

## Comparação entre Ferramentas de Perfuração LWD Convencionais e Direcionais em Ambientes 3D Complexos

Marcela S. Novo<sup>1\*</sup>, Luiz C. da Silva<sup>2</sup>, Fernando L. Teixeira<sup>3</sup> - <sup>1</sup>INMETRO, <sup>2</sup>PUC-Rio, <sup>3</sup>Ohio State Univ.

Copyright 2008, SBGF - Sociedade Brasileira de Geofísica Este texto foi preparado para a apresentação no III Simpósio Brasileiro de Geofísica, Belém, 26 a 28 de novembro de 2008. Seu conteúdo foi revisado pelo Comitê Técnico do III SimBGF, 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

O método dos volumes finitos (FVM) é implementado para comparar a resposta elétrica de ferramentas de perfuração LWD convencionais e direcionais em cenários tridimensionais (3D) complexos. Formações com leitos anisotrópicos inclinados e poços excêntricos, assim como os efeitos do fluido de perfuração e da variação azimutal na resposta elétrica das ferramentas são investigados. O método é baseado em uma formulação por potenciais vetor e escalar para superar problemas de convergência e mau condicionamento. O sistema linear é resolvido através do método dos gradientes biconjugados estabilizado. Os resultados numéricos são validados por comparação com soluções pseudo-analíticas.

### INTRODUÇÃO

Ferramentas convencionais de perfuração eletromagnética de poços, utilizadas na exploração de óleo e gás, empregam antenas em espiras horizontais. Estas antenas são sensíveis apenas a componente horizontal (perpendicular ao eixo da ferramenta) da condutividade da formação nas vizinhanças do poço. Tal característica conduz a desafios na avaliação da formação, especialmente em formações anisotrópicas e formações com leitos inclinados (que podem ocorrer como resultado da perfuração direcional), assim como para investigar os efeitos da gravidade e/ou das vibrações mecânicas durante a perfuração do poço. Ao contrário das ferramentas de perfuração convencionais, a utilização de espiras inclinadas pode prover dados com sensibilidade azimutal, assim como estimativas da anisotropia da formação (Sato et al., 1994; Hagiwara et al., 2003; Li et al., 2005). Em ferramentas LWD, por exemplo, a sensibilidade azimutal ao redor do eixo da ferramenta pode ser empregada para melhorar o geodirecionamento durante a perfuração direcional/horizontal de um poço (Hue and Teixeira, 2006, 2007). Para a indústria petrolífera é interessante ter uma ferramenta de perfuração capaz de geodirecionar poços

em relação às fronteiras do reservatório, mesmo quando o poço não intercepta a fronteira. As ferramentas LWD convencionais, por exemplo, não são capazes de indicar se a fronteira do reservatório mais próximo está abaixo ou acima do poço (Li et al., 2005).

Neste trabalho, realiza-se uma comparação entre a resposta elétrica de ferramentas LWD convencionais e direcionais em cenários 3D complexos, dos quais incluem formações com leitos anisotrópicos inclinados, estudos dos efeitos do fluido de perfuração, da excentricidade e da variação azimutal na resposta das ferramentas. A modelagem numérica é realizada através do método dos volumes finitos (FVM). O algoritmo é baseado em uma formulação por potenciais vetor e escalar, para superar problemas de convergência e mau condicionamento do sistema linear resultante da discretização das equações. O sistema linear é resolvido iterativamente através do método dos gradientes biconjugados estabilizado. Os resultados são validados com soluções pseudo-analíticas, em cenários onde a solução pseudo-analítica é válida, mostrando excelente concordância.

