



## Uma nova formulação para detecção de IP em dados Eletromagnéticos no Domínio da Frequência: Modelo de duas camadas.

Rimary Valera Sifontes\* (Centro de Pesquisa em Geofísica e Geologia/UFBA),

Hédison Kiuity Sato (Centro de Pesquisa em Geofísica e Geologia/UFBA)

Copyright 2019, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica.

This paper was prepared for presentation during the 16th International Congress of the Brazilian Geophysical Society held in Rio de Janeiro, Brazil, 19 to 22 August, 2019.

Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the 16th International Congress of the Brazilian Geophysical Society and do not necessarily represent any position of the SBGf, its officers or members. Electronic reproduction or storage of any part of this paper for commercial purposes without the written consent of the Brazilian Geophysical Society is prohibited.16.

### Abstract

Based on the mutual impedance ratio for perpendicular coil configuration on a homogeneous and isotropic half-space, a complex function is deduced which is intrinsically zero. Its application to two-layered models, with the first and second layer having polarization or not, demonstrated that the amplitude and phase of this complex function vary with the frequency, such that its shape and values depend on the sequence of the layer conductivities and the polarization presence. Among the most important results, the two-layered model with a first conductive and polarizable layer is remarkable, which shows that the amplitude and phase curves allow to distinguish the effects of pure and IP layers. The phase show a transition from positive to negative values in models presenting polarization and conductivity contrast  $K=0,1$ , and, negative values for the entire frequency range in the non-polarizable models and conductivity contrast  $K=10$ .

### Introdução

O método de Polarização Elétrica Induzida (IP) é o método geofísico de exploração comumente utilizado para medir a variação da condutividade elétrica das rochas com a frequência, e vem sendo empregado principalmente para exploração de metais e de água subterrânea (Telford et al., 1990). No presente, é possível medir tanto no domínio da frequência, quanto no domínio do tempo, e também determinar a resistividade complexa (amplitude e fase) com ambos os métodos. O método IP tem sido aplicado usando arranjos dipolo-dipolo em contato direto com a terra. O dipolo transmissor introduz uma corrente elétrica para dentro da terra e o dipolo receptor mede o valor ou decaimento do potencial elétrico em diferentes posições. No domínio da frequência, dois valores, ou mais, de frequência são usados simultaneamente, por exemplo 0,3 Hz e 5,0 Hz (McPhar, 1965). O efeito é medido através da variação de impedância aparente da terra com a frequência. No entanto, o método IP é um método custoso e lento (Dias, 1968).

Alguns investigadores têm desenvolvido estudos utilizando sistemas não aterrados para a medida do efeito IP (Barringer, 1965; Bhattacharyya, 1964). No entanto, as bases do método eletromagnético a multifrequência, para estudar

o efeito de polarização induzida e a resistividade, foram lançadas por Dias (1968), demonstrando a possibilidade de distinguir o efeito de polarização induzida dos efeitos devidos ao contraste de resistividade, considerando uma estrutura de duas camadas horizontais. Os estudos iniciados por (Dias, 1968) foram estendidos por (Sato, 1979), quem propôs um novo esquema, de natureza quantitativa, para construir pseudo-seções de resistividade versus profundidade verdadeira, aplicando-o a dados eletromagnéticos multifrequência (EMMF) reais em uma província de exploração mineral. Na literatura existem muitos trabalhos sobre a validação da possibilidade de extrair parâmetros IP de dados de campo de sondagem magnetotélurica (MT e TEM). Wu e Wang (1978) estudaram a possibilidade de investigação IP usando campos eletromagnéticos naturais baseado na análises de sinais MT. Os autores pensaram que a chave está na técnica de como extrair o efeito IP dos resultados MT. Não entanto, Luo et al. (2003) acharam que é muito difícil extrair a anomalia IP por estar submergida na forte anomalia EM de dados MT que é muito maior em magnitude que a anomalia IP. Motivo pelo qual as perspectivas de aplicação prática de IP de fontes naturais não são otimistas. De esta forma, desde 2007, investigadores chineses tem tratado de obter informação IP de sinais audio-magnetotéluricas de fonte controlada (CSAMT) (Yue et al., 2007).

