



Modelagem numérica tridimensional da resposta do perfil de indução na presença de diferentes geometrias da zona de invasão

Alfredo Carrasco & Abel Carrasquilla, UENF/CCT/LENEP – Macaé, RJ

Copyright 2008, SBGF - Sociedade Brasileira de Geofísica

Este texto foi preparado para a apresentação no 12th Congresso Internacional da Sociedade Brasileira de Geofísica, Rio de Janeiro, 15 a 18 de Agosto de 2011. Seu conteúdo foi revisado pelo Comitê Técnico da 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

A perfilagem de indução eletromagnética é uma das técnicas geofísicas de poço mais utilizadas na avaliação da resistividade da zona virgem de reservatórios que contem hidrocarbonetos, devido à sua boa profundidade de investigação. Entretanto, a resistividade dessa zona virgem medida por esse perfil pode resultar mascarada pelo filtrado da lama que invade a formação, o que ocorre durante a perfuração dos poços. Assim, o objetivo do presente trabalho é simular a resposta do perfil de indução na presença de diferentes geometrias tridimensionais das zonas invadidas, utilizando para tal um algoritmo que usa o método das equações integrais. A ferramenta de indução usada na simulação foi a clássica 6FF40 da SCHLUMBERGER, cujos resultados mostram que a existência de uma zona de invasão sempre altera as respostas do perfil, tanto para os modelos de rampa, como do *slope*, e, de maneira mais significativa, no caso da presença do *annulus*.

Introdução

A perfilagem geofísica desempenha um papel fundamental na exploração de hidrocarbonetos, principalmente na avaliação das características petrofísicas dos reservatórios, pois se trata de técnicas que representam um pequeno percentual do custo no total do poço, mas que fornecem importantes informações das propriedades das rochas presentes. Dentro do conjunto dos perfis de poço, o perfil de indução eletromagnética, desenvolvido nos anos 40 do século passado, objetiva a medição da resistividade das camadas em poços contendo lamas não condutoras de base óleo. Nesse sentido, a medição da resistividade da zona não invadida (R_t) é uma das tarefas mais importantes na avaliação do potencial produtor de um poço, pois permite a estimativa da saturação de óleo existente através da utilização da Lei de Archie (Dewan, 1983).

Porém, durante a perfuração acontece uma invasão da parte líquida do fluido de perfuração nas camadas permeáveis, pois a pressão hidrostática dentro do poço é maior que a pressão da formação. Este deslocamento dos fluidos originais dentro da formação pelo fluido de perfuração não acontece de maneira uniforme e o grau de penetração vai depender de parâmetros petrofísicos característicos de cada tipo litológico. Por tanto, se faz necessário um entendimento dos efeitos causados por esta zona de invasão nas respostas dos perfis de poço,

neste caso particular do perfil de indução, o qual pode ser derivado de simulações numéricas (Anderson, 2001).

Metodologia

Para desenvolver o nosso estudo, utilizamos o arranjo focalizado da ferramenta 6FF40 da SCHLUMBERGER (Anderson, 2001) e a técnica numérica da equação integral para simulação diferentes tipos de invasão tridimensional (3D). Esta abordagem numérica envolve o cálculo do campo primário do meio encaixante ao corpo 3D na forma de um meio estratificado unidimensional (1D), sendo a heterogeneidade 3D discretizada na forma de prismas (Hohmann, 1975). A formulação desta técnica em problemas da física tem provado ser eficiente e compacta em comparação com a formulação das equações diferenciais, devido a que as condições de fronteira são satisfeitas de forma automática na sua formulação. Devido à propriedade de discretizar somente a heterogeneidade, esta abordagem numérica utiliza menos memória do sistema e, com isso, reduz sensivelmente o tempo computacional. Por esta razão, se constitui no melhor método numérico para solucionar problemas eletromagnéticos 3D, especialmente quando as heterogeneidades são pequenas e há poucos corpos para modelar (Carrasquilla, 1993).