### METODOLOGIA

O presente método dos volumes finitos (FVM) foi introduzido na literatura em (Harber and Ascher, 2001), sendo válido apenas em meios isotrópicos. Em (Novo et al., 2007), o método foi estendido para meios anisotrópicos e aplicado à modelagem de ferramentas LWD convencionais. A formulação de potenciais acoplados (vetor e escalar) é bastante conveniente em problemas de frequências baixas, tais como a modelagem de ferramentas de perfuração LWD, pois o operador rotacional discreto possui um espaço nulo não trivial e, portanto, o sistema linear associado pode se tornar mal condicionado. Cabe ressaltar que isto também pode ocorrer em problemas onde a utilização de grades bem refinadas é requerida, pois o limite de frequências baixas é recuperado localmente (comprimento de onda muito maior que o tamanho da célula). Uma comparação entre a formulação de potenciais acoplados com a formulação de campos (elétrico e magnético) pode ser encontrada em (Novo et al., 2008). Assumindo dependência temporal da forma  $e^{-i\omega t}$ , o sistema linear a ser discretizado é dado por (Novo et al., 2007):

$$\nabla \times \vec{H} - (i\omega\vec{\mu})^{-1} \nabla\psi - (\vec{\sigma} - i\omega\vec{\epsilon})(\vec{A} + \nabla\phi) = \vec{J}_s \quad (1a)$$

$$\nabla \times \vec{A} - i\omega\vec{\mu}\vec{H} = 0 \quad (1b)$$

$$\psi = \nabla \cdot \vec{A} \quad (1c)$$

$$-\nabla \cdot [(\vec{\sigma} - i\omega\vec{\epsilon})(\vec{A} + \nabla\phi)] = \nabla \cdot \vec{J}_s \quad (1d)$$

satisfazendo condições de contorno de Dirichlet. Em (1),

$\vec{H}$  é o vetor intensidade de campo magnético,  $\vec{A}$  é o potencial vetor magnético,  $\phi$  é o potencial escalar elétrico,  $\vec{J}_s$  é a densidade superficial de corrente elétrica e  $\psi$  é uma variável escalar auxiliar;  $\vec{\mu}$ ,  $\vec{\epsilon}$  e  $\vec{\sigma}$  são os tensores permeabilidade magnética, permissividade elétrica e condutividade elétrica, respectivamente.

A discretização por volumes finitos é realizada decompondo o domínio em dois conjuntos de células entrelaçadas, denominadas células primárias e células duais. Um par dessas células é mostrado na figura 1. A localização das variáveis na grade cilíndrica assegura as condições de continuidade dos campos na interface entre dois meios com materiais distintos. Desta forma, as componentes do potencial vetor  $\vec{A}$  são definidas sobre o ponto médio das arestas das células primárias, as componentes do vetor  $\vec{H}$  são definidas sobre o ponto médio das arestas das células duais, e os escalares  $\phi$  e  $\psi$  são definidos nos centros das células duais. A discretização é feita diretamente no sistema de coordenadas cilíndricas  $(\rho, \varphi, z)$  para evitar erros de aproximação de escada na geometria da ferramenta e do poço. As equações discretizadas são obtidas através dos seguintes passos:

1. Integrar (1a) sobre as faces das células duais ( $\tilde{S}_\rho$ ,  $\tilde{S}_\varphi$  e  $\tilde{S}_z$ );
2. Integrar (1b) sobre as faces das células primárias ( $S_\rho$ ,  $S_\varphi$  e  $S_z$ ) para obter as expressões das componentes de  $\vec{H}$ ;
3. Integrar (1c) sobre as células duais ( $\tilde{V}$ ) para obter as expressões de  $\psi$ ;
4. Integrar (1d) sobre as células duais ( $\tilde{V}$ ).

Observa-se que  $\vec{\mu}$ ,  $\vec{\epsilon}$  e  $\vec{\sigma}$  são aproximados por valores efetivos através de uma média ponderada sobre a área da face da célula (Novo et al., 2007).  $\nabla\phi$  são aproximados por diferenças finitas centrais.