Neste trabalho, criou-se um critério para separar o efeito IP do efeito do simples contraste de condutividade de camadas, mediante o estudo de uma função complexa dada em termos da variação da impedância mútua entre as bobinas transmissora e receptora com a frequência e a separação transmissor-receptor (T-R). O estudo foi feito considerando modelos homogêneo e dois camadas e os resultados são mostrados em forma de curvas de amplitude e fase da função complexa.

### Formulação teórica do problema

Dando continuidade aos trabalhos de Dias (1968) e Sato (1979), nesta pesquisa propõe um tipo de equação de continuidade em termos da variação impedância mútua aparente com a frequência e a separação T-R, para o estudo do efeito de polarização elétrica induzida em dados eletromagnéticos multifrequência e, com base na resposta de impedância mútua para o caso de um arranjo PERP-A, formado por um dipolo magnético transmissor verticalizado e um receptor horizontal. A configuração PERP-A vem sendo utilizada nos levantamentos eletromagnéticos do Centro de Pesquisa em Geofísica e Geologia (CPGG/UFBA), com o sistema eletromagnético multifrequência.

O conceito de impedância mútua entre as bobinas transmissora e receptora pode ser traduzido na forma de uma

razão entre impedâncias mútuas  $Z/Z_0$ , em que  $Z_0$  refere-se à situação no vácuo. A razão entre as impedâncias mútuas é importante pois ela é uma função independente da intensidade da fonte magnética, assim como remove o efeito da redução natural do campo magnético, ao se aumentar a separação entre o transmissor e o receptor (T-R). Com base em (Ward e Hohmann, 1987), a impedância mútua para um arranjo PERP-A é definida como:

$$Z/Z_0 = k^2 \rho^2 \left[ I_1 \left( \frac{ik\rho}{2} \right) K_1 \left( \frac{ik\rho}{2} \right) - I_2 \left( \frac{ik\rho}{2} \right) K_2 \left( \frac{ik\rho}{2} \right) \right], \quad (1)$$

onde  $\rho$  é a separação T-R,  $I_1(\cdot)$ ,  $I_2(\cdot)$ ,  $K_1(\cdot)$  e  $K_2(\cdot)$  são funções modificadas de Bessel de 1ª e 2ª espécie, ordens 1 e 2 (Erdélyi, 1956).

Na equação 1,  $Z/Z_0$  pode ser escrito como uma função de  $k\rho$ , isto é:

$$Z/Z_0 = \text{função}(k\rho) = F(k\rho), \quad (2)$$

onde

$$k\rho = \theta[(1+U)^{1/2} - i(1-U)^{1/2}], \quad (3)$$

e o parâmetro de polarização é definido como:

$$U = \frac{\Im(\sigma)}{|\sigma|}, \quad (4)$$

e, em condições quase estáticas,  $k$  é definido como:

$$k = \sqrt{-i\omega\mu\sigma}. \quad (5)$$

Tomando derivadas parciais em relação a  $\rho$  e  $\omega$  da equação 2, tem-se:

$$\frac{\partial}{\partial \rho} \left( \frac{Z}{Z_0} \right) = k \frac{\partial F}{\partial(k\rho)}, \quad (6)$$

$$\frac{\partial}{\partial \omega} \left( \frac{Z}{Z_0} \right) = \frac{k\rho}{2\omega} \frac{\partial F}{\partial(k\rho)}. \quad (7)$$

Da equação 7 obtém-se:

$$\frac{\partial F}{\partial(k\rho)} = \frac{2\omega}{k\rho} \frac{\partial}{\partial \omega} \left( \frac{Z}{Z_0} \right). \quad (8)$$

Assim, substituindo a equação 8 na equação 6:

$$\frac{\partial}{\partial \rho} \left( \frac{Z}{Z_0} \right) = \frac{2\omega}{\rho} \frac{\partial}{\partial \omega} \left( \frac{Z}{Z_0} \right). \quad (9)$$

A equação 9 mostra a interdependência entre as derivadas em relação a  $\rho$  e  $\omega$  considerando o caso do semi-espaço homogêneo e isotrópico. Daí, então, sugerir-se a função

$$g(k\rho) = \frac{\rho}{2\omega} \frac{\partial}{\partial \rho} \left( \frac{Z}{Z_0} \right) - \frac{\partial}{\partial \omega} \left( \frac{Z}{Z_0} \right), \quad (10)$$

complexa por sua natureza, e que se anula no caso do semi-espaço homogêneo e isotrópico, como será constatado mais adiante.

