

ESTUDO COMPARATIVO DAS TÉCNICAS ASSINTÓTICAS MAIS UTILIZADAS NA INTERPRETAÇÃO DE SONDAGENS MAGNETOTELÚRICAS

R.G.N. Ramos e E.E.S. Sampaio

BPP/DAEE/IPT - Rua Benedito M. Faria, 40, 17522-670, Marília, SP, Brasil

PPPG/UFBA, Instituto de Geociências, Campus Universitário da Federação
40210-350, Salvador, BA, Brasil

O problema inverso magnetotelúrico para modelos geoeletricos unidimensionais pode ser investigado através de técnicas assintóticas, fundamentadas nas propriedades analíticas da função-resposta da indução geomagnética. Entre as técnicas mais utilizadas, escolhemos as de Niblett, de Schmucker e de Bostick para fazer uma análise comparativa na inversão de cinco modelos sintéticos. Empregamos as variações da resistividade elétrica aparente, em função do período, para determinar os valores funcionais da resistividade elétrica versus profundidade, com o auxílio da função derivada correspondente. Como não há diferença fundamental entre as transformadas de Bostick e de Niblett, propomos o termo Transformação de Bostick-Niblett para designar a inversão assintótica na qual o cálculo da resistividade elétrica é baseado na inclinação da curva de resistividade elétrica, sem utilizar dados de fase para estimar esta inclinação. Os resultados da análise comparativa entre a Transformação de Bostick-Niblett e a técnica de Schmucker, através de modelos sintéticos, mostram que a primeira apresenta vantagens sobre a segunda; principalmente por determinar, com menor erro, os valores de resistividade elétrica e de profundidade de topo das camadas mais resistivas.

COMPARATIVE STUDY OF THE MAJOR ASYMPTOTIC METHODS USED IN THE INTERPRETATION OF MANETOTELLURIC SOUNDINGS *The magnetotelluric inverse problem for one-dimensional geoelectric models can be dealt with asymptotic methods which are based on the analytic properties of the geomagnetic induction response function. Among those techniques we choose to investigate the Niblett, Schmucker and Bostick approaches, applying them in the inversion of five synthetic models. We employed the variation of the apparent electrical resistivity, as a function of the period, to determine the variation of the resistivity with depth, as well as the variation of the correspondent derivative function. Since there is no fundamental distinction between the Bostick and the Niblett approaches, we propose the term Bostick-Niblett Transformation to designate the inversion in which the resistivity computation is based on the inclination of the apparent resistivity curve without employing phase data to estimate this inclination. The results of the comparative analysis between the Bostick-Niblett Transformation and the Schmucker approximation, using synthetic models, indicate that the former is advantageous over the latter, mainly because it defines with a smaller error the values of electrical resistivity and depth to the top of the more resistive layers.*

INTRODUÇÃO

O principal objetivo das sondagens magnetotelúricas (SMT) é determinar a espessura e a resistividade elétrica das camadas em meios horizontalmente estratificados, a partir da inversão das curvas de resistividade elétrica aparente e de fase. Essas curvas são obtidas através da medida do espectro de frequências para a impedância, que é a razão entre as intensidades das componentes tangenciais do campo elétrico e do campo magnético, mutuamente perpendiculares em um ponto de observação da superfície. A teoria básica do problema direto das SMT para um meio horizontalmente estratificado (1D) encontra-se descrito em Cagniard (1953), enquanto Whittall e Oldenburg (1992) apresentam e analisam os diferentes grupos de métodos de inversão 1D das SMTs.

Entre os grupos de métodos de inversão 1D encontram-se os métodos assintóticos. Fundamentados nas propriedades analíticas da função-resposta da indução geomagnética, são também conhecidos como técnicas de inversão direta, pois dispensam o cálculo de modelos teóricos (Weidelt, 1972). Schmucker e Jankowski (1972) sintetizam o grande progresso ocorrido, a partir da década de 1960, na resolução do problema inverso 1D através de métodos diretos. Eles são particularmente úteis por causa da simplicidade computacional, podendo delinear rapidamente as principais feições da estrutura geoeletrica e fornecer os parâmetros para um modelo inicial necessário à inversão por ajuste automático, ou até mesmo, dependendo dos objetivos da SMT, constituir-se no resultado final da interpretação dos dados (Goldberg e Rotstein, 1982). Segundo Jones (1983) as técnicas assintóticas mais empregadas são: a aproximação de Niblett (Niblett e Sayn-Wittgenstein, 1960); a técnica de Schmucker (Schmucker, 1970); e a transformação de Bostick (Bostick, 1977). A transformação de Niblett é mais empregada na Europa Oriental e CEI, enquanto as de Schmucker e de Bostick são mais empregadas na Europa Ocidental e América

do Norte.

