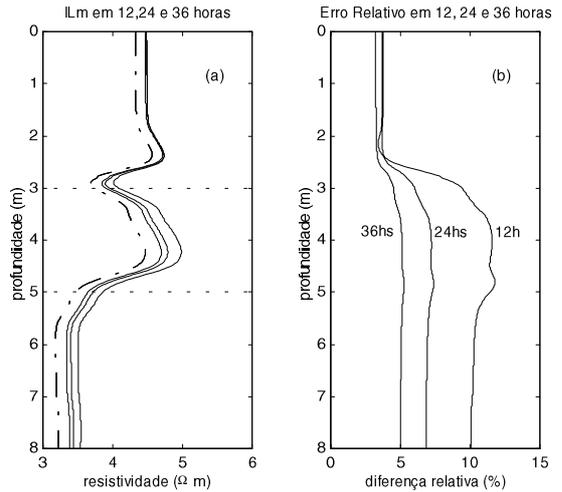


Figura 5 –(a) Dependência transiente dos perfis de resistividade da ferramenta ILM devido à invasão do filtrado da lama e da temperatura, nos tempos de 12h, 24hs e 36hs. As linhas contínuas representam os perfis obtidos para distribuição não uniforme de temperatura enquanto as linhas tracejadas representam os perfis supondo poço e formação com temperatura igual a 150°C. (b) Diferença relativa percentual entre os perfis para cada tempo.

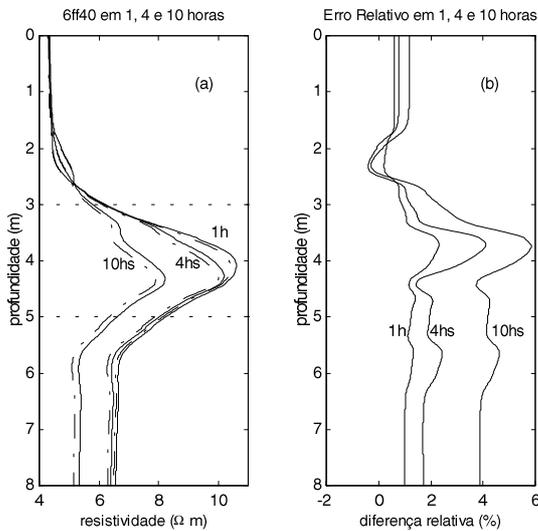


Figura 6 - (a) Dependência transiente dos perfis de resistividade da ferramenta 6FF40 devido à invasão do filtrado da lama e da temperatura, nos tempos de 1h, 4hs e 10hs. As linhas contínuas representam os perfis obtidos para distribuição não uniforme de temperatura enquanto as linhas tracejadas representam os perfis supondo poço e formação com temperatura igual a 150°C. (b) Diferença relativa percentual entre os perfis para cada tempo.

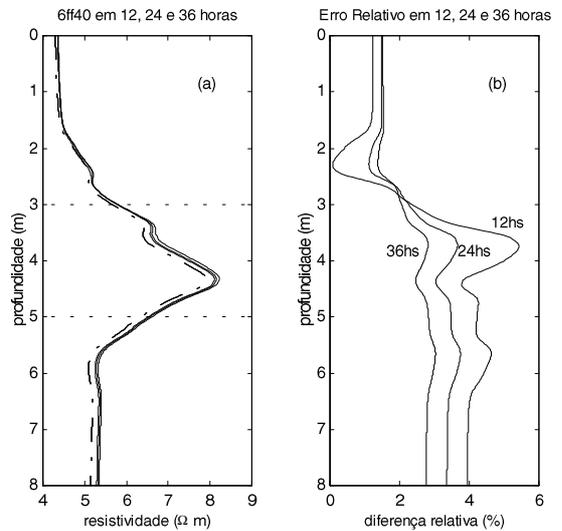


Figura 7 - (a) Dependência transiente dos perfis de resistividade da ferramenta 6FF40 devido à invasão do filtrado da lama e da temperatura, nos tempos de 12h, 24hs e 36hs. As linhas contínuas representam os perfis obtidos para distribuição não uniforme de temperatura enquanto as linhas tracejadas representam os perfis supondo poço e formação com temperatura igual a 150°C. (b) Diferença relativa percentual entre os perfis para cada tempo.