Espera-se, então, que a função  $g(k\rho)$  não se anule, por exemplo, quando o IP estiver presente e serão necessárias investigações quando o semi-espaço for heterogêneo sem polarização, por exemplo, formado por  $n$ -camadas horizontais, para o qual existe uma solução analítica.

Para comportar o caso da polarização elétrica induzida, a condutividade real no modelo de Ward e Hohmann (1987) na equação 5 foi transformada em uma grandeza complexa. Neste sentido, o cálculo da função de condutividade na camada polarizável foi feito mediante o uso do modelo de Dias (2000):

$$\rho = \rho_0 \left[ 1 - m \left( 1 - \frac{1}{1 + (i\omega\tau_W)^{1/2}} \right) \right] \quad (11)$$

em que  $\rho$  representa a resistividade na camada polarizável,  $\rho_0$  é o valor à frequência nula (grandeza real) de  $\rho$ ,  $m$  é a cargabilidade (Seigel, 1959a; Seigel, 1959b; Wait, 1959a), e o parâmetro  $\tau_W$  é definido em Dias (2000).

## Resultados

Os resultados obtidos para modelos de duas camadas com contrastes de condutividade  $K = \sigma_2/\sigma_1$  apresentando polarização na primeira ou na segunda camada são mostrados nas próximas seções.

### Modelos de duas camadas com contraste de condutividades $K = 1$

Nesta seção apresentam-se resultados para modelos de duas camadas com condutividades iguais  $\sigma_1 = \sigma_2 = 0,002$  S/m, espessura da primeira camada  $d_1 = 100$  m, separações T-R de 500 e 1000 m, e parâmetros de polarização  $m = 0,2$  e  $\tau = 0,9$ , comparados a um modelo de duas camadas apresentando um simples contraste de condutividade (sem polarização nas camadas).

#### Primeira camada polarizável

Nas Figuras 1(a) e 1(b), as curvas preta e vermelha representam a amplitude e fase para o caso de um modelo sem polarização nas camadas, enquanto que as curvas azul e verde representam a amplitude e fase para o caso de um modelo com polarização na primeira camada. A curva preta esta sobreposta ao eixo horizontal já que os valores são muito mais próximos de zero. Já a curva vermelha apresenta valores positivos da fase. Na Figura 1(b), para o caso de  $\rho = 1000$  m, os valores da amplitude são maiores, comparado ao caso de  $\rho = 500$  m da Figura 1(a), sugerindo que na medida que se aumenta a separação T-R, aumenta a amplitude da função  $g(k\rho)$ . As curvas da fase apresenta ruído numérico.

#### Segunda camada polarizável

As Figuras 2(a) e 2(b) apresentam as curvas de amplitude e fase da função  $g(k\rho)$  para modelos com polarização na segunda camada (curvas azul e verde) em contraste com o modelo sem polarização (curvas preta e vermelha). Os valores de amplitude são muito pequenos e as curvas apresentam ruído numérico, o qual também é observado nas curvas de fase.