Na prática, pouco é conhecido referente à real geometria da invasão e não existem formas satisfatórias para sua medição *in situ*. Um modelo simplificado bastante utilizado para a determinação de R_t é o modelo pistão, o qual pode ser descrito como um deslocamento uniforme dos fluidos originais da formação permeável pelo fluido de perfuração (zona lavada com resistividade R_{xo}). Entretanto, para reservatórios sem fluxo de água e sem camada de gás presentes podem ser utilizados os modelos tipo rampa (Figura 1) ou tipo *slope* (Figura 2), como definidos por Singer e Barber (1988). Todos esses modelos consideram uma seqüência de camadas, contemplando camadas de folhelhos superior e inferior com resistividade de 1 ohm-m, e um reservatório no meio, correspondente à zona virgem contendo óleo, com resistividade de 100 ohm-m, o mesmo acontecerá na nossa abordagem.

Na Figura 1 pode-se observar que, no lugar de uma zona lavada, existe uma zona de transição cuja extensão depende de parâmetros petrofísicos do reservatório, tais como porosidade, permeabilidade, pressão capilar, e densidade do fluido invasor, dentre outros. Neste modelo é observada uma mudança linear a partir da parede do poço até a zona virgem, o que constitui no primeiro modelo a ser simulado neste trabalho.

No modelo da Figura 2, do tipo *slope*, observa-se que existe antes da zona de transição linear, uma zona

lavada a partir da parede do poço, o qual seria o segundo modelo a ser simulado no presente trabalho.

Por outro lado, para reservatórios com presença de aquíferos, o modelo de invasão muda e aparece uma zona conhecida como *annulus*. Singer e Barber (1988) definem essa zona como típica de reservatórios que possuem uma mobilidade de hidrocarbonetos maior que a água. Neste caso, forma-se uma zona onde os hidrocarbonetos são parcialmente deslocados pela água da formação. Na Figura 3 é possível observar como é formado o *annulus* e na parte inferior sua representação considerando os valores de resistividade. Este seria o terceiro modelo a ser simulado no trabalho (Figura 4).

Para o modelo tipo rampa se consideram células prismáticas de 0,2 m de comprimento e 0,4 m de altura, com as células que representam o poço tendo um comprimento menor de 0,2 m, fazendo um diâmetro de 7,9 polegadas. A Figura 5 apresenta uma visão esquemática da metade do modelo rampa 3D, consistindo de uma vista em planta (Figura 5a) e um corte transversal (Figura 5b). A resistividade do poço é de 1 ohm.m e está simbolizada pelas células com número 1 na Figura 5b. A região sombreada é a zona de invasão, com profundidade de 0,7 m, representada pelas células com os números 2 e 3, com resistividades de 20 ohm.m e 50 ohm.m, respectivamente. A resistividade da zona 3 foi definida como uma resistividade intermediária entre a zona lavada e a zona virgem (35 ohm.m). A resistividade da zona virgem contendo petróleo está marcada com o número 4, com valores de 100 ohm.m (Semmelbeck & Holditch, 1988).

No modelo de invasão tipo *slope*, a geometria considerada é a mesma que a do modelo rampa, quanto às dimensões e aos valores de resistividade, com a diferença na porção superior do esquema apresentado (Figura 6). Experiências realizadas por Gondouin e Heim (1964) em arenitos aquíferos, mostraram que o formato de invasão tipo rampa acontece quando a invasão é menor e o tipo *slope* quando a invasão é mais forte. Novamente consideramos aqui uma zona intermediária entre a zona lavada e zona virgem marcada com o número 3 (35 ohm.m). Acredita-se que esta zona de transição seja causada por fenômenos tipo *finger* do fluido invasor, penetrando até uma região adjacente à zona virgem (Jiao & Sharma, 1991),

