

CALIBRAÇÃO DE BOBINAS RECEPTORAS DE EQUIPAMENTO ELETROMAGNÉTICO MULTIFREQUÊNCIA

Vinicius Lemos de Almeida, PG Geofísica, IGEO/UFBA
Hédison K. Sato, CPGG/IGEO/UFBA

Copyright 2010, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica Este texto foi preparado para a apresentação no IV Simpósio Brasileiro de Geofísica, Brasília, 14 a 17 de novembro de 2010. Seu conteúdo foi revisado pelo Comitê Técnico do IV 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

A motivação principal dessa investigação foram as orientações da empresa Phoenix Geophysics Ltd. sobre a calibração das bobinas receptoras da unidade receptora modelo V-6, parte de um sistema para aquisição de dados eletromagnéticos multifrequência, em que a intensidade do campo magnético deve ser medida.

Desta maneira, este trabalho traz o resultado da análise teórica sobre a influência de diversos fatores que, se não considerados adequadamente, comprometem o processo de calibração indicado pelo fabricante.

Os fatores analisados consistem em: (i) geometria da bobina excitadora disposta horizontalmente sobre a superfície do terreno, (ii) comprimento da bobina receptora sendo calibrada, (iii) a contribuição da resistividade elétrica do solo e (iv) efeito de camadas condutoras mais profundas.

Com base nos resultados, fica demonstrado que diversos cuidados devem ser tomados durante o processo de calibração sugerido.

INTRODUÇÃO

Dias (1968) lançou as bases do método eletromagnético a multifrequência para interpretar o efeito da resistividade elétrica, da polarização elétrica induzida e demonstrar a viabilidade de distinção destes dois efeitos em estruturas de duas camadas horizontais, que foram, posteriormente, testadas por Sato (1979) em um alvo condutor em uma região mineira.

Desta forma, esses sistemas eletromagnéticos passaram a ter aplicações em que o foco é a determinação da resistividade aparente do meio, além da possibilidade da

determinação do efeito de polarização elétrica induzida.

A versão mais testada em campos de petróleo é o protótipo 5 formado por um conjunto V-6 (unidade receptora) e T-3 (unidade transmissora), fabricado pela Phoenix Geophysics. Este equipamento tem um número fixo de frequências (54) e alcança uma distância T-R de no máximo 3 km.

Em todos os equipamentos eletromagnéticos protótipos mencionados, uma informação relevante é a relação, função da frequência, entre as intensidades do campo magnético atuante e da voltagem (força eletromotriz) induzida na bobina receptora.

A motivação deste trabalho tem a ver com o equipamento de 5ª geração (T3 + V6), fabricado pelo Phoenix. Neste equipamento, as bobinas receptoras devem ser calibradas segundo um procedimento que recomenda o uso de um local resistivo, onde se instala uma bobina para a geração de um campo artificial e a bobina a ser calibrada é colocada coaxialmente no seu centro.

Sendo assim, decidiu-se investigar a intensidade do efeito eletromagnético do terreno nas condições de calibração, para estabelecer os parâmetros guias de natureza geométrica e física.

METODOLOGIA/PROBLEMA INVESTIGADO

Segundo Ward and Hohmann (1998), na prática, uma das fontes mais utilizadas EM é uma grande espira, geralmente quadrada ou retangular, disposta sobre a superfície da terra. As medições EM podem ser feitas dentro ou fora da bobina.

No entanto, para facilitar o estudo objeto deste trabalho, será considerado uma espira circular sobre um meio de N camadas horizontais. Neste caso, segundo Ward and Hohmann (1998), o componente vertical H_z do campo magnético em um ponto a uma distância ρ do centro da bobina, a uma altura z tal que $0 > z > -h$, onde $-h$ é a altura da bobina, é dado por:

$$H_z = \frac{Ia}{2} \int_0^{\infty} [e^{-u_0(z+h)} + r_{TE} e^{u_0(z-h)}] \frac{\lambda^2}{u_0} J_1(\lambda a) J_0(\lambda \rho) d\lambda \quad (1)$$

onde I e a são, respectivamente, a corrente e o raio da bobina transmissora, $u_0 = \sqrt{\lambda^2 - k_0^2}$, $k_0^2 = \omega^2 \mu_0 \epsilon_0$,

$$r_{TE} = (\lambda - \hat{u}_1)/(\lambda + \hat{u}_1),$$

$$\hat{u}_1 = u_1 \frac{\hat{u}_2 + u_1 \tanh(u_1 h_1)}{u_1 + \hat{u}_2 \tanh(u_1 h_1)}$$

$$\hat{u}_n = u_n \frac{\hat{u}_{n+1} + u_n \tanh(u_n h_n)}{u_n + \hat{u}_{n+1} \tanh(u_n h_n)}$$

$$\hat{u}_N = u_N,$$

$$u_n = \sqrt{\lambda^2 - k_n^2}$$

$$k_n = \sqrt{\omega^2 \mu_n \epsilon_n - i\omega \mu_n \sigma_n},$$

e, ω , a frequência angular, σ_n , μ_n , ϵ_n , respectivamente, a condutividade elétrica, permeabilidade magnética e a permissividade elétrica da camada n .