### Modelos de duas camadas com contraste de condutividade $K = 0,1$

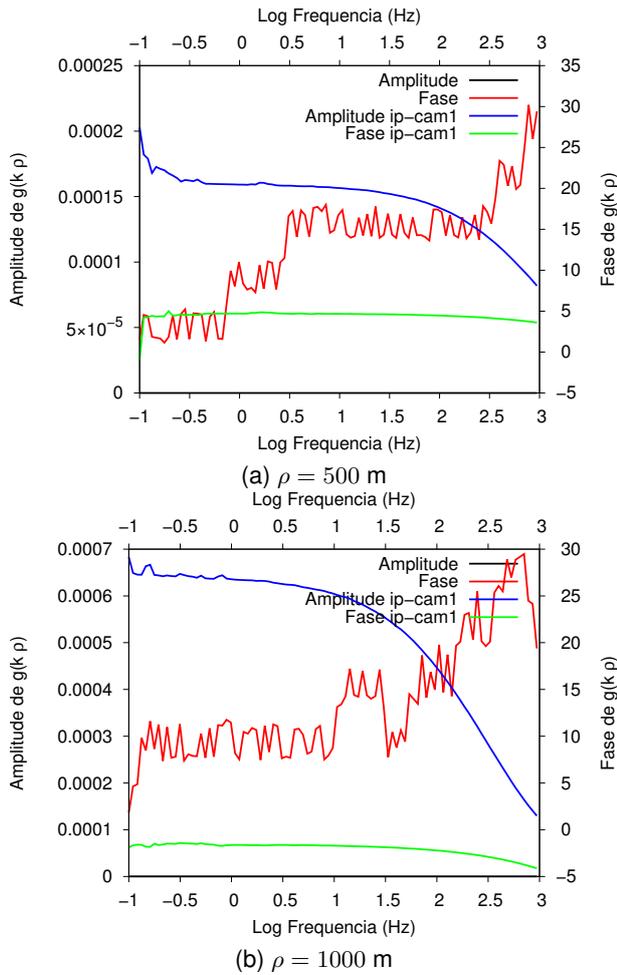


Figura 1: Curvas de amplitude e fase de  $g(k\rho)$  como função do logaritmo da frequência para modelos de duas camadas com condutividades  $\sigma_1 = 0,002$  e  $\sigma_2 = 0,002$  S/m, espessura  $d_1 = 100$  m,  $m_1 = 0,2$  e  $\tau = 0,9$ , e separações T-R de 500 e 1000 m.

### Primeira camada polarizável

Na Figura 3, observa-se que as curvas de amplitude e fase para o modelo sem polarização (preta e vermelha), apresenta uma solução mas estável ao se comparar com as curvas obtidas para o modelo com polarização na primeira camada (curvas azul e verde). Os valores de amplitude incrementam na medida em que se aumenta a separação T-R, e a fase toma valores negativos.

En este caso, observou-se que quando a primeira camada é mais condutiva e polarizável a amplitude da função  $g(k\rho)$  é menor comparado ao modelo sem polarização nas camadas.

### Segunda camada polarizável

Nos modelos com polarização na segunda camada, como mostrado na Figura 4, apresentam valores de amplitude e fase muito próximos do modelo puramente de camadas

