



## Correção dos efeitos do relevo na aquisição de dados geofísicos EMMF

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

Copyright 2016, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica.

Este texto foi preparado para a apresentação no VII Simpósio Brasileiro de Geofísica, Ouro Preto, 25 a 27 de outubro de 2016. Seu conteúdo foi revisado pelo Comitê Técnico do VII 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.

### Abstract

A new formulation is proposed to correct the terrain effects on multifrequency electromagnetic geophysical data, using perpendicular coils arrangement at minimum coupling. A more complete correction, named second order correction, was developed and it combines the surficial electrical conductivity layer and the geometrical parameters describing both the transmitter-receiver coils attitudes and an assumed dipping plane representing the ground surface. It was built up a second-order correction algorithm, whose results were analysed, showing its qualitative and quantitative effectiveness. The results using simplified simulations have shown that the correction values due to the transmitter dipole tilt angle or ground dipping angle shall be a maximum of 2° to ensure errors of apparent conductivity less than 10.

### Introdução

Os métodos eletromagnéticos a multifrequência têm sido amplamente estudados nos últimos anos, demonstrando sua viabilidade na exploração de petróleo. Na década de 1970, entre os diversos equipamentos EM operando no domínio da frequência comerciais, não existia um que medisse, por exemplo, a amplitude e fase do campo magnético em relação à corrente elétrica na bobina transmissora. Característica fundamental para a abordagem de um novo método, cujas bases teóricas foram propostas por Dias (1968), e que foram testadas por Sato (1979), para a detecção de hidrocarbonetos e o monitoramento dos efeitos da invasão de fluidos relacionados com a recuperação avançada de petróleo (Dias et al., 2005; Dias et al., 2006; Dias et al., 2007).

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, aumentar 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 usado na modelagem teórica.

Neste contexto, o presente trabalho propõe a aplicação de correções em dados EMMF, calculadas com os parâmetros geométricos e de condutividade elétrica da camada superficial. O arcabouço teórico considera que a superfície é aproximada por um plano inclinado e que a bobina transmissora é aproximada por um dipolo magnético com orientação variável em torno da vertical. Para a simulação das heterogeneidades, considerou-se que o plano inclinado representa a interface ar-modelo de n-camadas homogêneas e isotrópicas com interfaces paralelas à ela.

### 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  $\alpha$  e  $\beta$  são, respectivamente, o azimute e o mergulho do plano  $x'y'z'$  referenciado ao sistema  $xyz$ .

Seguindo Moumouni (2010), considerando um dipolo magnético  $\vec{M}$  transmissor em  $C$ , com azimute  $\alpha_M$  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  $x'y'z'$ :

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

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  $\vec{W}$  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:

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

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  $\tilde{W}$ , com base na formulação contida em Ward e Hohmann (1987).

### Correção de primeira ordem

Se a geometria do relevo é conhecida, especialmente as orientações dos eixos dos dipolos, torna-se então possível a aplicação de uma correção de primeira ordem (Sinha, 1980).

Sendo assim, denominando-se Correção dos Efeitos Geométricos do Relevo (CEGR) de primeira ordem, ela será aplicada mediante a subtração do campo magnético primário  $H_{xp}^{VCA}$ , para o caso do arranjo VCA, do campo magnético horizontal total  $H_x$ , ou seja, essa correção de primeira ordem é calculada por:

$$H_{x,corrig} = H_x - H_{xp}^{VCA},$$

onde

$$H_{xp}^{VCA} = \frac{m \sin \beta_M \cos \alpha_M}{2\pi\rho^3}.$$

De forma que, a razão entre as impedâncias mútuas pode ser calculada mediante:

$$\frac{Z}{Z_0} = \frac{H_{x,corrig}}{m \cos \beta_M / 2\pi\rho^3}.$$

Esta correção, entretanto, é meramente geométrica, e não considera as propriedades físicas das camadas.