No Brasil, os principais estudos de SMT para fins exploratórios encontram-se descritos em Ohofugi e Figueira (1982); Ohofugi (1982); Stanley, Saad e Ohofugi (1985); Silva, Sampaio e Hoover (1986); Oliveira e Fontes (1991); Lugão e Fontes (1991). Nos três primeiros, apenas a transformação de Bostick é mencionada como um passo importante na interpretação 1D para o estabelecimento do modelo inicial da inversão por ajuste automático. Os três últimos empregam a Transformação de Bostick-Niblett na interpretação dos dados de SMT.

O objetivo do presente trabalho é realizar um estudo comparativo entre as técnicas assintóticas mais utilizadas para verificar as vantagens e desvantagens de cada uma delas e procurar estabelecer qual apresenta melhor desempenho. A análise comparativa entre Bostick e Niblett foi baseada na literatura geofísica disponível. A análise comparativa desta com a de Schmucker foi realizada com base em modelos sintéticos. Nesta análise, os contatos geoeletricos dos modelos sintéticos foram associados aos pontos de inflexão das curvas de resistividade versus profundidade. Para facilitar a visualização e a determinação precisa dos pontos de inflexão, foram calculadas também as curvas derivadas correspondentes. Como nem todo ponto de inflexão pode ser associado a um contato geoeletrico, devido a aspectos relacionados ao comportamento assintótico das curvas de resistividade elétrica aparente, são feitas algumas considerações sobre o tipo de associação ponto de inflexão-contato geoeletrico, dado pelas seqüências típicas de pontos de máximo e de mínimo das curvas derivadas, em função das seqüências típicas de três camadas A, Q, H e K.

A EQUIVALÊNCIA ENTRE BOSTICK E NIBLETT

A técnica assintótica de Niblett (Niblett e Sayn-Wittgenstein, 1960) foi a primeira proposta. A con-

dutividade elétrica foi estimada em função da profundidade a partir de medidas do potencial elétrico e do campo magnético na superfície, com base nas equações de Maxwell e considerando as mesmas aproximações feitas por Cagniard (1953). A condutividade elétrica efetiva é definida como o valor médio da condutividade elétrica real desde a superfície da Terra até a profundidade de penetração D . Desse modo, pela técnica de Niblett, a condutividade elétrica $\sigma_N(D)$, e a profundidade D , são dadas por:

$$\sigma_N = D \frac{d\sigma_a}{dD} + \sigma_a \quad (1)$$

e

$$D = \sqrt{\frac{\rho_a}{\omega\mu}}, \quad (2)$$

onde: $\mu = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$ henry/m é a permeabilidade magnética no espaço livre, $\omega = 2 \cdot \pi f$ é a frequência angular e $\rho_a = 1/\sigma_a$ é a resistividade elétrica aparente.

Bostick (1977) propôs um método aproximativo para o modelamento dos dados de SMT baseado no comportamento assintótico das curvas de resistividade elétrica aparente, ρ_a , na parte de baixa frequência, considerando dois casos de um modelo de duas camadas. No primeiro modelo a camada do topo sobrepõe-se a um substrato perfeitamente condutor de espessura infinita. Pode-se demonstrar (Kaufman e Keller, 1981, p. 80) que a assíntota de ρ_a depende somente da profundidade, D , do topo do substrato e independe da condutividade elétrica da primeira camada,

$$\rho_a = \omega\mu D^2. \quad (3)$$

No segundo caso, a primeira camada tem a mesma condutividade elétrica do modelo anterior, mas o substrato de espessura infinita é um isolante perfeito. Pode-se também demonstrar (Kaufman e Keller, 1981, p. 79) que a assíntota aumenta na proporção inversa da frequência, com o coeficiente

de proporcionalidade contendo $1/S$, onde S é a condutância longitudinal,

$$\rho_a = \frac{1}{\omega\mu} \cdot \frac{1}{S^2}. \quad (4)$$

A base da análise assintótica de Bostick está fundamentada em expressar cada valor de resistividade elétrica em termos das equações (3) e (4), que descrevem a intersecção das assíntotas. Estas equações podem ser resolvidas simultaneamente, eliminando-se $\omega\mu$. Portanto, levando em conta que $S = \int_0^D \sigma(z) dz$, obtém-se:

$$\rho_a = \frac{D}{\int_0^D \sigma(z) dz}. \quad (5)$$

Desse modo, a resistividade elétrica aparente, ρ_a , em qualquer frequência, depende somente da condutância longitudinal do meio em profundidades menores do que D . O problema direto pode ser resolvido de forma bastante rápida, segundo esta aproximação da intersecção das assíntotas, tanto gráfica como analiticamente.