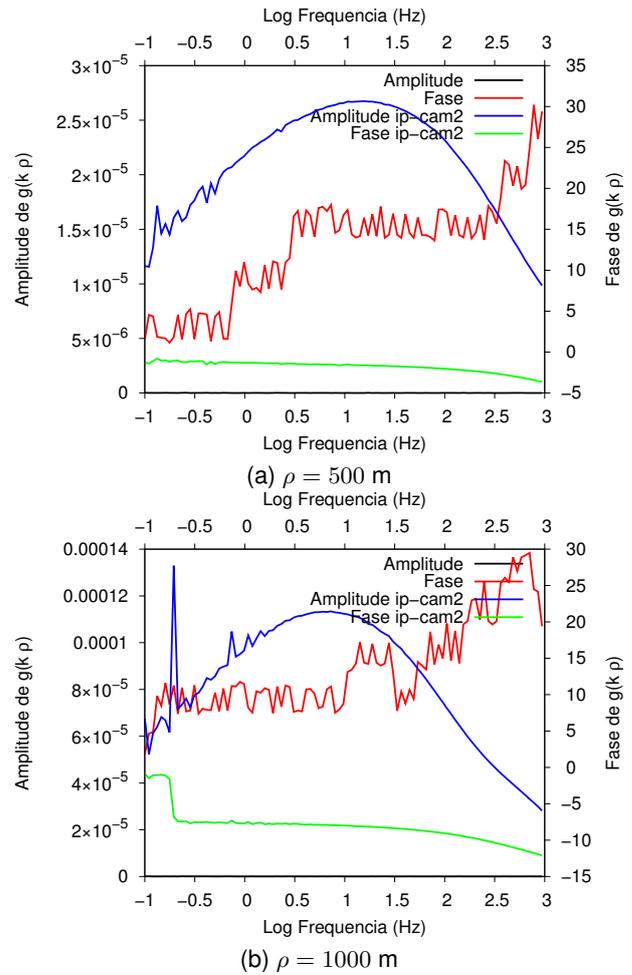


Figura 2: Curvas de amplitude e fase de  $g(k\rho)$  como função do logaritmo da frequência para modelos de duas camadas com condutividades  $\sigma_1 = 0,002$  e  $\sigma_2 = 0,002$  S/m, espessura  $d_1 = 100$  m,  $m_2 = 0,2$  e  $\tau = 0,9$ , e separações T-R de 500 e 1000 m.

(curvas preta e vermelha). Os valores de amplitude aumentam na medida em que se incrementa a separação T-R, e os valores de fase tornam-se negativos. Na medida em que os valores de frequência são incrementados, as curvas de amplitude e fase decaem para valores mais baixos.

Neste caso observou-se que quando a segunda camada é mais resistiva e polarizável, a separação dos efeitos de camada puro e IP não é distinguível.

### Modelos com contraste de condutividade $K = 10$

Nesta seção apresentam-se os resultados obtidos para modelos com condutividades  $\sigma_1 = 0,002$  S/m e  $\sigma_2 = 0,02$  S/m, espessura  $d_1 = 100$  m e separações T-R  $\rho = 500$  e 1000 m, com parâmetros de polarização na primeira ou segunda camada  $m = 0,2$  e  $\tau = 0,9$ , comparados a um modelo de duas camadas apresentando um simples contraste de condutividade (sem polarização nas camadas).

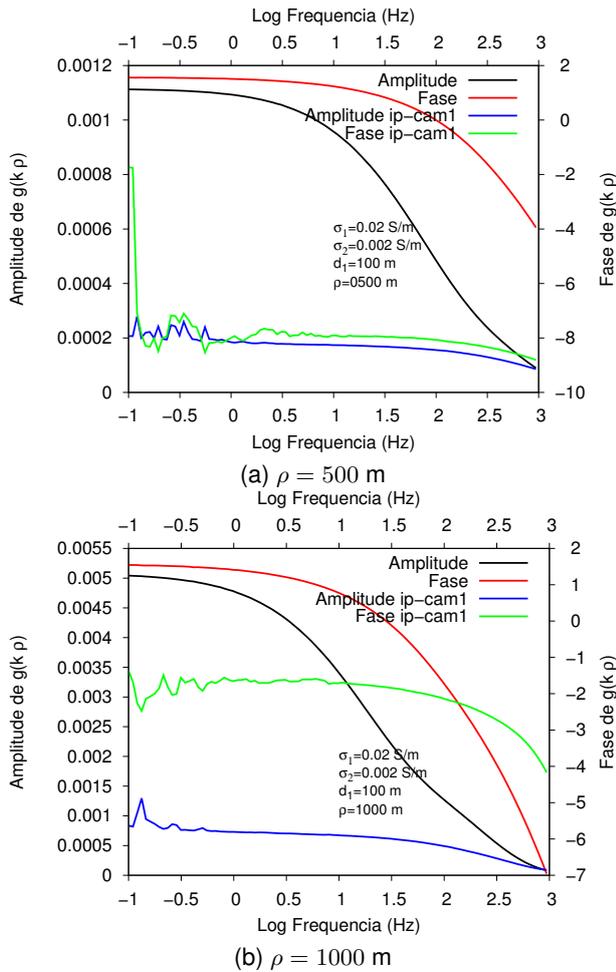


Figura 3: Curvas de amplitude e fase de  $g(k\rho)$  como função do logaritmo da frequência para modelos de duas camadas com condutividades  $\sigma_1 = 0,02$  e  $\sigma_2 = 0,002$  S/m, espessura  $d_1 = 100$  m,  $m_1 = 0,2$  e  $\tau = 0,9$ , e separações T-R de 500 e 1000 m.