A adaptação dessa expressão para o caso em estudo (indução central) é simples bastando fazer $\rho = 0$. A integral contida nessa expressão é imprópria e foi resolvida numericamente usando a técnica de filtragem digital com os coeficientes dados por Anderson (1975).

RESULTADOS

O equipamento da Phoenix, protótipo 5, o fabricante recomenda que a calibração seja feita no campo, sobre um local com alta resistividade elétrica, usando-se uma espira transmissora quadrada de 5 m de lado, com a bobina receptora, a ser calibrada, colocada verticalmente no centro da espira. A referência a um local de alta resistividade elétrica, sem uma definição do seu valor mínimo, suscita uma curiosidade a respeito desse valor.

Para a execução deste estudo, está sendo utilizada a formulação do campo magnético vertical no centro de uma bobina circular, em lugar da quadrada, porém com as mesmas áreas, quando pertinente.

Para a avaliação da qualidade da calibração da bobina receptora, serão calculados desvios do campo magnético em relação ao vácuo, para diferentes modelos.

No primeiro modelo foi observado o efeito da condutividade elétrica de um semi-espço homogêneo. Mantendo-se constante a condutividade elétrica e calculado os desvios em função da frequência. Sendo feito também o inverso, mantendo-se constante a frequência e calculado os desvios em função da condutividade elétrica. Os resultados mostrados na Fig. 1 e Fig. 2 demonstram que a condutividade do semi-espço influencia muito no desvio nas altas frequências.

No segundo modelo, o propósito foi observar os efeitos do tamanho da espira transmissora na variação do campo magnético na bobina receptoram, visto que na prática, a bobina receptora tem um comprimento que pode ser significativo se comparado com as dimensões da bobina transmissora. O resultado desse ensaio está representado na Fig. 3, em que se verifica um aumento do desvio do campo magnético medido nos extremos da bobina em relação ao valor central, com a diminuição do raio da bobina transmissora.

Todavia, o aumento do raio da espira transmissora nos métodos eletromagnéticos, indução central, significa dizer uma maior profundidade de investigação. Assim, podemos constatar através da Fig. 4 que um aumento demasiado do raio da espira transmissora afetará no valor do campo magnético central quando tem-se uma primeira camada pouco espessa e uma segunda camada condutora.

No terceiro modelo foi proposto uma nova forma de calibração, em que, tendo em vista os resultados anteriores, investigou-se como ficaria o desvio entre o campo magnético modelado comparando ao do vácuo, com ambas bobinas elevadas em relação à superfície da terra plana. Para esse estudo, utilizou-se a equação definida por Ward and Hohmann (1998), sendo considerado $z = -h$. Como pode-se observar na Fig. 5 houve uma diminuição do desvio do campo magnético em torno de 20 % e 40 % para $h=2$ m e $h=4$ m respectivamente.

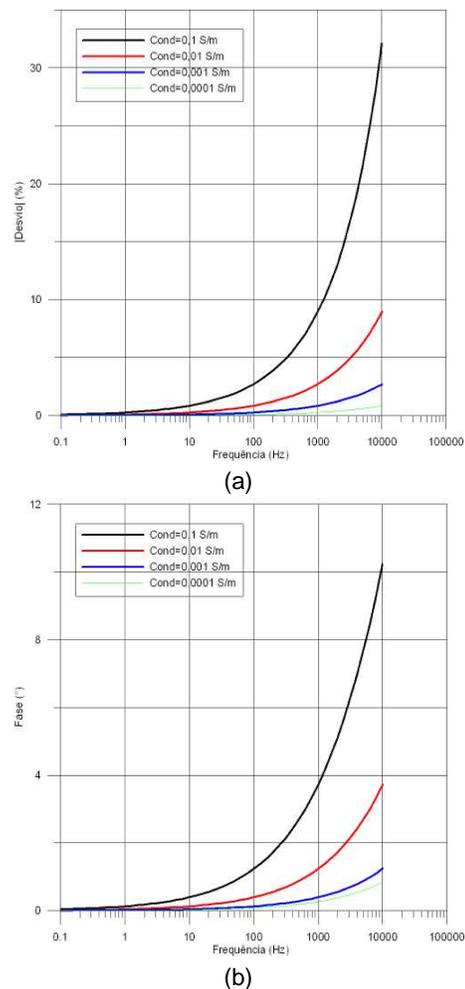


Figura 1: Desvio do campo magnético central em função da frequência, em uma bobina circular horizontal sobre uma terra homogênea parametrizada para diversas condutividades elétricas