### Correção de segunda ordem

Uma correção de segunda ordem, ou CEGR de segunda ordem, pode ser realizada ao se considerar, como informação *a priori*, a condutividade elétrica da primeira camada  $\sigma_1$ . Na prática, essa condutividade pode ser obtida, por exemplo, através do método da eletrorresistividade rasa na área de estudo.

Essa CEGR de segunda ordem será construída considerando que, do campo magnético  $\tilde{H}$ , somente o seu componente  $x$  é conhecido, juntamente com o momento magnético transmissor  $\tilde{M}$ , e os parâmetros geométricos esquematizados na Figura 1.

O papel da CEGR é estimar o componente  $x'$  do campo magnético  $\tilde{H}'$  pois ele e o componente  $M_{z'}$  formam o arranjo PERP-A, geometricamente ideal, cuja correspondente razão  $Z/Z_0$  é invertida para os valores do parâmetro de polarização e número de indução aparente, conforme Dias (1968).

Sem perda de generalidade, considerando os elementos mostrados na Figura 2, os campos  $\tilde{H}'$  e  $\tilde{H}$  são funções do dipolo magnético  $\tilde{M}$  e das condutividades elétricas do corpo e da rocha encaixante, caracterizada por sua condutividade  $\sigma_1$ . Sob o ponto de vista geométrico, essas

grandezas estão relacionadas pelas Equações desenvolvidas na seção de Geometria utilizada.

### Correção devida a inclinação do terreno

Na prática, tem-se medido apenas o componente  $H_x$ , o que impossibilita calcular o componente  $H_{x'}$ , pois seria necessário o conhecimento dos demais componentes do campo  $\tilde{H}$ , especialmente o componente  $H_z$ . Assim, a proposta é estimar esses outros componentes do campo  $\tilde{H}$  e, em primeira aproximação, considerá-los como resposta sem a heterogeneidade mostrada na Figura 2, ou seja, a resposta de um semiespaço homogêneo com condutividade  $\sigma_1$ .

Esse campo  $\tilde{H}_{est}$  pode ser estimado por

$$\tilde{H}_{est} = T^{-1}W_h T \tilde{M},$$

onde a matriz  $W_h$  refere-se ao semiespaço homogêneo com condutividade  $\sigma_1$ , cujos elementos estão descritos pelas equações para os campos magnéticos dadas em Ward e Hohmann (1987).

Tomando-se os componentes  $y$  e  $z$  do campo estimado, pode-se montar, em primeira aproximação, o campo aproximado  $\tilde{H}_{ap}$  como

$$\tilde{H}_{ap} = (H_x, H_{yest}, H_{zest})^T.$$

O campo aproximado no sistema  $(x', y', z')$  é dado por

$$\tilde{H}'_{ap} = T \tilde{H}_{ap}.$$

### Correção devida a inclinação do dipolo magnético

Genericamente, o dipolo transmissor  $\tilde{M}$  pode não ser normal ao plano  $(x', y')$  devido à conjugação de dois fatores: a sua orientação e a orientação do mergulho do plano  $(x', y')$ . Eventualmente, o dipolo magnético pode ser perpendicular ao plano  $(x', y')$ .

Considerando o caso geral, os componentes  $M'_x$  e  $M'_y$  do dipolo magnético transmissor irão contribuir de duas formas para o campo  $\tilde{H}'$ : (i) campo primário e (ii) campo secundário devido aos condutores em subsuperfície. A remoção dessas contribuições permite a obtenção do componente  $H_{x'}$  necessário para o cálculo de  $Z/Z_0$ , para o arranjo PERP-A.

Contudo, novamente, a proposta é estimar o campo secundário desprezando a heterogeneidade, ou seja, considerando o semiespaço homogêneo com condutividade  $\sigma_1$ .