### Primeira camada polarizável

A Figura 5 mostra as curvas de amplitude e fase de  $g(k\rho)$  para modelos de camadas puro e modelos com a primeira camada polarizável. Observa-se que a amplitude para o modelo com polarização, representado pelas curvas preta, apresenta valores maiores comparado ao modelo de camadas puro, representado pelas curvas azul. Ainda os valores de amplitude e fase incrementam na medida em que se incrementa a separação T-R. As curvas de fase tomam valores negativos e pode-se dizer que a separação do efeito de camadas puro e IP não é evidente nas curvas da fase.

En este caso, observou-se que quando a primeira camada é mais resistiva e polarizável a amplitude da função  $g(k\rho)$  é maior comparado ao modelo sem polarização nas camadas.

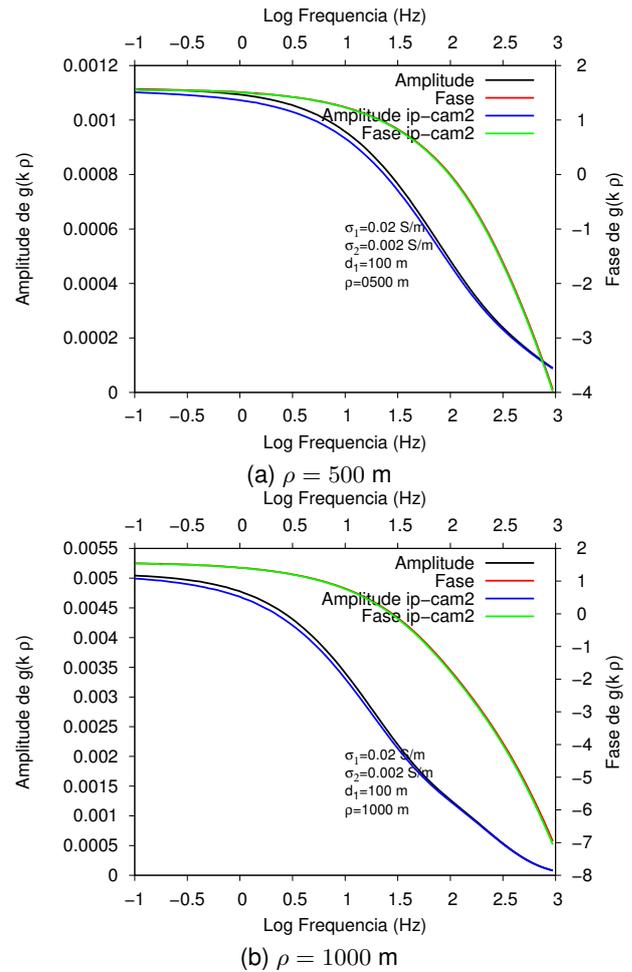


Figura 4: Curvas de amplitude e fase de  $g(k\rho)$  como função do logaritmo da frequência para modelos de duas camadas com condutividades  $\sigma_1 = 0,02$  e  $\sigma_2 = 0,002$  S/m, espessura  $d_1 = 100$  m,  $m_2 = 0,2$  e  $\tau = 0,9$ , e separações T-R de 500 e 1000 m.

### Segunda camada polarizável

A Figura 6 mostra as curvas de amplitude e fase de  $g(k\rho)$  para modelos de camadas puro e modelos com polarização na segunda camada. Para este caso, as curvas de amplitude e fase para o modelo com a segunda camada polarizável, apresenta valores menores quando comparado ao modelo com primeira camada polarizável. Para o caso da Figura 6(a), os valores máximos de amplitude para o modelo com polarização (curva azul) são obtidos para frequências de 3 Hz. E já para o caso da Figura 6(b), esses valores máximos de amplitude são obtidos para frequências de 1 Hz. Em todos os casos, a fase toma valores negativos para todo o intervalo de frequência.

En este caso, observou-se que quando a segunda camada é mais condutiva e polarizável a amplitude da função  $g(k\rho)$  é menor a separação dos efeitos de camadas e IP não é distinguível nas curvas de amplitude e fase.

