



Influência da geometria do relevo na aquisição de dados EMMF

Rimary Valera Sifontes (Programa de Pós-graduação em Geofísica/UFBA),
Hédison Kiuity Sato (Centro de Pesquisa em Geofísica e Geologia/UFBA)

Copyright 2014, SBGF - Sociedade Brasileira de Geofísica.
Este texto foi preparado para a apresentação no VI Simpósio Brasileiro de Geofísica, Porto Alegre, 14 a 16 de outubro de 2014. Seu conteúdo foi revisado pelo Comitê Técnico do VI 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

Fatores, meramente devidos à geometria do relevo, afetam, significativamente, os dados eletromagnéticos multifrequência (EMMF), pois alguns parâmetros de aquisição se afastam do modelo ideal. Considerou-se dois casos, representando possíveis situações do relevo inclinado nos levantamentos eletromagnéticos no domínio da frequência: (i) inclinação do eixo do dipolo transmissor e (ii) não horizontalidade da superfície do terreno. A análise desses casos, mediante diagramas de Argand e curvas do parâmetro de polarização aparente em função do número de indução aparente, permitiu mostrar a influência da geometria do relevo, cujo entendimento tem consequência prática imediata na aquisição, processamento e interpretação de dados EMMF, ficando implícita a necessidade da introdução de correções topográficas, de natureza meramente geométrica.

INTRODUÇÃO

Os métodos eletromagnéticos a multifrequência têm sido amplamente estudados nos últimos anos, demonstrando sua viabilidade na exploração de petróleo. Dias (1968), Sato (1979), Dias et al. (2005) e Dias et al. (2007) impulsionaram a técnica no domínio da frequência com o objetivo de testar a detecção de hidrocarbonetos e o monitoramento dos efeitos da invasão de fluidos relacionados com a recuperação avançada de petróleo.

Um dos maiores desafios decorrente desses trabalhos foi a investigação dos alvos a grandes profundidades, até da ordem do quilômetro. Como o método eletromagnético utilizado é de fonte artificial, tornou-se, necessário, estender tanto a separação transmissor-receptor como, concomitantemente, reduzir a frequência de investigação, e ampliar a magnitude da fonte, no caso, magnética. Sendo assim, a separação transmissor-receptor foi estendida até 10 km, e, fixada no terreno, a fonte magnética foi construída com uma bobina de uma volta, quadrada, com 600 m de lado.

Com essas dimensões, o relevo da zona investigada não deve ser mais ignorado, tornando-se inadequado manter a hipótese do terreno plano e horizontal e a bobina

transmissora formada por um quadrado perfeito. Desta maneira, variações do campo eletromagnético (EM) em relação ao modelo do semiespaço podem advir de três fatores: (i) contribuição da presença ou não do condutor acima e abaixo do plano contendo o transmissor e receptor, (ii) efeitos geométricos da topografia criando inúmeros planos transmissor-receptor na medida em que o receptor é instalado nas diversas posições, e (iii) a bobina transmissora não tem uma geometria simples tipo quadrado ou círculo, devido à disposição dos fios elétricos sobre um terreno irregular (Moumoni, 2010).

Neste contexto, o presente trabalho apresenta um estudo do efeito do relevo causado por fatores geométricos, de primeira ordem, em dados EMMF, considerando uma fonte dipolar magnética, e os modelos homogêneo e de duas camadas, com variações dos parâmetros de espessura da primeira camada d , contraste de condutividade $K = \sigma_1/\sigma_2$ e separação transmissor-receptor ρ .

GEOMETRIA UTILIZADA

A Figura 1 apresenta os elementos geométricos que serão utilizados. Dois sistemas de coordenadas cartesianas xyz e $x'y'z'$ tais que seus eixos x e x' interceptam-se no ponto A , e z e z' interceptam-se no ponto C . O plano xy é horizontal enquanto o plano $x'y'$ representa o plano médio do terreno, com o centro da bobina transmissora em C , e a bobina receptora, em A , mede o campo magnético na direção x . Os ângulos α e β são, respectivamente, o azimute e o mergulho do plano $x'y'$ referenciado ao sistema xyz .