A aproximação de Bostick também fornece um procedimento simples e direto para o problema inverso. Como:

$$\sigma = \frac{dS/d\omega}{dD/d\omega}, \quad (6)$$

pode-se obter a seguinte expressão:

$$\sigma = \frac{1}{\rho_a} \cdot \frac{1 + \frac{d \log(\rho_a)}{d \log(\omega)}}{1 - \frac{d \log(\rho_a)}{d \log(\omega)}}. \quad (7)$$

Desse modo, substituindo $d \log(\omega)$ por $-d \log(T)$, a resistividade elétrica de Bostick, ρ_B , é dada por:

$$\begin{aligned} \rho_B(D) &= \rho_a \cdot \frac{1 + \frac{d \log(\rho_a)}{d \log(T)}}{1 - \frac{d \log(\rho_a)}{d \log(T)}} \\ &= \rho_a \cdot \frac{1 + m(T)}{1 - m(T)}, \end{aligned} \quad (8)$$

onde $m(T)$ é o gradiente da curva de resistividade elétrica aparente versus período, T , em escala log-log. Assim, a partir de uma curva sintética de resistividade elétrica aparente, é determinada a função resistividade elétrica versus profundidade através das

equações (3) e (8). Em curvas obtidas com dados reais, as dispersões inevitáveis nos dados provocam o aparecimento de irregularidades na curva de Bostick. Normalmente, nestes casos, as curvas são suavizadas, eliminando as inclinações maiores do que 45° . No entanto, estas distorções na inversão de curvas experimentais podem ser bastante reduzidas quando o termo derivativo da equação (8) é estimado através das medidas de fase, ϕ . A equação dada por Bostick (1977),

$$\frac{d\log(\rho_a)}{d\log(\omega)} = \frac{4\phi}{\pi} - 1, \quad (9)$$

é obtida através da transformação de Hilbert e equivale à aproximação de fase de Weidelt (1972). A resistividade,

$$\tilde{\rho}_B(D) = \rho_a \left(\frac{\pi}{2\phi} - 1 \right), \quad (10)$$

é obtida substituindo a equação (9) na equação (8). A aplicação das equações (10) e (3) permite efetuar a inversão ponto a ponto das curvas resistividade elétrica aparente e de fase experimentais, em curvas de resistividade elétrica versus profundidade, preservando as características originais dos dados (Goldberg e Rotstein, 1982). Murakami (1985), com base na transformação de Bostick e na definição do conceito de pseudo-profundidade, também estabeleceu uma nova apresentação para as curvas de SMT muito importante para a interpretação, especialmente para estudos de equivalência e detectabilidade.

A comparação entre as equações (1) e (8) mostra que a transformação de Bostick e a aproximação de Niblett fornecem uma distribuição resistividade elétrica versus profundidade, $\rho_B(D)$ e $\rho_N(D)$, onde D é a "profundidade de penetração" correspondente a um semi-espaco de resistividade elétrica igual à resistividade elétrica em um determinado período, T , definida por:

$$D = \sqrt{\frac{\rho_a T}{2\pi\mu}}. \quad (11)$$

Van'yan et alii (1980) apresentam uma formulação para a transformação de Niblett que envolve a estimativa do gradiente de $\log(\rho_a)$ versus $\log(\sqrt{T})$.