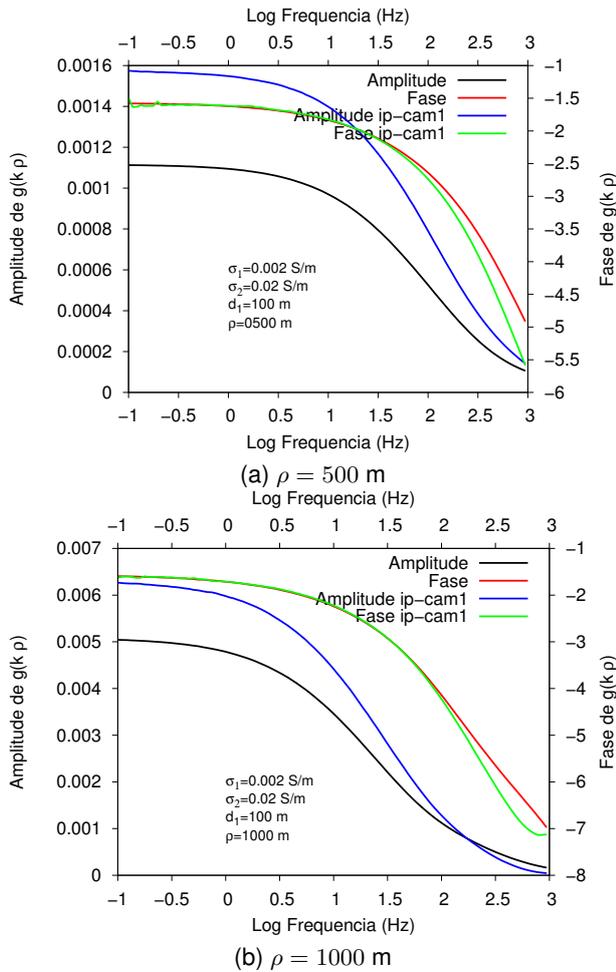


Figura 5: Curvas de amplitude e fase de  $g(k\rho)$  como função do logaritmo da frequência em Hz para modelos de duas camadas com condutividades  $\sigma_1 = 0,002$  e  $\sigma_2 = 0,02$  S/m, espessura  $d_1 = 100$  m,  $m_1 = 0,2$  e  $\tau = 0,9$ , e separações T-R de 500 e 1000 m.

## Conclusões

- A formulação proposta nesta pesquisa permite separar o efeito de polarização induzido do simples contraste de condutividades das camadas através do estudo das curvas de amplitude da função  $g(k\rho)$ .
- A função  $g(k\rho)$  apresenta valores muito próximos de zero para o caso de modelos homogêneos e de duas camadas com contraste  $K = 1$ , como era esperado da equação 10.
- Para a maioria dos casos estudados a representação na forma de curvas de amplitude de  $g(k\rho)$  em função do logaritmo da frequência em Hz, torna possível a separação do efeito IP e do simples contraste de condutividades das camadas. Embora a formas das curvas para os modelos com e sem polarização se apresente muito semelhantes entre si. Já as curvas de fase permitem distinguir a separação desses efeitos apenas no caso em que a pri-