Para o modelo do tipo *annulus* é importante considerar a resistividade da água de formação menor que a resistividade do filtrado de lama, pois como foi observado nos experimentos de Jiao e Sharma (1991), quando R_{mf} e R_w são da mesma magnitude, nenhum *annulus* vai ser observado. O *annulus* se desenvolve quando o reboco ainda não foi formado e a taxa de invasão é alta, assim, a maior parte do petróleo vai ser deslocada na sua parte superior num curto período de tempo e, de forma simultânea, acontece o deslocamento miscível da salmoura original pelo filtrado de lama, de maior resistividade (Figura 4). O resultado neto destes dois efeitos é a formação do *annulus*, que se caracteriza por ter baixa resistividade e forte influência nas respostas da ferramenta de indução (Singer & Barber, 1988). Por outro lado, os parâmetros de resistividade e de profundidades de investigação do modelo para o caso

annulus foram obtidos dos estudos de Bovan et al. (2003), como mostrado na Figura 7. A distribuição de resistividades representaria, de maneira geral, o comportamento de um reservatório contendo hidrocarbonetos, acima de aquífero. Os detalhes deste modelo são os seguintes: diâmetro do poço de 7,9 polegadas contendo fluido de perfuração de 1 ohm.m de resistividade (indicado pelas células com número 1); uma zona de lavada com resistividade de 20 ohm.m (células número 2) com uma distância radial de 0,7 m; a zona correspondente ao *annulus* com resistividade igual a 0,1 ohm.m (células indicadas por pontos) e largura de 0,4 m; e a zona virgem do reservatório, ocupada pelo petróleo, com resistividade de 100 ohm.m (células número 4).

Resultados

A resposta da ferramenta 6FF40 para o modelo de invasão 3D tipo rampa da Figura 5 aparece na cor vermelha na Figura 8. As linhas retas em cor azul representam a distribuição de resistividade 1D sem a presença da heterogeneidade 3D. Para fins de comparação, foi plotada também a resposta da mesma seqüência de resistividades para o modelo 3D sem a presença do fluido invasor, que é a curva de cor verde da mesma figura. Assim, observamos que, neste caso, a invasão causa uma pequena diminuição nos valores da parte inferior das curvas de resistividades, devido ao formato de invasão utilizado.

No caso do modelo *slope* da Figura 6, foram mantidos os valores de resistividades e as dimensões das células, mudando somente a geometria da zona de invasão. Do mesmo modo que no caso rampa, existe também uma diminuição nos valores da parte inferior das curvas de resistividades (curva vermelha), com respostas muito parecidas (Figura 9). Neste caso, também são mostradas as curvas de resistividade 1D (azul) e a resposta 3D sem invasão (verde).

Finalmente, para o modelo da Figura 7, nota-se uma forte influência da presença do *annulus* se estendendo em grande parte da curva de resistividade (curva vermelha), com valores de resistividades ainda menores que nos casos dos modelos rampa e *slope* (Figura 10). Para esta modelagem, foi considerado um aquífero com resistividade de 2 ohm.m e de 0,8 metros de espessura. Ao igual que os casos da rampa e do *slope*, também são mostradas as curvas de resistividade 1D (azul) e a resposta 3D sem invasão (verde).

Conclusões

Os resultados obtidos na simulação numérica da resposta do perfil de indução eletromagnética na presença de uma zona de invasão de geometria 3D com a abordagem da equação integral mostram que a existência dessa zona modifica as respostas, como se observou nos modelos do tipo rampa e do tipo *slope*, e de maneira mais significativa no caso da presença do *annulus*. Neste último caso, a ferramenta 6FF40 mostrou-se extremamente sensível à presença da baixa resistividade do *annulus*, o que pode levar a uma estimativa inferior no cálculo das reservas. Esta baixa resistividade está relacionada com a salinidade da água de formação e do filtrado de lama, quanto que, as

características geométricas do *annulus* são dependentes de parâmetros petrofísicos do reservatório.