Denominando  $\Delta\tilde{H}'$  como o campo devido exclusivamente aos componentes  $M'_x$  e  $M'_y$ , ele pode ser estimado com

$$\Delta\tilde{H}'_x = W_h R T \tilde{M},$$

onde

$$R = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

O papel da matriz  $R$ , na Equação, é restringir o momento  $\tilde{M}'$ , aos seus componentes  $x'$  e  $y'$ .

O campo magnético horizontal final no sistema  $(x', y', z')$  pode ser aproximado mediante a expressão:

$$\widetilde{H}'_{\text{final},x} = \widetilde{H}'_{\text{ap}} - \Delta\widetilde{H}'_x,$$

e, finalizando, a razão das impedâncias mútuas fica

$$\frac{Z}{Z_0} = \frac{H'_{\text{final},x}}{H_{z',P}},$$

onde  $H_{z',P}$  é o campo primário.

## Resultados

Para a aplicação da CEGR serão consideradas as seguintes combinações: (a) a superfície do terreno é horizontal e o dipolo magnético transmissor não está verticalizado; (b) a superfície do terreno é inclinada e o dipolo magnético transmissor é vertical; e (c) a superfície do terreno é inclinada e o dipolo magnético transmissor é normal à superfície. Tomando como cenário o modelo de duas camadas, a Figura 3 ilustra essas combinações considerando os ângulos  $\alpha = \pi^\circ$  e  $\alpha_M = 0^\circ$ .

### Correção do efeito da inclinação do eixo do dipolo transmissor

Objetivando estudar modelos compatíveis com o caso de reservatórios de petróleo, será considerado um “modelo base” de duas camadas homogêneas e isotrópicas, representado por uma primeira camada mais condutiva,  $\sigma_1 = 0,02$  S/m, e uma segunda camada mais resistiva,  $\sigma_2 = 0,002$  S/m, o que determina um contraste de condutividade  $K = \sigma_2/\sigma_1 = 0,1$ , sendo a espessura da primeira camada  $d_1 = 200$  m e a separação transmissor-receptor  $\rho = 2000$  m, e considerando  $\alpha_M = 180^\circ$ .

A Figura 4 mostra os diagramas de Argand construídos para o modelo base definido, os quais permitem avaliar os resultados das CEGR de primeira e segunda ordem. Na Figura 4(a), observa-se um desvio substancial na parte real da impedância mútua, nas curvas para  $\beta_M = 1^\circ, 2^\circ, 3^\circ, 4^\circ$  e  $5^\circ$ , em comparação ao arranjo PERP padrão ( $\beta_M = 0^\circ$ ). Uma vez realizada a CEGR de primeira ordem, as curvas são deslocadas para a direita, tendendo para a curva de  $\beta_M = 0^\circ$ , porém, ainda, apresentando desvios, por conta dessa correção ser meramente geométrica (Figura 4(b)). Quando se realiza a CEGR de segunda ordem, as curvas na Figura 4(a) tendem, com melhor aproximação, para o caso de  $\beta_M = 0^\circ$ , como mostra a Figura 4(c), explicado pelo fato de que, para o cálculo da correção de segunda ordem, se considera, além da geometria, a condutividade da primeira camada.

A Figura 5(a) mostra as curvas do parâmetro de polarização aparente  $U_a$  como função do número de indução aparente  $\theta_a$ , para o modelo base apresentado acima. O gráfico de  $U_a$  versus  $\theta_a$  com CEGR de primeira ordem é apresentado na Figura 5(b). Observa-se a tendência dessas curvas se aproximarem da curva padrão de  $\beta_M = 0^\circ$ , ficando, ainda, erros residuais que são avaliados tendo por base o desvio  $\Delta U$  no parâmetro de polarização aparente e o erro relativo no número de indução aparente  $\Delta\theta/\theta_0$ , definidos como

$$\Delta U = |U_{\alpha,\beta_M} - U_{\alpha,0}|, \quad (1)$$

e,

$$\frac{\Delta\theta}{\theta_0} = \frac{\theta_{\alpha,\beta_M}}{\theta_{\alpha,0}} - 1, \quad (2)$$

Na Figura 5(b) apresenta-se o resultado da CEGR de segunda ordem. As curvas que representam o dipolo transmissor inclinado se aproximam da curva padrão ( $\beta_M = 0^\circ$ ), ficando ainda erros residuais com valores de  $\Delta U$  e  $\Delta\theta/\theta_0$  da ordem de 5%, para o ângulo de inclinação  $\beta_M = 5^\circ$ .