Seguindo Moumouni (2010), considerando um dipolo magnético \vec{M} transmissor em C , com azimute α_M e mergulho $\pi/2 - \beta_M$, ele pode ser representado por

$$\vec{M} = |M| \begin{bmatrix} \sin \beta_M \cos \alpha_M \\ \sin \beta_M \sin \alpha_M \\ \cos \beta_M \end{bmatrix}.$$

O campo magnético no ponto A é dado, então, por

$$\vec{H} = \vec{T}^{-1} \vec{W} \vec{T} \vec{M},$$

onde \vec{T} é a matriz de transformação do sistema xyz para $x'y'z'$:

$$\vec{T} = \begin{pmatrix} l_{x'} & m_{x'} & n_{x'} \\ l_{y'} & m_{y'} & n_{y'} \\ l_{z'} & m_{z'} & n_{z'} \end{pmatrix},$$

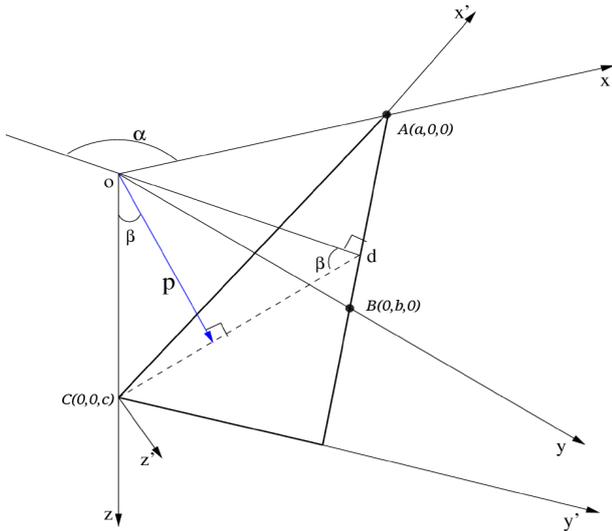


Figura 1: Plano inclinado regional e sistema de coordenadas (Moumouni, 2010)

sendo $l_{i'}, m_{i'}, n_{i'}$ os cossenos diretores do eixo i' ($i' = x', y', \text{ou } z'$), em relação ao sistema xyz , e \widetilde{W} é a matriz formada por nove funções que descrevem, no sistema $x'y'z'$, os três componentes do campo magnético devido aos três componentes da fonte dipolar magnética:

$$\widetilde{W} = \begin{bmatrix} W_{x'x'} & W_{y'x'} & W_{z'x'} \\ W_{x'y'} & W_{y'y'} & W_{z'y'} \\ W_{x'z'} & W_{y'z'} & W_{z'z'} \end{bmatrix}.$$

Vale destacar que, em princípio, esta formulação não impõe restrições sobre a geometria dos corpos condutores abaixo do plano $x'y'$. Neste trabalho desenvolveu-se um algoritmo usando a resposta do modelo de n -camadas planas e paralelas para o cálculo do campo magnético horizontal, ou seja, estabeleceu-se as nove funções da matriz \widetilde{W} , com base na formulação contida em Ward e Hohmann (1987).

MODELO HOMOGÊNEO

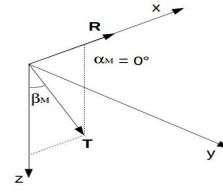
Primeiramente, como teste do programa de computador desenvolvido para o caso geral de n -camadas, reproduziu-se os resultados obtidos por Moumouni (2010). Além da comparação com os dados modelados para o caso homogêneo estudado por Moumouni (2010), com base nos valores complexos do campo magnético como funções da frequência ou número de indução, os dados estão apresentados na forma de diagramas de Argand das partes real e imaginária da razão Z/Z_0 . Foram estudados dois casos, considerando as seguintes hipóteses:

Caso 1: Dipolo transmissor inclinado

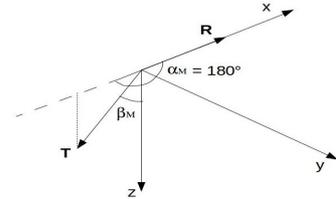
Em média, supõe-se que (i) a superfície é tida horizontal (azimute do terreno $\alpha = 0^\circ$, mergulho do terreno $\beta = 0^\circ$), e (ii) existem variações topográficas localizadas ao longo da bobina transmissora, determinando valores não

nulos para α_M e β_M , conforme esquematizado na Figura 2.