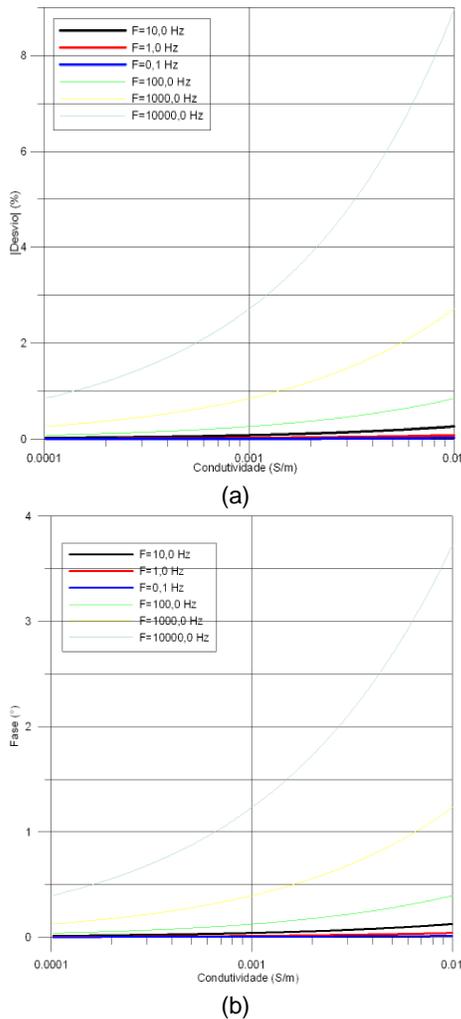


Figura 2: Desvio do campo magnético em função da condutividade elétrica de uma terra homogênea, parametrizada para diversas frequências

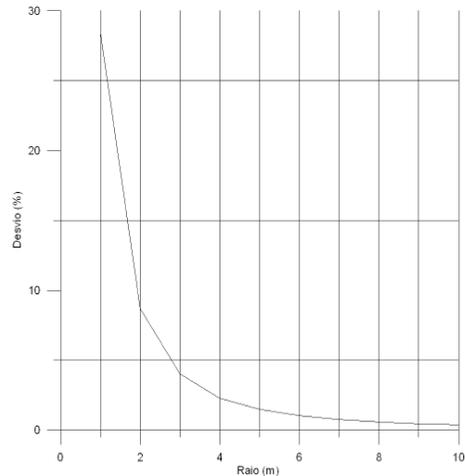


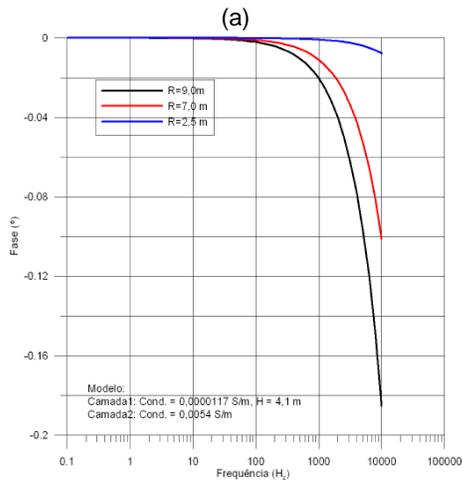
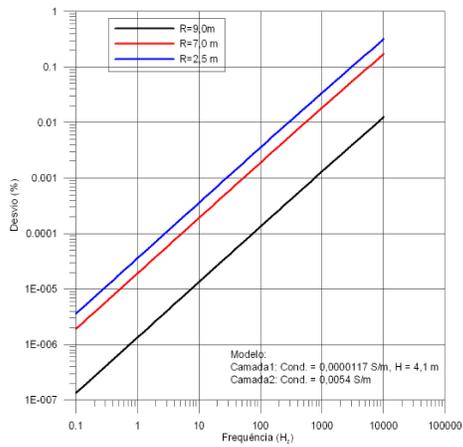
Figura 3: Desvio do campo EM na bobina receptora

DISCUSSÃO E CONCLUSÕES

Os estudos desenvolvidos demonstraram que, para o intervalo de frequência até 10 kHz, a calibração estaria com um erro menor que 1%, desde que a condutividade elétrica da primeira camada fosse menos que $0,0001 \text{ Sm}^{-1}$, com um espessura mínima de 10 m. A espessura é um parâmetro relevante pois quando a calibração é feita sobre um terreno sedimentar resistivo, é muito provável que a umidade aumente com a profundidade, implicando no aumento da condutividade com a profundidade, podendo prejudicar a calibração.