Tendo em vista que as espiras da ferramenta direcional podem ter inclinação nos ângulos de azimute e elevação, a grade cilíndrica não é conforme a geometria da antena na direção longitudinal e, neste caso, uma aproximação de escada na direção  $z$  é necessária para modelar a geometria das antenas. Para reduzir requerimentos de memória, a discretização do domínio é uniforme na direção azimutal, e não-uniforme nas direções radial e longitudinal. O tamanho da célula é aumentado gradativamente, com o objetivo de minimizar as reflexões numéricas espúrias causadas pelo descasamento de impedâncias discretas entre células adjacentes de tamanhos diferentes (Taflove and Hagness, 2005). Cabe observar que ao aplicar a lei de Ampère sobre as superfícies das células duais é necessário calcular o fluxo de corrente através de cada superfície. Em ferramentas LWD convencionais, a fonte é uma espira perpendicular ao eixo da ferramenta (eixo  $z$ ), de forma que o fluxo de corrente dá-se apenas sobre a superfície dual  $\tilde{S}_\varphi$ . No caso de ferramentas LWD direcionais com espiras inclinadas, o fluxo de corrente dá-se através das superfícies duais  $\tilde{S}_\varphi$

e  $\tilde{S}_z$ . A formulação numérica em ambos os casos é a mesma, diferindo apenas em dois pontos: (i) cálculo do segundo membro da equação (1a) e (1d) quando o transmissor está inclinado; (ii) cálculo das tensões induzidas nas espiras receptoras, quando os receptores estão inclinados.

Para modelar poços excêntricos, onde a interface entre a parede do poço de perfuração e a formação não são conformes a grade cilíndrica, aplica-se uma técnica denominada por método dos volumes finitos conforme localmente (LC-FVM). Este algoritmo foi introduzido na literatura em (Mittra and Dey, 1999) para modelar interfaces dielétricas curvas em grades cartesianas do método das diferenças finitas no domínio do tempo (FDTD). Em (Teixeira et al., 2005), interfaces condutivas curvas em grades cilíndricas do FDTD também foram tratadas por esta técnica.

Após a discretização de (1), obtém-se um sistema linear esparso  $[C][X] = [B]$ , onde  $[C]$  é uma matriz complexa não-Hermitiana,  $[X]$  é o vetor incógnita, correspondendo ao  $\vec{A}$  e  $\phi$ , e  $[B]$  contém a representação discreta da fonte. O sistema linear (1) é resolvido iterativamente através do método dos gradientes biconjugados estabilizado. Detalhes da formulação e da discretização podem ser encontrados em (Novo et al., 2007).

## RESULTADOS NUMÉRICOS

A configuração básica da ferramenta LWD convencional e direcional está ilustrada na figura 2. O sistema de antenas reside dentro de um poço de perfuração de 5 polegadas de raio. As antenas receptoras estão localizadas a uma distância de 30 polegadas e 24 polegadas a partir da antena transmissora. As antenas tem raio igual a 4,5 polegadas. A ferramenta LWD direcional emprega antenas em espiras inclinadas, que assumem uma forma elíptica e, neste caso, o eixo menor das elipses é igual a 4,5 polegadas e o eixo maior aumenta com o ângulo de inclinação. Os parâmetros medidos pela ferramenta LWD são a taxa de amplitude (AR) e a diferença de fase (PD) entre as tensões induzidas nas antenas receptoras, definidas por:

$$AR = \frac{A_{r2}}{A_{r1}} \quad (2a)$$

$$PD = \phi_{r2} - \phi_{r1} \quad (2b)$$

onde  $A_{r1}$ ,  $A_{r2}$ ,  $\phi_{r1}$  e  $\phi_{r2}$  são a amplitude e a fase da tensão nas antenas receptoras, respectivamente.

### Validação - Formações Homogêneas

Para validar o algoritmo proposto, os resultados obtidos pelo FVM através de uma simulação em formações homogêneas são comparados com soluções pseudo-analíticas (Hue and Teixeira, 2006). A resposta elétrica da ferramenta LWD função do ângulo de inclinação das espiras receptoras está mostrada na figura 3. As duas espiras receptoras estão inclinadas na mesma direção. Para