(a) $\alpha_M = 0^\circ$



(b) $\alpha_M = 180^\circ$



(c) $\alpha_M = 90^\circ$

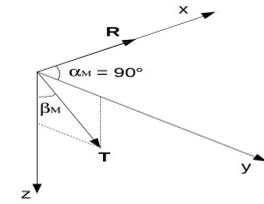


Figura 2: Dipolo transmissor inclinado em três ângulos azimutais

Foram criados diagramas de Argand da razão entre impedâncias mútuas, Z/Z_0 , apresentados na Figura 3.

Interessante destacar a visão inteiramente nova, mostrando, especialmente nos casos em que $\alpha_M = 0^\circ$ (Figura 3(a)) ou 180° (Figura 3(b)), que, mesmo para $\beta_M = 2^\circ$ (pequeno ângulo), existe um desvio substancial na parte real da impedância mútua, comparado com do arranjo PERP ideal (Frischknecht et al., 1991). Além disso, fica claro que, caso $\alpha_M = 90^\circ$, os desvios na verticalidade do eixo da bobina transmissora pouco alteram os resultados, mesmo para ângulos $\beta_M = 10^\circ$ (Figura 3(c)).

Caso 2: Terreno inclinado com dipolo transmissor vertical

Neste caso, em média, supõe-se que (i) a superfície é inclinada ($\alpha \neq 0^\circ, \beta \neq 0^\circ$), e (ii) localmente, existem variações do relevo que fazem a bobina transmissora comportar-se como um dipolo magnético vertical ($\alpha_M = 0^\circ, \beta_M = 0^\circ$), conforme mostrado na Figura 4. Para este caso, também foram construídos diagramas de Argand, para valores de ângulo de azimute de $\alpha = 0^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ e 150° . A Figura 5 apresenta os diagramas de Argand obtidos para os casos em que $\alpha = 0^\circ$ e 150° . Observa-se que as curvas para as diferentes inclinações β do terreno se afastam do padrão sem inclinação, representado por $\beta = 0^\circ$. Também, observa-se

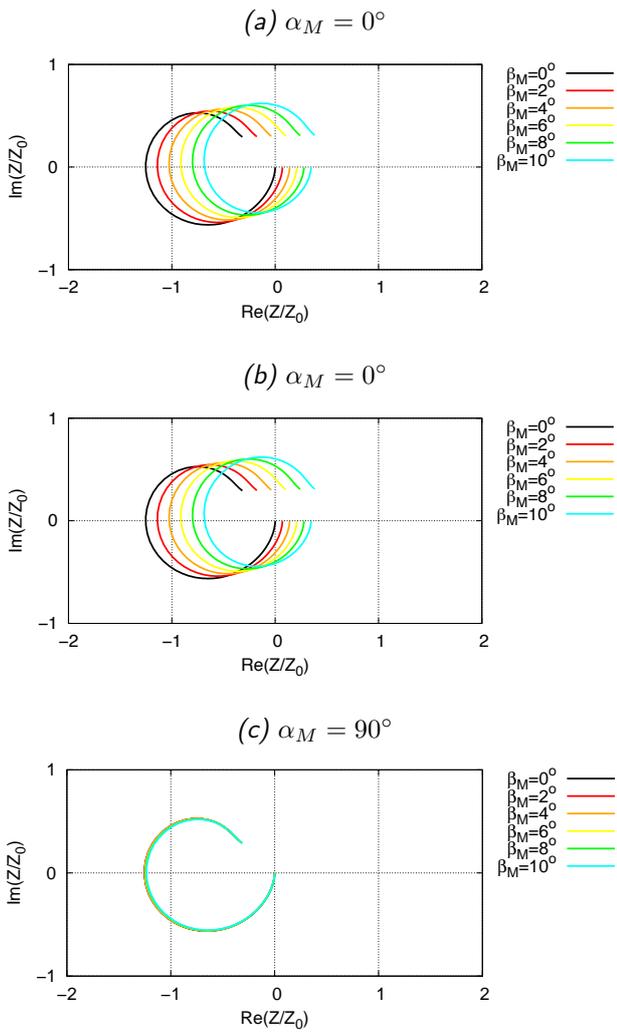


Figura 3: Diagramas de Argand da impedância mútua para um modelo homogêneo com dipolo transmissor inclinado.