Agradecimentos

À Universidade Estadual Norte Fluminense Darcy Ribeiro (UENF) pelo suporte computacional, à Sociedade de Engenheiros de Petróleo (SPE) por disponibilizar artigos para consulta e à Rede CARMOD pelo suporte financeiro do projeto de pesquisa.

Referencias

Anderson, B. 2001. Modeling and inversion methods for the interpretation of resistivity logging tool response. PhD Thesis, DUP Science, Delft, The Netherlands, 386 p.

Bovan, G.; Torres-Verdín, C.; Delshad, M; Sigal, R.; Zouiouche, F. & Anderson, B. 2003. A case study integrating the physics of mud-filtrate invasion with the physics of induction logging: assessment of in-situ hydrocarbon saturation in the presence of deep invasion and highly saline connate water. Research Report, University of Texas, 14 p.

Carrasquilla A. 1993. Modelagem numérica da influência do eletrojato equatorial em dados magnetotélúricos produzidos por estruturas tridimensionais. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Pará, Belém, 176p.

Dewan, J. 1983. Essentials of Modern Open-Hole Log Interpretation. PennWell Publishing Company, Tulsa, OK, 361 pp.

Gondouin, M., Heim, A. 1964. Experimentally determined resistivity profiles in invaded water and oil sands for linear flows. Journal of Petroleum Technology, Volume 16, Number 3, p. 337-348

Hohmann, G. W. 1975. Three-dimensional induced polarization and electromagnetic modeling. Geophysics, 40:309-324.

Jiao, D. & Sharma, M. 1992. An experimental investigation of the resistivity profile in the flushed zone. The Log Analyst, SPWLA, Vol. 33, No. 2, 10 pp.

Singer, J. & Barber, T. 1988. The effect of transition zones on the response of induction logs, SPWLA Symposium, 29th, San Antonio, Tex., 1988, Transactions, p. L1-L13.

Semmelbeck, M. & Holditch S. 1988. The effects of mud filtrate invasion on the interpretation of induction logs. SPE Formation Evaluation, Vol. 3, No. 2, p. 386-392.

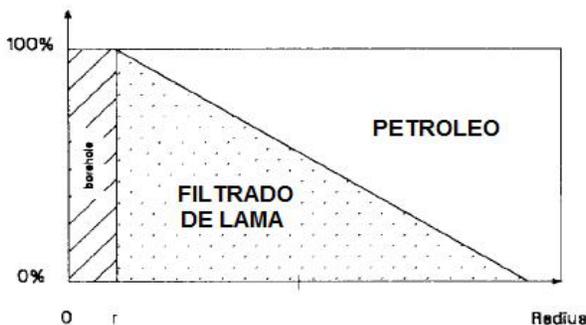


Figura 1. Modelo tipo rampa (modificado de Singer & Barber, 1988).

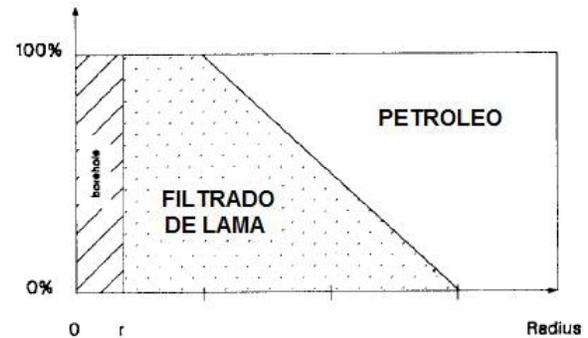


Figura 2. Modelo tipo *slope* (modificado Singer & Barber, 1988).