o caso  $\theta_T = 0^\circ$ , utiliza-se uma grade computacional cilíndrica  $(N_\rho, N_\varphi, N_z) = (40, 30, 146)$ . O tamanho das células varia de 0,635 a 7,12 cm na direção radial e de 2,54 a 2,67 cm na direção longitudinal. Para o caso  $\theta_T = 45^\circ$ , utiliza-se uma grade  $(N_\rho, N_\varphi, N_z) = (40, 30, 748)$ . O tamanho das células na direção radial é o mesmo do caso anterior. Entretanto, na direção longitudinal, é necessário uma grade bem mais estreita para modelar corretamente a espira transmissora. O tamanho das células na direção longitudinal varia de 0,3175 a 0,3203 cm. O poço é preenchido por um fluido a base de água, cuja a condutividade é igual a 10 S/m e a formação tem condutividade igual 0,1 S/m. Os resultados mostram uma concordância excelente entre o FVM e a solução pseudo-analítica.

#### Efeito do Fluido de Perfuração

O efeito do fluido de perfuração na resposta elétrica da ferramenta LWD direcional está ilustrado na figura 4. Considera-se dois cenários: (i) formação homogênea com  $\sigma_{for} = 0,1$  S/m e formação homogênea com  $\sigma_{for} = 0,1$  S/m. O ângulo de inclinação das espiras receptoras é igual a  $30^\circ$ . O efeito do fluido não é significativo em formações com baixa condutividade (alta resistividade). Entretanto, em formações com alta condutividade o efeito do fluido é bastante pronunciado para fluidos com condutividades superiores a 0,01 S/m. Nota-se que o tamanho do poço utilizado nesta simulação não é muito grande (5 polegadas de raio).

#### Poços Excêntricos

Devido a efeitos gravitacionais e/ou vibrações mecânicas durante a perfuração, o eixo da ferramenta pode se deslocar dentro do poço. Para ilustrar qualitativamente o efeito da excentricidade na distribuição de campo, está mostrado na figura 5 a amplitude da componente  $\varphi$  do campo elétrico (V/m) na seção transversal (plano xy) do poço de perfuração, para um poço centralizado e um poço excêntrico com um deslocamento de 4 polegadas. Nesta simulação, considera-se uma ferramenta LWD convencional e um poço com 12 polegadas de raio. Utilize-se um poço maior, pois a variação na resposta da ferramenta devido aos efeitos da excentricidade é menor quando o poço é pequeno.

#### Efeito da Variação Azimutal

Durante a perfuração do poço a ferramenta também pode girar em torno do eixo e, no caso de ferramentas LWD direcionais com antenas em espiras inclinadas, a resposta da ferramenta varia em função do ângulo de azimute. Para investigar o efeito da variação do ângulo de azimute na resposta de ferramentas LWD direcionais em de poços excêntricos, realiza-se uma simulação em uma formação homogênea com condutividade igual a 0,1 S/m com a ferramenta deslocada de 2 polegadas do seu eixo. Novamente, o poço tem 12 polegadas de raios e é preenchido por um fluido de perfuração a base de água com condutividade igual a 10 S/m. Utiliza-se uma grade  $(N_\rho, N_\varphi, N_z) = (50, 30, 311)$ . O tamanho das células

varia de 0,635 a 21,28 cm na direção radial e de 2,54 a 2,55 cm na direção longitudinal. A antena transmissora é mantida perpendicular em relação ao eixo da ferramenta. A figura 6 mostra a resposta elétrica da ferramenta LWD direcional em função da inclinação dos receptores para os ângulos de azimute  $0^\circ$  e  $90^\circ$ . Observa-se que a variação azimutal é mais pronunciada na fase e aumenta com a inclinação dos receptores.