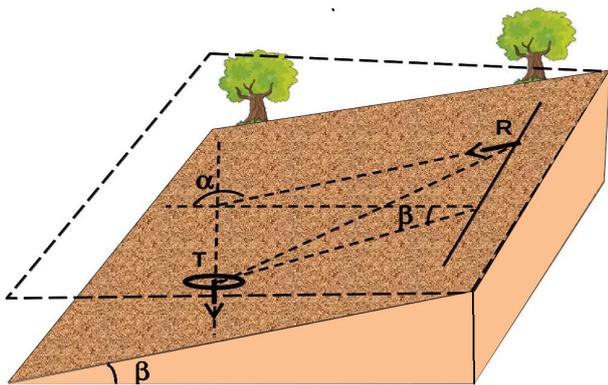


Figura 4: Dipolo magnético transmissor e receptor em altitudes distintas.

que uma inclinação do terreno de $\beta = 5^\circ$, relativamente pequena, afeta consideravelmente o resultado.

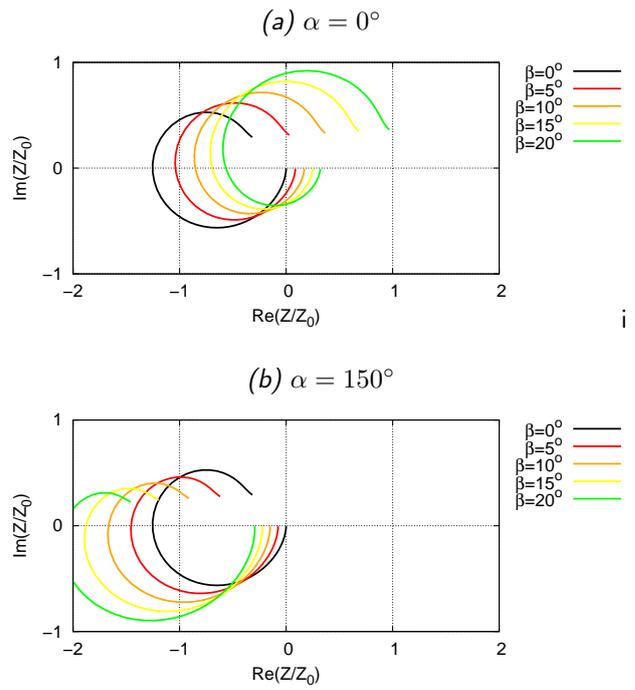


Figura 5: Diagramas de Argand da impedância mútua para um modelo homogêneo considerando um terreno inclinado com dipolo transmissor vertical.

MODELO DE DUAS CAMADAS: EFEITO DA INCLINAÇÃO DO DIPOLO TRANSMISSOR

A Figura 6 mostra o modelo geral para n -camadas, em que ρ representa a separação transmissor-receptor, σ_1 , h_i e Z_i , a condutividade, a espessura e a distância vertical da base da i -ésima camada, respetivamente. O receptor encontra-se sobre a superfície de um plano horizontal ($\alpha = 0^\circ$, $\beta = 0^\circ$). Especificamente, considera-se, no sistema $x'y'z'$, um semi-espaço com duas camadas horizontais homogêneas e isotrópicas, com o transmissor localizado na origem desse sistema, o qual coincide com o topo da primeira camada.

Usando as considerações similares ao modelo homogêneo já analisado, estudou-se: (i) o comportamento da razão entre as impedâncias mútuas na forma de diagramas de Argand, e (ii) as razões entre as impedâncias mútuas invertidas na forma de curvas do parâmetro de polarização aparente em função do número de indução aparente, conceituado por Dias (1968), usando o arranjo PERP.