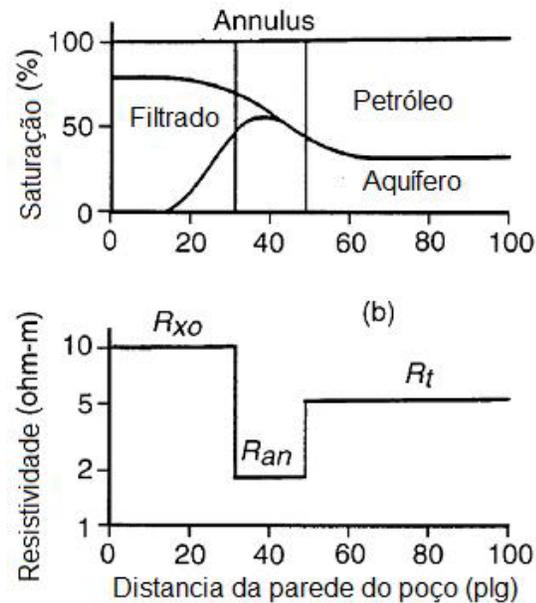


Figura 3. Modelo tipo *annulus* (modificado Anderson, 2002)

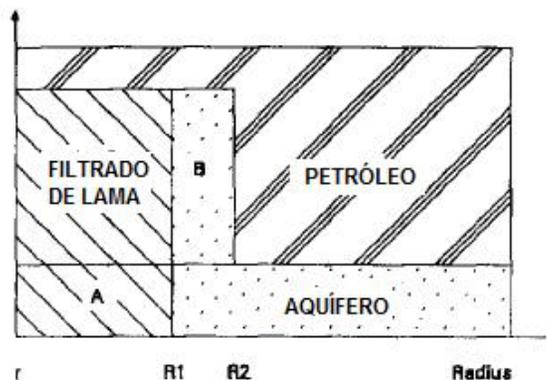


Figura 4. Modelo tipo *annulus* (modificado de Singer e Barber, 1988)

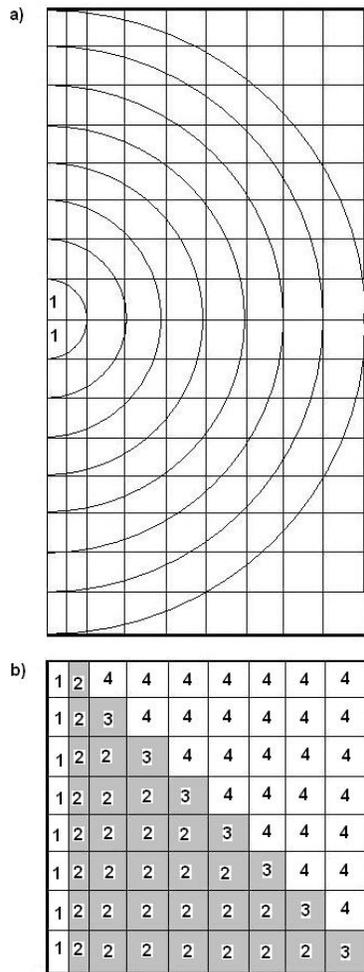


Figura 5. Metade do modelo 3D tipo rampa. a) Vista em planta. b) Corte transversal.

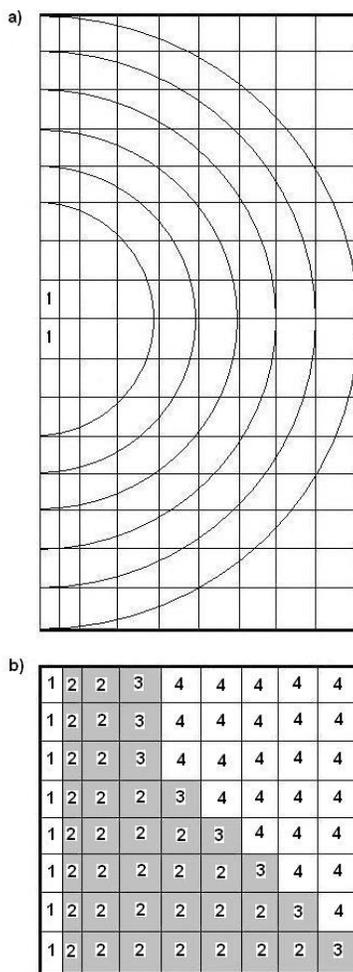


Figura 6. Metade do modelo 3D tipo slope. a) Vista em planta. b) Corte transversal.