### Correção do efeito da inclinação do terreno com dipolo transmissor vertical

A aplicação da CEGR para o caso da topografia plana, inclinada, com o dipolo magnético transmissor verticalizado ( $\alpha_M = 0^\circ$  e  $\beta_M = 0^\circ$ ), foi analisada para o modelo base e para o caso em que  $\alpha = 180^\circ$  e valores de  $\beta = 0^\circ, 1^\circ, 2^\circ, 3^\circ, 4^\circ$  e  $5^\circ$ .

A Figura 6 mostra os diagramas de Argand deste mesmo modelo base, que apresentam uma visão melhorada do comportamento das curvas da parte imaginária de  $Z/Z_0$  em função da parte real, antes e depois da CEGR.

Na Figura 7(a), as curvas de  $U_a$  versus  $\theta_a$  para o modelo base, apresentam fortes desvios da curva para  $\beta = 0^\circ$  em todo o intervalo do número de indução aparente. Uma vez feita a CEGR de segunda ordem (Figura 7(b)), todas as curvas se aproximam da curva  $\beta = 0^\circ$ . Utilizando equações similares para o erro do parâmetro de polarização  $\Delta U$  e do erro relativo  $\Delta\theta/\theta$ , com a troca de  $\beta_M$  por  $\beta$ , se obtiveram valores de  $\Delta U$  da ordem 5% e de  $\Delta\theta/\theta$  da ordem de 10%.

### Correção do efeito da inclinação do terreno com dipolo transmissor normal ao plano

A aplicação da CEGR para o caso da topografia plana, inclinada, com o dipolo magnético transmissor normal a esse plano, foi feita no modelo base para o caso em que  $\alpha_M = 0^\circ$ ,  $\beta_M = \beta$  e  $\alpha = 180^\circ$ . Os diagramas de Argand na Figura 8 referem-se à função  $Z/Z_0$  sem correção e com CEGR, mostram que as curvas não se afastam da curva referência  $\beta_M = \beta = 0^\circ$ .

Em complemento às duas subseções anteriores, cujo modelo de duas camadas tinha o contraste  $K = 0,1$ , a função  $U_a$  versus  $\theta_a$  para a situação sem correção e com CEGR está mostrada na Figura 9. Neste caso, o comportamento das curvas sem correção (Figura 9(a)) é contrário ao caso anterior em que o dipolo transmissor apresenta um ângulo de inclinação diferente ao terreno (Figura 7). As curvas tendem a se afastar da curva de referência  $\beta_M = \beta = 0^\circ$  em todo o intervalo de  $\theta_a$ , com  $U_a$  positivos. Essa tendência é mais evidente para  $\theta_a \leq 2$ , e, no intervalo  $2 < \theta_a < 10$ , as curvas estão mais próximas entre si.

A CEGR aproxima as curvas da curva referência, mas, indesejavelmente, torna negativo, os valores de  $U_a$  para  $\theta_a < 1$ . O erro na CEGR apresenta valores de  $\Delta U$  de até 10%, e o erro relativo do número de indução  $\Delta\theta/\theta_0 < 15\%$ .

## Conclusões

Os resultados mostraram a aplicação da correção dos efeitos geométricos do relevo para as três situações discuti-

das. A CEGR de primeira ordem é um processo que considera apenas a disposição geométrica do transmissor e receptor. Observou-se nos diagramas de Argand e curvas  $U_a$  versus  $\theta_a$  que essa correção ainda apresentava ser ineficiente.