A Figura 7 representa o comportamento dos diagramas de Argand para variações da espessura da primeira camada $d = 12,5$ m e $d = 100$ m, para $\alpha_M = 180^\circ$. Considerando a camada fina, $d = 12,5$ m, as curvas para inclinações de $\beta = 8^\circ$, 10° , no caso de $\alpha_M = 180^\circ$, apresentam um comportamento peculiar, como pode ser observado na Figura 7(a). Para uma camada com espessura maior $d = 100$ m (Figura 7(b)), o efeito da

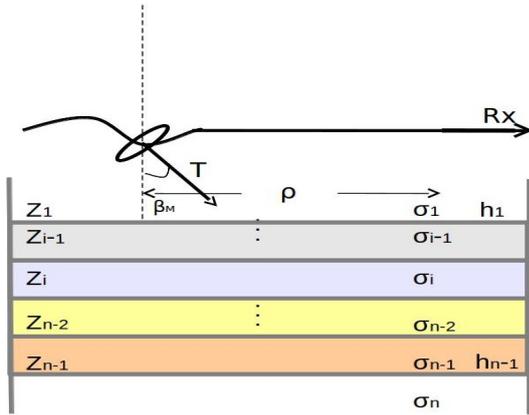


Figura 6: Modelo de n -camadas de um meio homogêneo e isotrópico, com dipolo magnético transmissor no sentido do receptor.

inclinação do eixo do dipolo transmissor é mais evidente e, neste caso, as curvas reproduzem os resultados do modelo homogêneo.

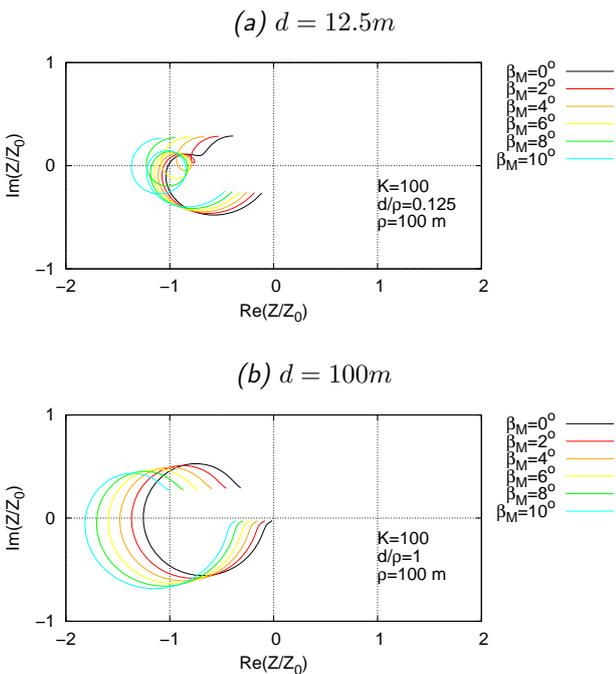


Figura 7: Diagramas de Argand para um terreno inclinado com dipolo transmissor vertical, modelo de duas camadas.

As curvas do parâmetro de polarização $U = \Im(\sigma)/|\sigma|$ aparente em função do número de indução θ aparente (Figura 8) mostraram que valores de $\beta_M = 1^\circ$ afetam os resultados, de modo que essas curvas se afastam do comportamento para o caso de $\beta_M = 0^\circ$, demonstrando assim, a influência do efeito do relevo para pequenos valores da inclinação do dipolo transmissor.

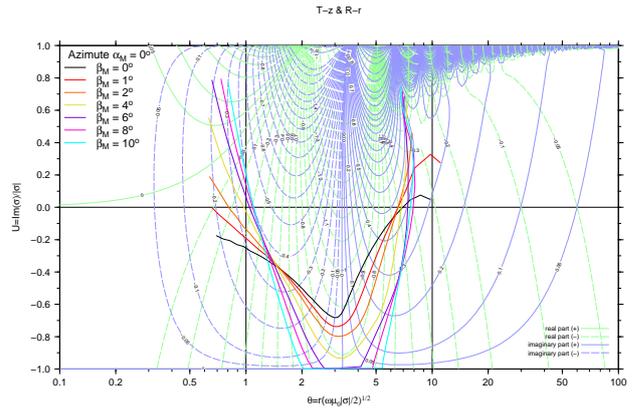


Figura 8: Curvas do parâmetro de polarização U aparente como função do número de indução θ aparente de modelo de duas camadas com efeito do relevo, contraste de condutividade $K = \sigma_2/\sigma_1 = 100$ e razão $d/\rho = 0.25$, para $\alpha_M = 0^\circ$.