Investiga-se também o efeito da variação azimutal na resposta da ferramenta LWD durante uma perfuração direcional em formações não homogêneas. O domínio é discretizado utilizando 49 células na direção radial e 10 células na direção azimutal. Na direção longitudinal, o número de células é variável dependendo da profundidade do transmissor. Entretanto, em todas as posições do transmissor, o domínio na direção longitudinal é truncado a  $2\delta$  (constante de penetração) acima do receptor 1 e o domínio inferior a  $2\delta$  abaixo do transmissor. Utiliza-se um fluido de perfuração a base de óleo cuja condutividade é igual a  $\sigma = 5 \times 10^{-4}$  S/m. A condutividade das camadas inferior, intermediária e superior são 1,0, 0,01 e 1,0 S/m, respectivamente. A camada intermediária é um leito inclinado com 60 polegadas de espessura. O tamanho das células varia de 0,635 a 7,12 cm na direção radial e de 2,54 a 2,67 cm na direção longitudinal. Resultados da taxa de amplitude das ferramentas LWD para os ângulos de azimute  $0^\circ$  e  $90^\circ$  estão mostrados na figura 7. Como esperado, a ferramenta LWD convencional não apresenta sensibilidade azimutal. Nota-se também que o efeito da camada adjacente é mais pronunciado na simulação da ferramenta LWD direcional.

#### Formações com Leitos Anisotrópicos Inclinados

Para comparar as respostas obtidas pelas ferramentas LWD convencional e direcional em formações anisotrópicas, simula-se a perfuração direcional de um poço em uma formação anisotrópica não homogênea. Nesta simulação, a ferramenta LWD direcional possui a antena transmissora perpendicular ao eixo da ferramenta, assim como a primeira antena receptora. A segunda antena receptora tem uma inclinação de  $45^\circ$ . A discretização utiliza uma grade com  $(N_\rho, N_\varphi, N_z) = (80, 10, 350)$  células. O tamanho das células é uniforme na direção z, com  $\Delta z = 2,54$  cm e na direção radial varia de 0,635 a 5,03 cm. O poço é preenchido por um fluido a base de óleo, cuja condutividade é igual a  $\sigma = 5 \times 10^{-4}$  S/m. As condutividades perpendicular e paralela da camada inferior, intermediária e superior são dadas respectivamente por:  $\sigma_\perp = 0,5$  S/m e  $\sigma_\parallel = 2,0$  S/m;  $\sigma_\perp = 0,5$  S/m e  $\sigma_\parallel = 3,0$  S/m e  $\sigma_\perp = 0,5$  S/m e  $\sigma_\parallel = 4,0$  S/m. Uma ilustração deste cenário é dada na figura 8. Em seguida, realiza-se a mesma simulação em uma formação semelhante com taxa de anisotropia ( $k = \sqrt{\sigma_\perp/\sigma_\parallel}$ ) mais alta, onde os valores das condutividades perpendicular e paralela da camada inferior, intermediária e superior são dadas respectivamente por:  $\sigma_\perp = 0,5$  S/m e  $\sigma_\parallel = 2,0$  S/m;  $\sigma_\perp = 0,5$  S/m e  $\sigma_\parallel = 6,0$  S/m e  $\sigma_\perp = 0,5$  S/m e

$\sigma_{\parallel} = 10,0$  S/m. Todos os parâmetros de discretização são iguais aos da simulação anterior. A figura 9 ilustra as respostas das ferramentas LWD convencional e direcional. Pode-se observar que a ferramenta convencional possui uma sensibilidade à anisotropia do meio muito baixa, apresentando um perfil típico de formações homogêneas. Ao elevar a taxa de anisotropia, observa-se uma pequena variação na resposta da ferramenta. A resposta da ferramenta LWD direcional, entretanto, apresenta variações no perfil do poço, indicando que tipo de ferramenta é capaz de identificar as anisotropias presentes na formação.

## CONCLUSÕES

Desenvolveu-se um algoritmo por volumes finitos para simular e comparar a resposta elétrica de ferramentas LWD convencionais e direcionais operando em ambientes 3D complexos. O algoritmo mostrou-se robusto e flexível para modelar cenários desafiadores como, por exemplo, perfuração direcional em formações anisotrópicas não homogêneas e poços excêntricos. A flexibilidade do algoritmo também permitiu investigar os efeitos do fluido de perfuração e da variação azimutal na resposta elétrica de ferramentas de perfuração LWD convencionais e direcionais com antenas em espiras inclinadas.

## AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi parcialmente financiado pela CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Ensino Superior), SEG (*Society of Exploration Geophysicists*) e SPWLA (*Society of Petrophysicists and Well Log Analysts*). Recursos computacionais foram providos pelo OSC (*Ohio Supercomputer Center*) através do projeto PAS0061.

## REFERÊNCIAS

Hagiwara, T. et al., 2003, Effects of mandrel, borehole, and invasion for tilt-coil antennas : 58th Annual Technical Conference and Exhibition of SPE , **92**, 2600–2712.

Harber, E. and Ascher, U. M., 2006, Fast finite volume simulation of 3D electromagnetic problems with highly discontinuous coefficients: SIAM J. Sci. Comput. , **22**, no. 6, 1943–1961.

Hue, Y.-K. and Teixeira, F. L., 2006, Analysis of tilted-coil eccentric borehole antennas in cylindrical multilayered formations for well-logging applications : IEEE Antennas Propagat. , **54**, no. 4, 1058–1064.

Hue, Y.-K. and Teixeira, F. L., 2007, Numerical mode-matching for tilted-coil antennas in cylindrically layered anisotropic media with multiple horizontal beds : IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. , **45**, no. 8, 2451–2462.

Li, Q. et al., 2005, New directional electromagnetic tool for proactive geosteering and accurate formation evaluation while drilling : Proceedings of the SPWLA 46th Annual Logging Symposium , **92**, 2600–2712.

Mitra, R. and Dey, S., 1999, A conformal finite-difference time-domain technique for modeling cylindrical dielectric resonators: IEEE Trans. Microwave Theory Tech., **47**, no.9, 1737–1739.

Novo, M. S., Silva, L. C. and Teixeira, F. L., 2007, Finite volume modeling of borehole electromagnetic logging in 3-D anisotropic formations using coupled scalar-vector potentials: IEEE Antennas and Wireless Propag. Lett. , **6**, 549–552.

Novo, M. S., Silva, L. C. and Teixeira, F. L., 2008, Comparison of Coupled-Potentials and Field-Based Finite-Volume Techniques for Modeling of Borehole EM Tools: IEEE Geosci. and Remote Sens. Lett. , **5**, no.2, 209–211.

Sato, M. et al., 1994, Directional induction logging methods : Proceedings of the SPWLA 35th Annual Logging Symposium , **92**, 2600–2712.

Taflove, A. and Hagness, S., 2005, Computational Electrodynamics: The Finite-Difference Time-Domain Method: Artech House.

Teixeira, F. L. et al., 2005, Three-dimensional simulation of eccentric LWD tool response in boreholes through dipping formations : IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., **43**, no. 2, 257–268.

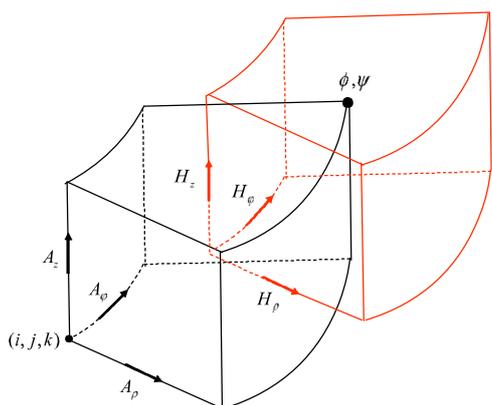


Figura 1: Célula elementar do esquema de grades entrelaçadas para a discretização espacial das incógnitas na grade cilíndrica.

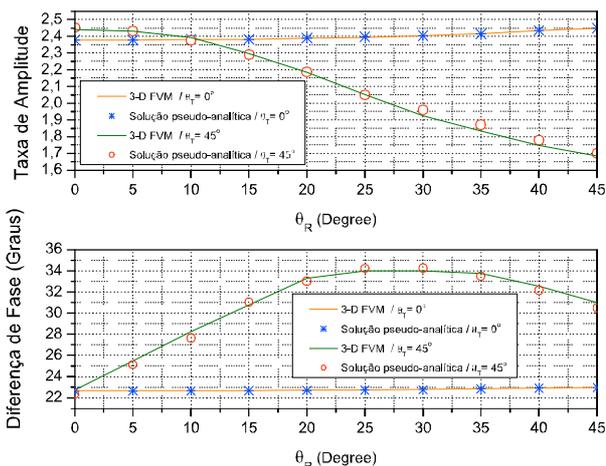


Figura 3: Resposta elétrica da ferramenta LWD direcional em formações homogêneas.