Uma CEGR de segunda ordem está proposta. Ela acrescenta ao processo de correção de primeira ordem, a remoção dos efeitos dos campos secundários atuantes sobre o arranjo transmissor-receptor, que simulam desvios geométricos em relação ao arranjo PERP-A. Os campos secundários necessários a essa nova parcela foram calculados supondo um semiespaço com condutividade igual ao da primeira camada.

Ficou demonstrado que o erro na CEGR torna-se menor, aproximando as curvas relacionadas às situações com inclinação à curva do modelo base, ou de referência, que é o arranjo PERP-A padrão. Com base nos casos estudados e a análise feita com as curvas de  $U_a$  versus  $\theta_a$  com CEGR constatou-se que os valores do ângulo de inclinação do dipolo transmissor ou do terreno devem ser no máximo de  $2^\circ$  para garantir valores no erro da condutividade aparente menores que 10%.

## 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. and Lima, O. A. L. and Sato, H. K. and Moraes, J. A. C. (2006) Contribution to oil exploration and development - A successful inductive multi-frequency EM survey on-shore Brazil, In: *68th EAGE Conference and Exhibition*, Vienna, Austria.
- 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<sup>o</sup> Congr. Intern. da SBGf, Rio de Janeiro*.
- 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 multi-frequência, 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.

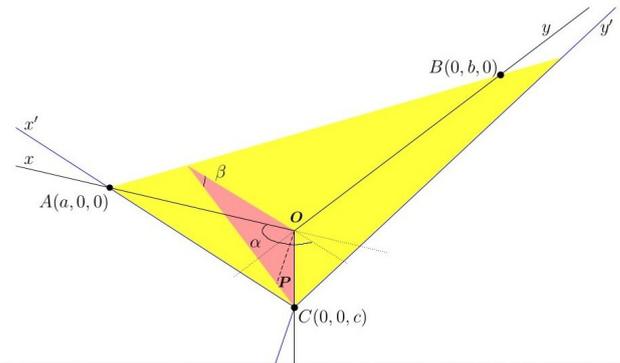


Figura 1: Plano inclinado regional e sistema de coordenadas

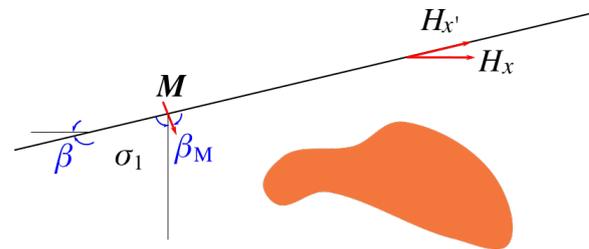


Figura 2: Modelo simplificado de terreno inclinado, com heterogeneidade, os campos magnéticos e dipolo magnético transmissor