MODELO DE DUAS CAMADAS: EFEITO DA INCLINAÇÃO DO TERRENO COM TRANSMISSOR VERTICAL

Neste modelo, considera-se o caso de um terreno plano e inclinado, conforme mostrado na Figura 9. O eixo do transmissor encontra-se verticalizado ($\alpha_M = 0^\circ$, $\beta_M = 0^\circ$), o receptor a uma altura diferente (α e β variando), e o modelo do semi-espaço é o estratificado com duas camadas. A Figura 10 mostra o comportamento dos di-

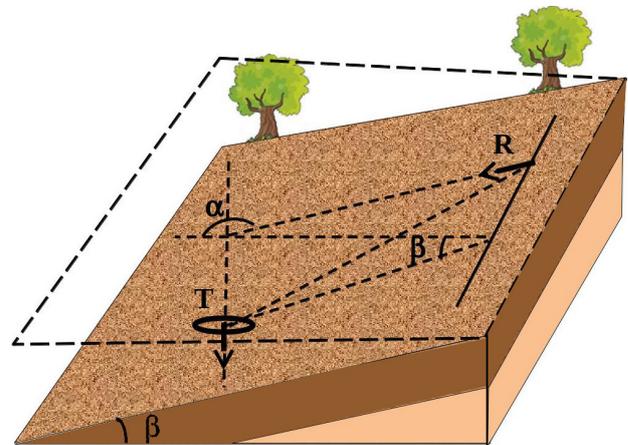


Figura 9: Modelo de duas camadas com inclinação do terreno e dipolo transmissor vertical.

agramas de Argand para uma espessura da primeira camada $d = 25$ m. Pode-se observar que a forma das curvas varia com ângulos de inclinação do terreno. Ainda, na Figura 10, observa-se que as curvas deslocam-se para a direita quando $\alpha = 0^\circ$, e, para a esquerda, no caso em que $\alpha = 150^\circ$. Outros resultados, obtidos para espessuras de $d = 50$ m e $d = 100$ m, mostraram que o aumento da espessura da primeira camada permite uma

melhor resolução das curvas com diferentes inclinações do terreno (β).

Na Figura 11, as curvas do parâmetro de polarização U aparente como função do número de indução θ aparente mostraram, também, fortes desvios em relação à curva referente a $\beta = 0^\circ$, mesmo para o ângulo tão pequeno como $\beta = 1^\circ$.

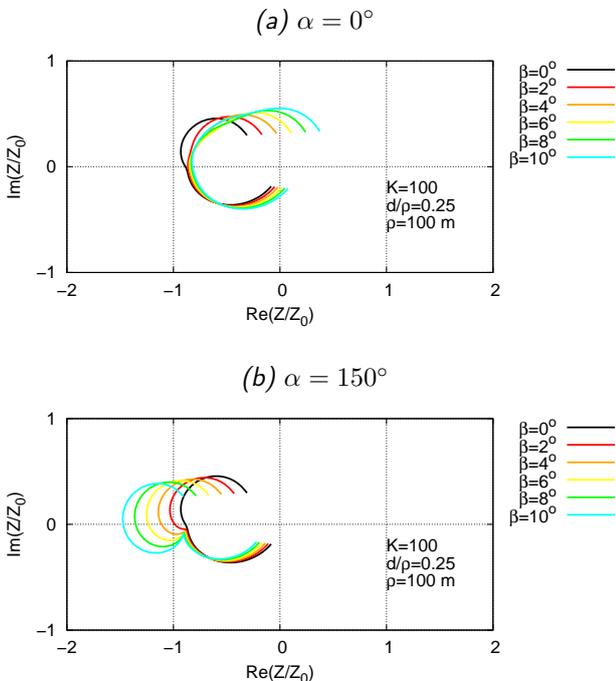


Figura 10: Diagramas de Argand considerando efeitos da inclinação do terreno com dipolo transmissor vertical, modelo de duas camadas.