A fórmula estabelecida com base nas equações (1) e (11) é a seguinte:

$$\rho_N(D) = \sigma_a^{-1} \cdot \frac{2 + \frac{d\log(\rho_a)}{d\log\sqrt{T}}}{2 - \frac{d\log(\rho_a)}{d\log\sqrt{T}}}. \quad (12)$$

Multiplicando o numerador e o denominador da equação (12) por 1/2, obtém-se:

$$\begin{aligned} \rho_N(D) &= \rho_a \cdot \frac{1 + \frac{d\log(\rho_a)}{d\log(T)}}{1 - \frac{d\log(\rho_a)}{d\log(T)}} \\ &= \rho_a \cdot \frac{1 + m(T)}{1 - m(T)}. \end{aligned} \quad (13)$$

Portanto, a comparação entre as equações (8) e (13) mostra que $\rho_B(D) = \rho_N(D)$ para todas as profundidades D , conforme demonstrado por Jones (1983). Desse modo, no presente trabalho é proposto o termo Transformação de Bostick-Niblett para designar a inversão direta, cuja resistividade elétrica é baseada no cálculo da inclinação da curva de resistividade elétrica aparente, segundo a equação (13), quando os dados de fase não são utilizados para estimar esta inclinação, e a profundidade de penetração é estimada pela equação (11).

A TÉCNICA DE SCHMUCKER

A partir do estudo de um modelo de duas camadas, onde um substrato de condutividade elétrica σ_c é sobreposto por uma camada pouco condutora de espessura, h , Schmucker (1970, 1973) obteve a seguinte expressão para a impedância elétrica na superfície, Z , em função da frequência:

$$Z = \omega\mu \left(\frac{\delta_c}{2} + i \left(h + \frac{\delta_c}{2} \right) \right), \quad (14)$$

onde $\delta_c = (\omega\mu\sigma_c/2)^{-1/2}$ é a profundidade de pele. A profundidade e a condutividade elétrica podem ser determinadas a partir de (14) como:

$$h = (\omega\mu)^{-1} (\Im(Z) - \Re(Z)) \quad (15)$$

e

$$\sigma_c = \frac{\omega\mu}{2 \cdot \Re(Z)^2}. \quad (16)$$

A fase de Z varia entre $\pi/4$ sobre uma camada condutora uniforme na profundidade zero e $\pi/2$ sobre um condutor ideal em qualquer profundidade. A parte imaginária de Z reflete a profundidade média das correntes internas induzidas, enquanto que tanto a parte real como a parte imaginária de Z indicam, através de δ_c , a condutividade ambiente àquela profundidade. Desse modo, Schmucker (1970) denominou:

$$z^* = h + \frac{\delta_c}{2}, \quad (17)$$

“profundidade de uma camada condutora ideal substituída”.

A inversão foi generalizada a partir destes resultados, considerando que a impedância elétrica sobre um meio horizontalmente estratificado tenha sido medida. Aplicando as equações (15) e (16) para as impedâncias correspondentes às várias frequências medidas, são obtidas, para cada uma das frequências, a profundidade e a condutividade elétrica de uma camada uniforme equivalente. Tudo funciona como se o substrato estratificado fosse substituído por uma camada condutora à profundidade h . Esta substituição é válida somente quando a fase varia entre $\pi/4$ e $\pi/2$, pois nesta faixa o valor de h obtido é sempre positivo. Neste caso a profundidade descrita pela equação (17) é sempre positiva ou zero, pois a fase não pode ser menor do que zero. Assim, para qualquer valor da fase entre $\pi/4$ e $\pi/2$, é possível interpretar a componente fora de fase da impedância elétrica, em termos de uma camada condutora ideal equivalente na profundidade:

$$z^* = (\omega\mu)^{-1} \Im(Z) \quad (18)$$

ou

$$z^* = \sqrt{\frac{T\rho_a}{2\pi\mu}} \sin(\phi). \quad (19)$$

Já a componente em fase da impedância elétrica fornece, a partir da equação (16), a resistividade elétrica modificada, ρ_S , através das seguintes expressões:

$$\rho_S(z^*) = 2(\omega\mu)^{-1} \Re(Z)^2, \quad \pi/4 \leq \phi \leq \pi/2, \quad (20)$$

ou

$$\rho_S(z^*) = 2\rho_a \cos^2(\phi), \quad \pi/4 \leq \phi \leq \pi/2, \quad (21)$$

e de acordo com Weidelt et alii (1980),

$$\rho_S(z^*) = \frac{\rho_a}{2 \sin^2(\phi)}, \quad 0 \leq \phi \leq \pi/4. \quad (22)$$

Assim, a representação de z^* versus ρ_S , calculada para diversos valores de frequências, define a aproximação de Schmucker para a distribuição da resistividade elétrica real para qualquer curva de resistividade elétrica e de fase de uma SMT.

ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE AS TÉCNICAS DE SCHMUCKER E DE BOSTICK-NIBLETT

A relação entre a profundidade calculada pela técnica de Bostick, D , e a profundidade calculada pela técnica de Schmucker, z^* , pode ser estabelecida comparando as equações (11) e (19), de onde se conclui que:

$$z^* = D \cdot \sin(\phi). \quad (23)$$

A equação (23) indica que, para um determinado período, z^* é menor do que D e as duas tendem a igualar-se à medida que o argumento da impedância elétrica se aproxima de $\pi/2$.

Para uma análise comparativa de caráter geral, foi adotada a seguinte metodologia: Primeiramente, curvas de ρ_a e de ϕ versus T foram geradas para quatro modelos teóricos de três camadas e um de cinco camadas. Foram considerados um modelo para cada seqüência típica de três camadas e um modelo de cinco camadas sugeridos por Kaufman e Keller (1981), conforme ilustrado na Tabela 1.

O cálculo do modelo direto foi efetuado com o algoritmo de Vozoff e Jupp (1975). As curvas geradas foram submetidas a um processo de inversão segundo as técnicas de Bostick-Niblett e de Schmucker. Na inversão de Bostick-Niblett, o cálculo numérico de $m(T)$ foi estabelecido considerando a inclinação da

Tabela 1. Modelos de camadas horizontais empregados na análise comparativa. A denominação de A, Q, H, K e HKH está de acordo com a classificação usual das SMTs.

Horizontal layer models employed in the comparative analysis. The denominations A, Q, H, K, and HKH is in agreement with the usual classification of magnetotelluric sounding curves.

Tipo de Modelo	Resistividade (ohm · m)					Espessura (m)			
	ρ_1	ρ_2	ρ_3	ρ_4	ρ_5	E_1	E_2	E_3	E_4
A	1	20	333			1	500		
Q	1	0,05	0,025			1	15		
H	1	0,052	100000			1	24		
K	1	20	0,00001			1	171		
HKH	200	20	200	15	1000	10	200	1000	4000

tangente à curva no ponto médio entre dois pontos consecutivos, como a inclinação da secante entre dois pontos,

$$m(T) = \frac{\rho_a(\ell + 1) - \rho_a(\ell)}{T(\ell + 1) - T(\ell)}, \quad (24)$$

com ℓ que varia de 1 até $n - 1$ pontos. As curvas $\rho_B \times D$ e $\rho_S \times z^*$ obtidas foram confrontadas com as respectivas curvas de resistividade elétrica real dos modelos, em gráficos log-log.

Para auxiliar a análise quantitativa foram também calculadas e representadas em gráficos mono-log as respectivas curvas derivadas, $\rho'_B \times D$ e $\rho'_S \times z^*$, onde:

$$\rho'_B = \frac{\log(\rho_B(k + 1)) - \log(\rho_B(k))}{\log(D(k + 1)) - \log(D(k))} \quad (25)$$

e

$$\rho'_S = \frac{\log(\rho_S(k + 1)) - \log(\rho_S(k))}{\log(z^*(k + 1)) - \log(z^*(k))} \quad (26)$$

Através dos pontos de máximo e de mínimo obtidos nas curvas derivadas, é possível correlacionar os pontos de inflexão das curvas resistividade elétrica versus profundidade correspondentes aos contatos entre as camadas. Ao lado dos pontos de inflexão foi lançada a porcentagem de erro obtida entre a profundidade dos contatos, calculada pela inversão e aquela do modelo sintético correspondente. As figuras de 1 a 5 sintetizam a análise comparativa entre as técnicas de Schmucker e de Bostick-Niblett para os modelos A, Q, H, K e HKH. Elas contêm: as cur-

vas de resistividade elétrica (bi-log) e de fase (mono-log) em função do período; a variação da resistividade de Bostick-Niblett (bi-log) e da sua derivada (mono-log) em função da profundidade; e a variação da resistividade elétrica de Schmucker (bi-log) e da sua derivada (mono-log) em função da profundidade. Encontram-se também indicadas: a curva de resistividade elétrica real (bi-log) de cada modelo estudado; a porcentagem de erro obtida na determinação da profundidade pelo ponto de inflexão em relação à profundidade dada pelo modelo; e a seqüência típica de máximos e mínimos da curva derivada que auxilia na visualização dos contatos geoeletricos.