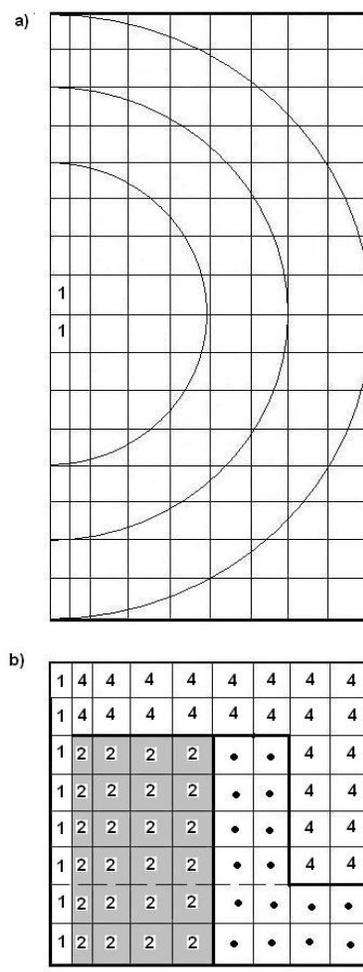


Figura 7. Modelo tipo annulus. a) Vista em planta. b) Corte transversal.

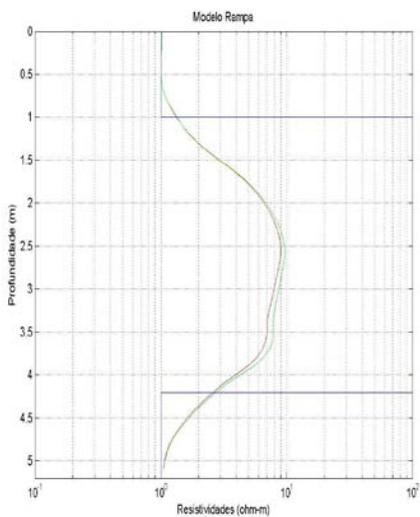


Figura 8. Resposta do 6FF40 para o modelo tipo rampa.

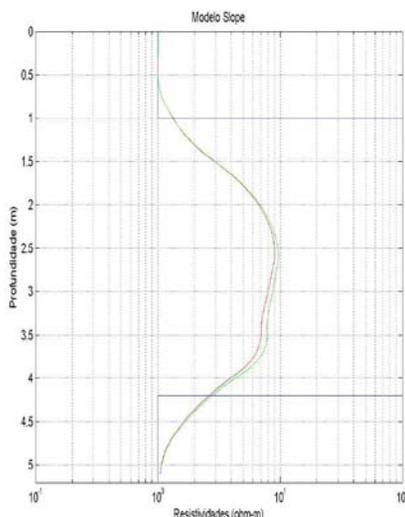


Figura 9. Resposta do 6FF40 para o modelo tipo slope.

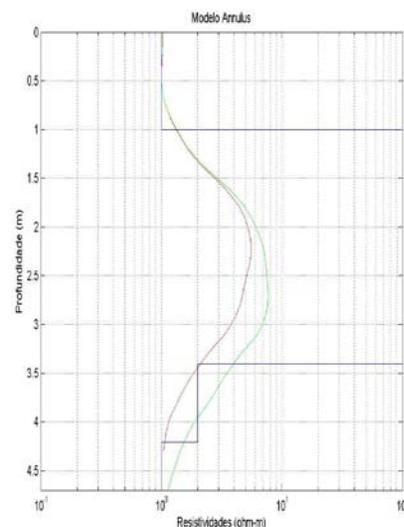


Figura 10. Resposta do 6FF40 para o modelo tipo annulus.