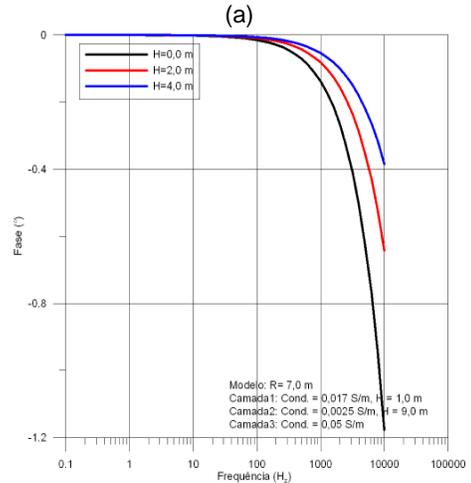
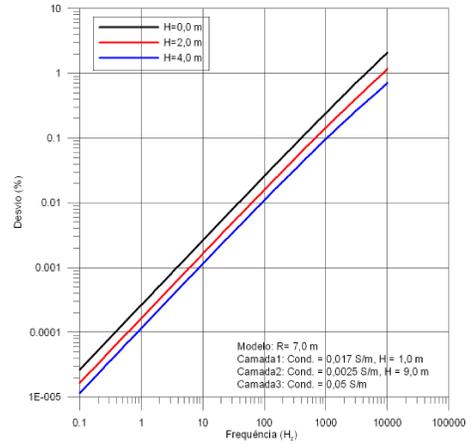
Neste trabalho, percebeu-se, também, que o comprimento da espira receptora deve ser considerado na calibração. Demonstrou-se que, no caso da dimensão de 5 m de lado da espira quadrada usada para a geração do campo magnético para a calibração, há uma variação de 5% do campo axial da bobina quadrada, entre dois pontos localizados no eixo da bobina: um no centro e outro a 0,5 m. Isto mostra que, também, não se pode considerar somente o valor teórico no centro da bobina como referência, a não ser que se aumente as dimensões da espira geradora do campo magnético. Todavia, isso exigirá que o terreno resistivo tenha uma primeira camada mais espessa.

Na medida em que a qualidade da calibração melhora com o aumento da resistividade da primeira camada, calculou-se o desvio considerando uma resistividade infinita que, na prática, corresponde a uma calibração elevando-se, ambas, a bobina geradora do campo e a bobina receptora. Sem entrar no mérito do grau de dificuldade operacional de se elevar todo o conjunto, verificou-se que, a uma altura de 4 m com a primeira camada apresentando uma resistividade de $0,017 \text{ Sm}^{-1}$ e espessura de 1 m e a segunda camada apresentando uma resistividade de $0,027 \text{ Sm}^{-1}$ e espessura de 9 m, seria possível conseguir uma calibração com erro inferior a 1% para as frequências abaixo de 10 kHz, com a



(a)

(b)



(a)

(b)

Figura 4: Desvio do campo magnético em função da frequência, parametrizado para diferentes raios da bobina transmissora, modelo de duas camadas

Figura 5: Desvio do campo magnético em função da frequência elevando-se as bobinas receptora e transmissora a uma altura h=0 m, h=2 m e h=4 m

bobina geradora circular com raio de 7 m.

AGRADECIMENTOS

Vinicius Lemos agradece à bolsa de estudos do sistema PRH08-ANP/MCT.

REFERÊNCIAS

Anderson, W. L., 1975, Improved digital filters for evaluating Fourier and Hankel transform integrals: Nat. Tech. Inf. Serv. Rep., pages 242–800.

Dias, C. A., 1968, A non-grounded method for measuring induced electrical polarization and conductivity: Ph.D. thesis, University of California, Berkeley.

Sato, H. K., 1979, Método eletromagnético para interpretação de polarização induzida e resistividade, usando o protótipo de um sistema a multifrequência: Master's thesis, Universidade Federal da Bahia, Salvador, Brasil.

Ward, S. H., and Hohmann, G. W., 1998, Electromagnetic theory for geophysical applications: Electromagnetic methods in applied geophysics.