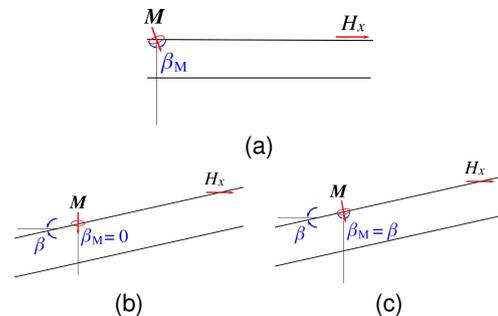


Figura 3: Configurações de relevo, e orientações de transmissor e receptor

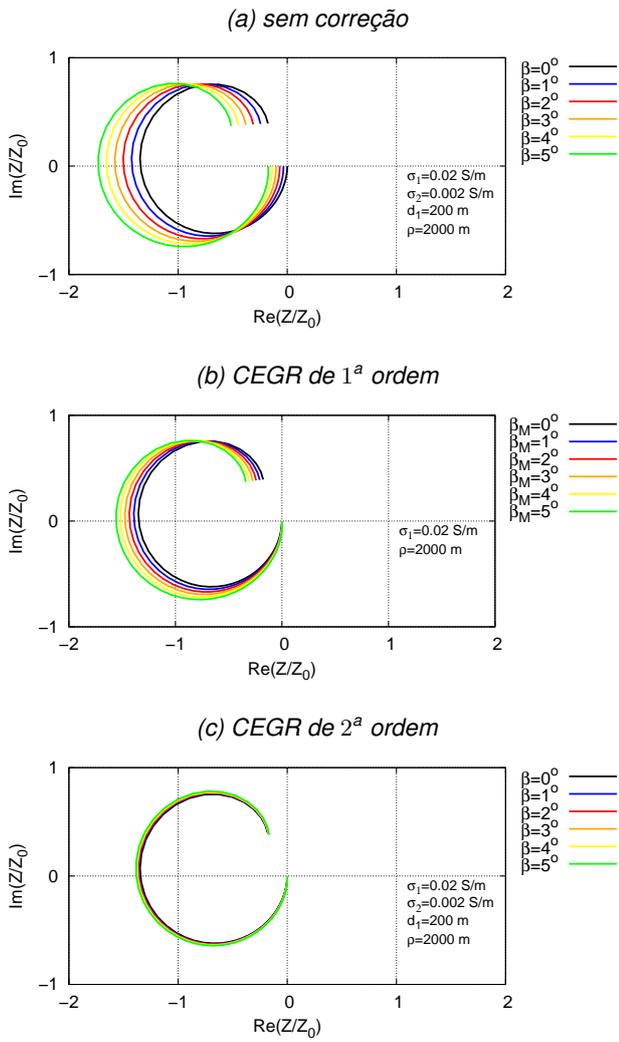


Figura 4: Diagramas de Argand de  $Z/Z_0$  para um modelo de duas camadas com  $K = \sigma_2/\sigma_1 = 0,1$  e ângulo de azimute  $\alpha_M = 180^\circ$ : (a) sem correção, (b) CEGR de 1ª ordem, e (c) CEGR de 2ª ordem.