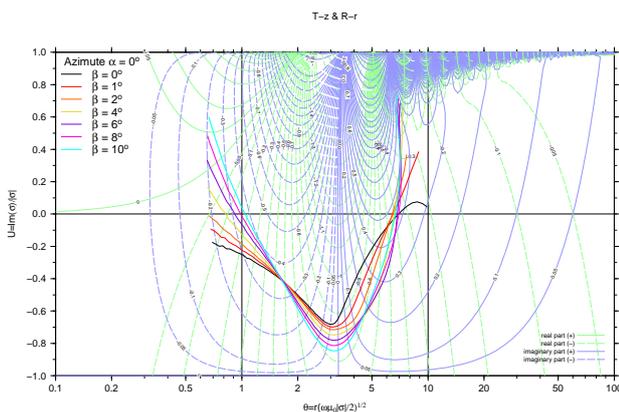


Figura 11: Curvas do parâmetro de polarização U aparente como função do número de indução θ aparente de modelos de duas camadas com efeito do relevo, contraste de condutividade $K = \sigma_2/\sigma_1 = 100$ e razão $d/\rho = 0.25$, para $\alpha = 0^\circ$.

CONCLUSÕES

Os efeitos da geometria do relevo foram analisados em dois casos: (i) inclinação do dipolo transmissor e (ii) inclinação do terreno com dipolo transmissor vertical, concluindo-se o seguinte:

- Os diagramas de Argand destacam que pequenas variações do ângulo de inclinação do transmissor e do terreno da ordem de 2° afetam os resultados.
- Os diagramas de Argand servem para evidenciar melhor o efeito do relevo, mostrando uma diferença notória entre as curvas para o modelo homogêneo e o modelo de duas camadas.
- As curvas do parâmetro de polarização U aparente em função do número de indução θ aparente mostraram que o efeito do relevo é evidente para inclinações do dipolo transmissor (β_M) ou inclinações do terreno (β) da ordem de 1° .

Estes resultados parciais têm consequência prática imediata no processamento e interpretação de dados EMMF. Assim, fica implícita a necessidade da introdução de correções topográficas, de natureza meramente geométrica, e, por conseguinte, a realização de um rigoroso controle altimétrico nas posições do receptor e do cabo elétrico que constitui a bobina transmissora, durante a fase de aquisição dos dados.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq (INCT-Geofísica de Petróleo) pelo financiamento e apoio à pesquisa. Rimary Valera agradece ao CNPq pela bolsa de doutorado, ao Centro de Pesquisa em Geofísica e Geologia da Universidade Federal da Bahia (CPGG-UFBA) pela disponibilidade das instalações usadas durante o desenvolvimento da pesquisa e ao doutorando em Geofísica Eng. Zoukneri I. Moumouni pelas dicas, sugestões e orientações.

REFERÊNCIAS

- Dias, C. A. (1968) A non-grounded method for measuring induced electrical polarization and conductivity, Ph. D. Thesis, University of California, Berkely.
- Dias, C. A.; Sato, H. K. e Lima, O. A. L. (2005) Multi-frequency EM method for hydrocarbon detection and for monitoring fluid invasion during enhanced oil recovery, In: *75th Ann. Internat. meet., Soc. Expl. Geophys.*, vol. 1, pp. 602-605, Houston, Texas.
- Dias, C. A.; Lima, O. A. L.; Sato, H. K. e Moraes, J. A. C. (2007) Hydrocarbon detection and reservoir imaging during enhanced oil recovered using an inductive EM multi-frequency method, In: *10^o Congr. Intern. da SBGF, Rio de Janeiro*.

- Frischknecht, F. C.; Victor F. Labson; Brian R. Spies e Walter L. Anderson (1991) Profiling methods using small sources, In: M. N. Nabighian, ed., *Electromagnetic methods in applied geophysics, vol. 2, Application, Part A and B*, cap. 3, pp. 105-270, Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, Oklahoma.
- Moumouni, I. Z. (2010) Estudos dos efeitos topográficos nos dados eletromagnéticos multifrequência e emprego nos dados EM do campo de Araçás, Dissert. de Mestrado, Universidade Federal da Bahia, Salvador, Bahia, Brasil.
- Sato, H. K. (1979) Método eletromagnético para interpretação de polarização induzida e resistividade, usando o protótipo de um sistema a multifrequência, Dissert. de Mestrado, Universidade Federal da Bahia, Salvador, Brasil.
- Ward, S. H. e Hohmann, G. W. (1987) Electromagnetic Theory for geophysical applications, In: M. N. Nabighian, ed., *Electromagnetic methods in applied geophysics, vol. 1, Theory*, pp. 131-311, Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, Oklahoma.