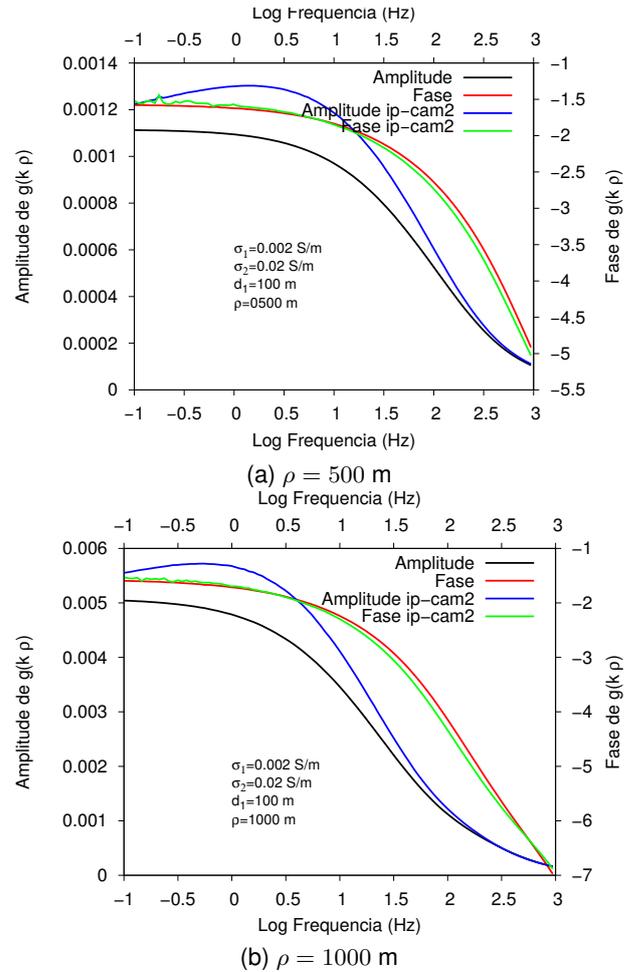


Figura 6: Curvas de amplitude e fase de  $g(k\rho)$  como função do logaritmo da frequência em Hz para modelos de duas camadas com condutividades  $\sigma_1 = 0,002$  e  $\sigma_2 = 0,02$  S/m, espessura  $d_1 = 100$  m,  $m_2 = 0,2$  e  $\tau = 0,9$ , e separações T-R de 500 e 1000 m.

meira camada é mais condutiva e polarizável ( $K = 0,1$ ).

## Referências

- Barringer, A. R. (1965) The Barringer Input Airbone Electromagnetic System, In: Sales document published by , Barringer Research Limited. cd cd
- Bhattacharyya, B. K. (1964) Electromagnetic fields of a small loop antenna on the surface of a polarizable medium, Geophysics, 29 (5):814.
- 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. (2000) Developments in a model to describe low-frequency electrical polarization of rocks, Geophysics, 65(2):437-451
- Erdélyi, A. (1953) Higher transcendental functions, vol. II, McGraw-Hill, New York.

- Luo, Y.; Zhang, S. e Xiong, B. (2003) Feasibility of natural source induced polarization, *Chinese Journal of Geophysics*, **46**:169-178.
- McPhar (1965) Catalogue og Geophysical Equipment for Mineral Exploration, In: *Sales document published by* , Toronto, Canadá, Mcphar Geophysics Limited.
- Sato, H. K. (1979) Método eletromagnético para interpretação de polarização induzida e resistividade, usando o protótipo de um sistema a multi-frequência, Dissert. de Mestrado, Universidade Federal da Bahia, Salvador, Brasil.
- Seigel, H. O. (1959a) A theory for induced polarization effect (for step function excitation), In: E. Wait, J. R., ed., *Overvoltage Research and geophysical applications* , vol. 4, pp. 4-21, Pergamon Press, Internat. Series on Earth Sciences.
- Seigel, H. O. (1959b) Mathematical formulation and type curves for induced polarization, *Geophysics*, **24**:547-565
- Telford, W. M.; Geldart, L. P. e Sheri, R. E. (1990) *Applied geophysics*, Cambridge University, Cambridge, 2º edic.
- Valera, R. (2015) Correção dos efeitos do relevo em dados geofísicos EMMF, Tesis de Doutorado, Universidade Federal da Bahia, Brasil.
- Valera Sifontes, R.; Sato, H. K. e Moumoni, Z. I. (2016) Relief geometric effects in frequency-domain electromagnetic method, *Geophysics*, **81**(5):E287-E296.
- Wait, J. R. (1959a) The variable-frequency method, In: E. Wait, J. R., ed., *Overvoltage Research and geophysical applications* , vol. 4, pp. 29-49, Pergamon Press, Internat. Series on Earth Sciences.
- 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.
- Wu, H. e Wang S. (1978) Possibility of IP survey using the natural electromagnetic field, *Gephysical and Geochemical Exploration*, **1**:62-64.
- Yue, A., Qing-yun Di e Kun Fa Shi (2007) The discussion on the IP information extraction from CSAMT signal, *Progress in Geophysics*, **06**:1935-1930.