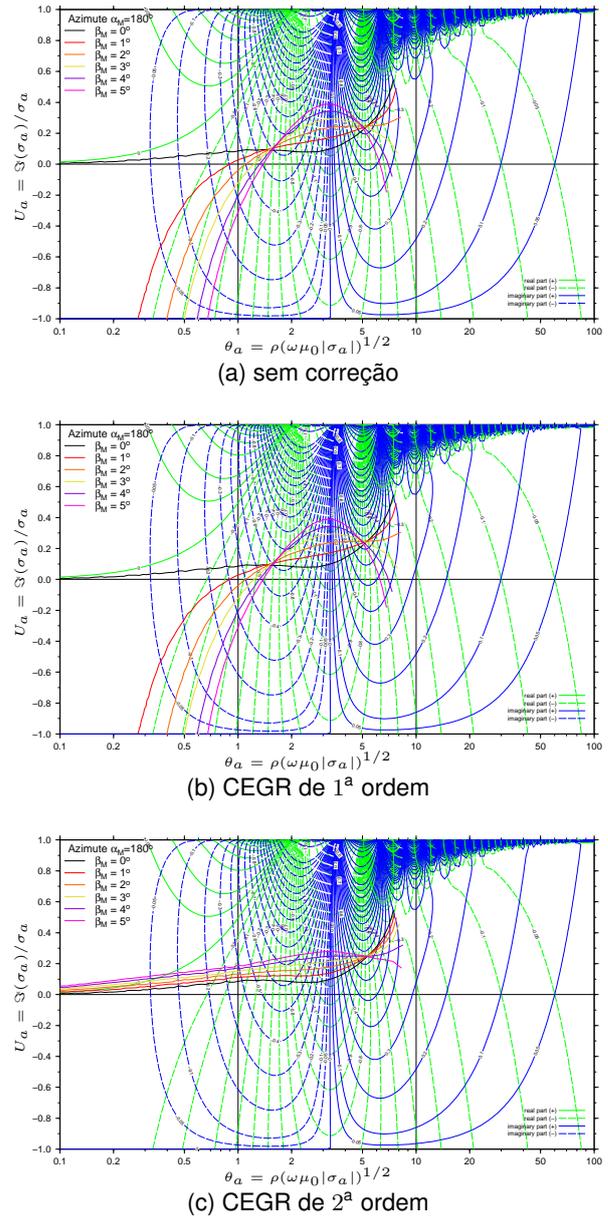


Figura 5: Curvas  $U_\alpha$  versus  $\theta_\alpha$  para o modelo de duas camadas, com contraste de condutividade  $K = \sigma_2/\sigma_1 = 0,1$  e razão  $d/\rho = 0,1$ , para  $\alpha_M = 180^\circ$ .

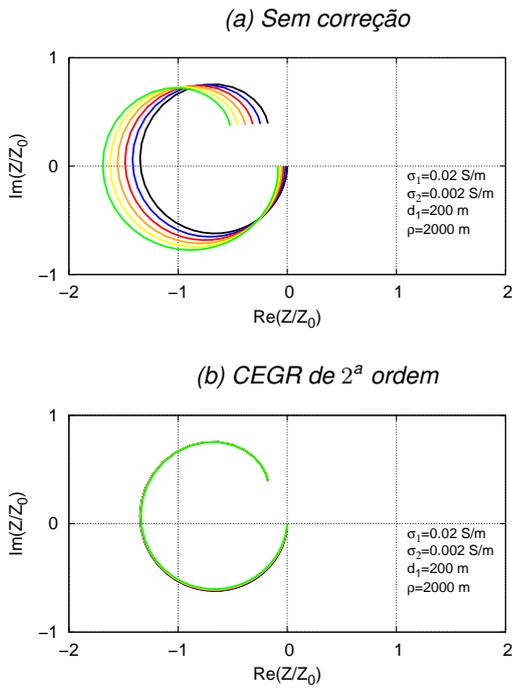


Figura 6: Diagramas de Argand de  $Z/Z_0$  para um modelo de duas camadas com  $K = \sigma_2/\sigma_1 = 0,1$  e ângulo de azimute  $\alpha = 180^\circ$ : (a) sem correção e, (b) após CEGR.

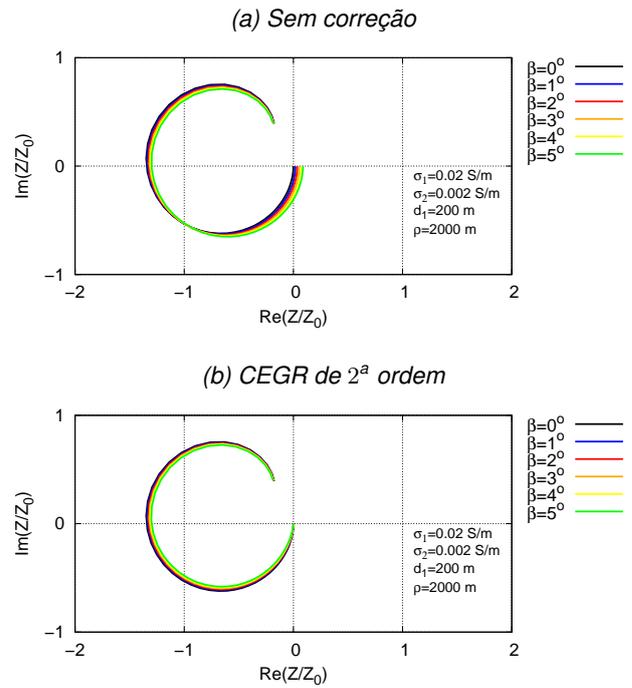


Figura 8: Diagramas de Argand de  $Z/Z_0$  para um modelo de duas camadas com  $K = \sigma_2/\sigma_1 = 0,1$  e ângulo de azimute  $\alpha = 180^\circ$ : (a) sem correção, e (b) após CEGR.