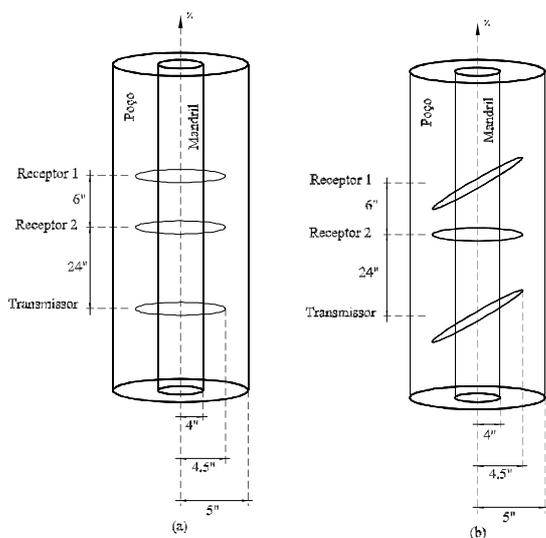


Figura 2: Configuração básica da ferramenta LWD. (a) Ferramenta convencional. (b) Ferramenta direcional com espiras inclinadas.

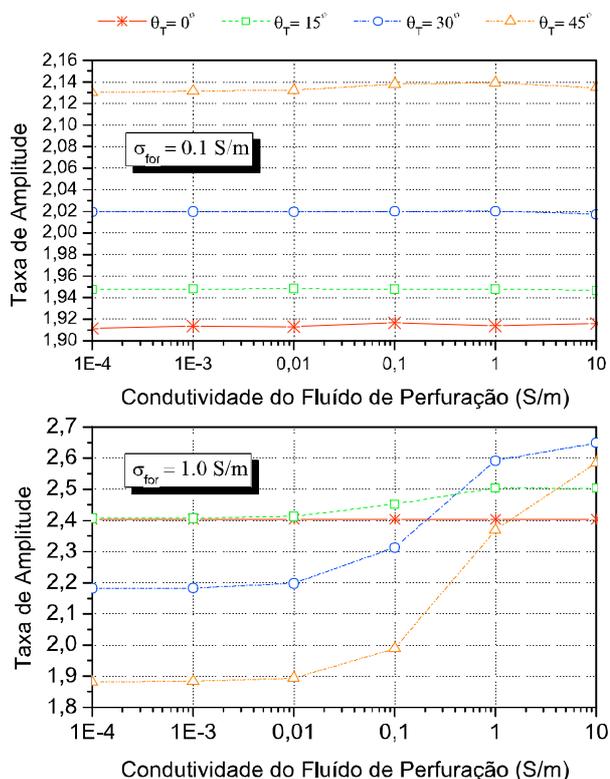


Figura 4: Efeito do fluido de perfuração na resposta elétrica de ferramentas LWD direcionais.