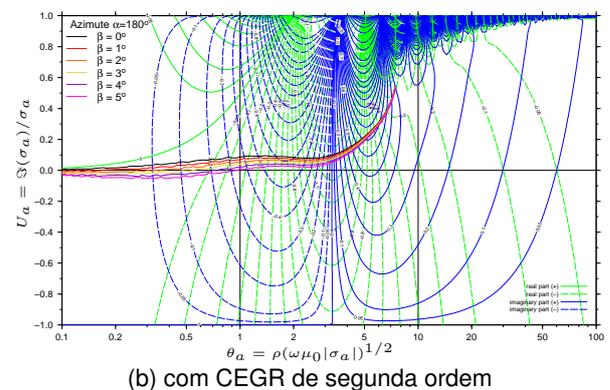
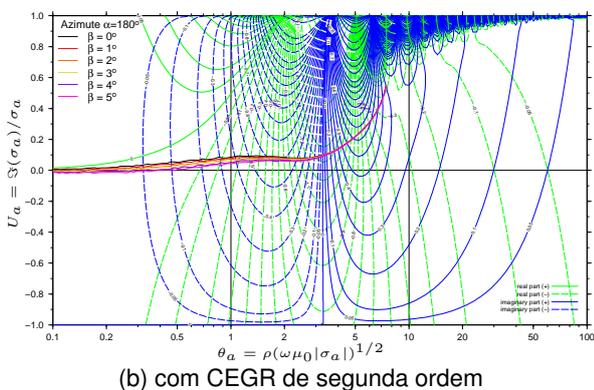
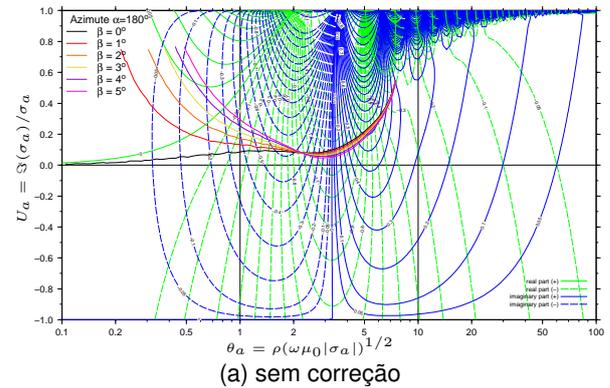
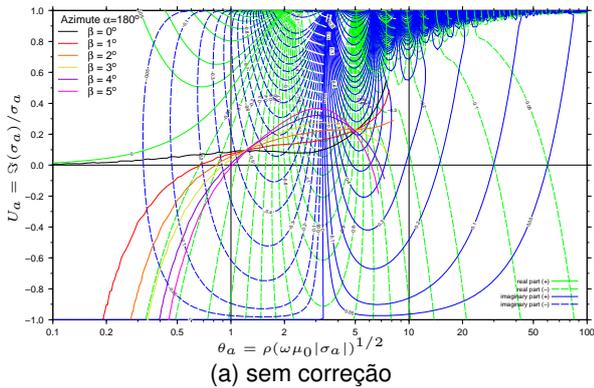


Figura 7: Curvas  $U_\alpha$  versus  $\theta_\alpha$  para um modelo de duas camadas, com contraste de condutividade  $K = \sigma_2/\sigma_1 = 0,1$  e razão  $d/\rho = 0,1$ , para  $\alpha = 180^\circ$

Figura 9: Curvas  $U_\alpha$  versus  $\theta_\alpha$  para um modelo de duas camadas, com contraste de condutividade  $K = \sigma_2/\sigma_1 = 0,1$  e razão  $d/\rho = 0,1$ , para  $\alpha = 180^\circ$