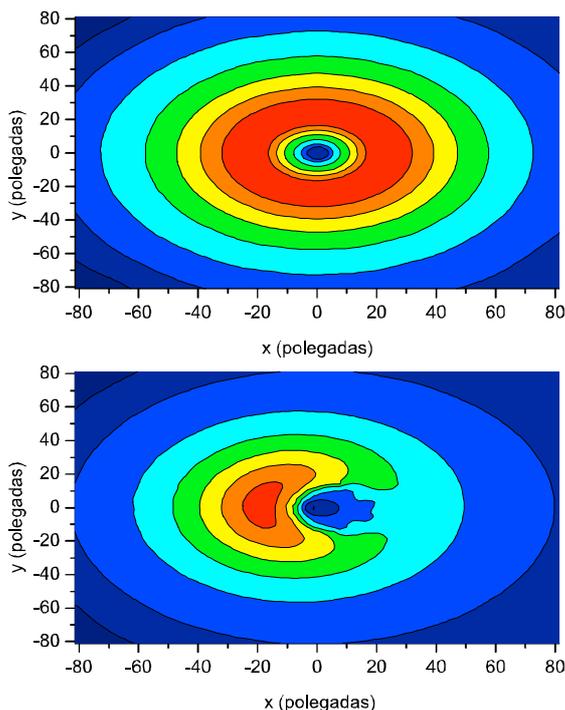


Figura 5: Distribuição de campo elétrico (componente  $\varphi$ ) no plano  $xy$  da grade cilíndrica.

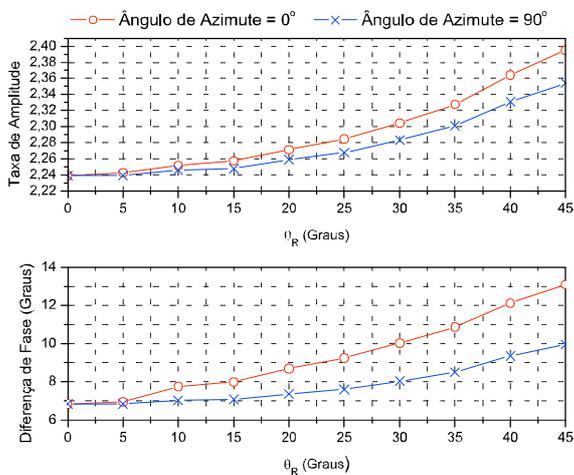


Figura 6: Resposta elétrica da ferramenta LWD direcional em poços excêntricos. O deslocamento da ferramenta no poço é igual a 2 polegadas.

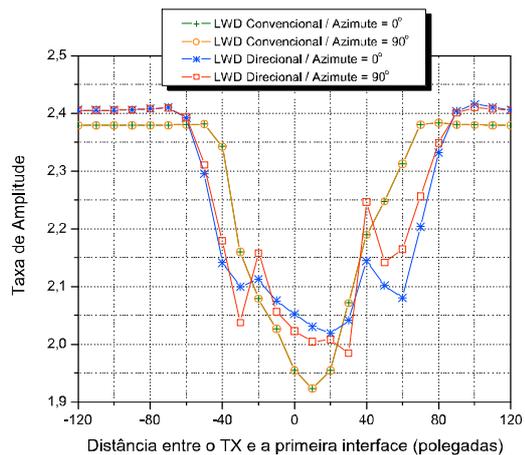


Figura 7: Resposta elétrica das ferramentas LWD em uma formação com leito inclinado.

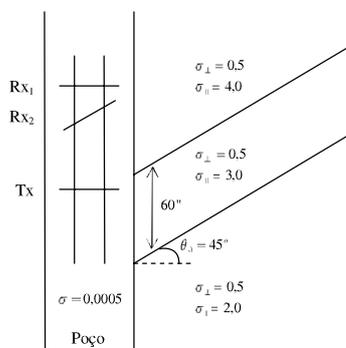


Figura 8: Ilustração de uma formação com leito anisotrópico.

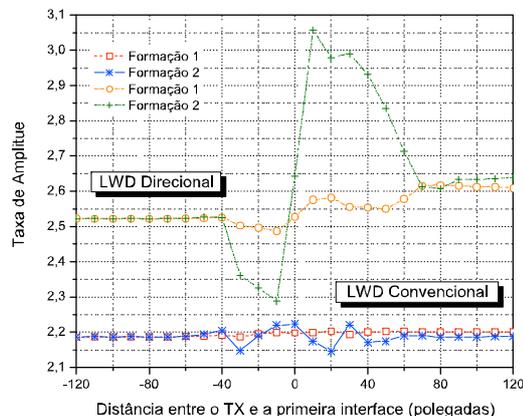


Figura 9: Resposta elétrica das ferramentas LWD convencional e direcional em uma formação com leito inclinado anisotrópico.