A análise para ambos os métodos mostra que, quanto maior for a condutividade elétrica relativa da camada, melhor será a aproximação do ponto de mínimo da curva de resistividade elétrica versus profundidade ao valor real da sua resistividade elétrica e melhor será a precisão do cálculo da sua profundidade de topo. Essas profundidades correspondem aos pontos de inflexão dos trechos decrescentes das curvas, que estão relacionados aos valores de fase que variam entre $\pi/4$ e $\pi/2$. Desse modo, elas podem ser calculadas com erro inferior a 13% pelos dois métodos.

Porém, considerando também os dois métodos, a precisão do cálculo da profundidade do topo das camadas resistivas é bem menor. O topo dessas camadas, nas curvas de resistividade elétrica versus pro-

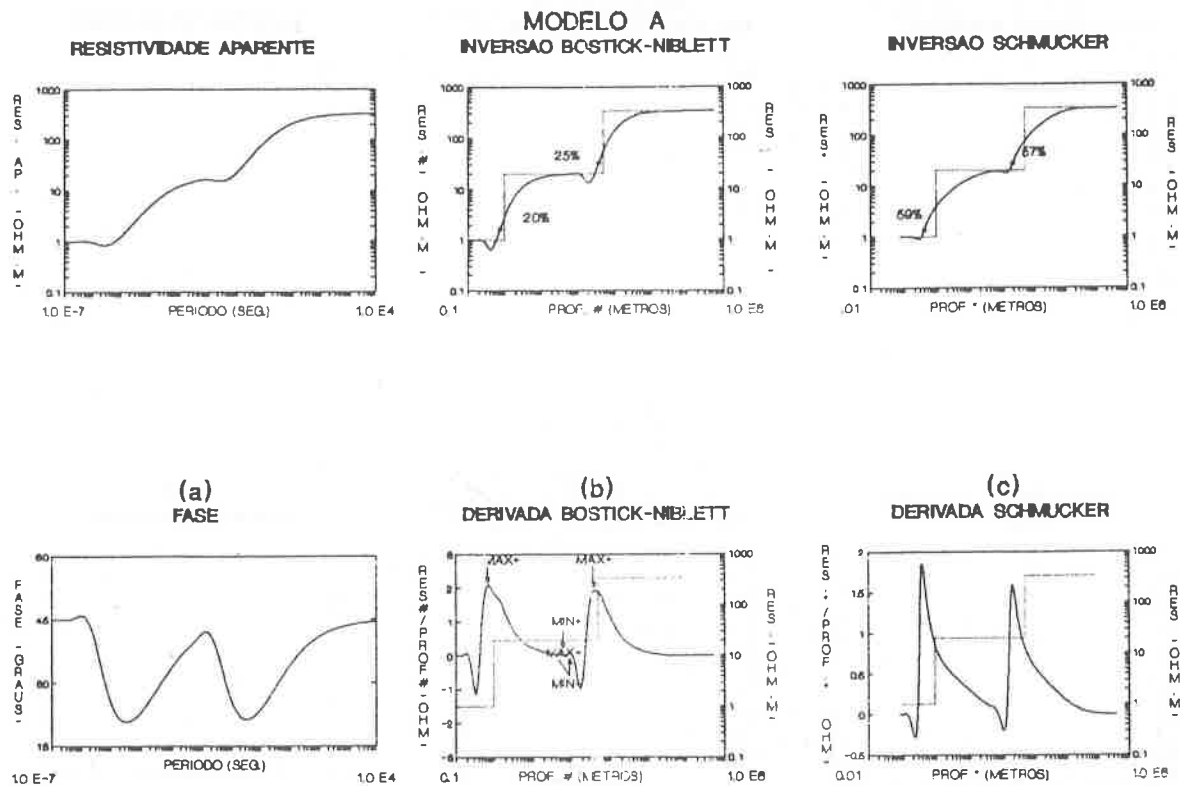


Figura 1. Análise comparativa entre as técnicas de Schmucker e de Bostick-Niblett para o modelo do Tipo A: ($\rho_1 = 1$, $\rho_2 = 20$, $\rho_3 = 333$, $E_1 = 1$ e $E_2 = 500$). As linhas tracejadas indicam a resistividade real do modelo, as porcentagens indicam o erro na interpretação da profundidade, empregando pontos de inflexão, e o significado dos pontos de máximo e mínimo encontra-se descrito na Tab. 2.

Comparative analysis between the Schmucker and the Bostick-Niblett techniques for the model type A: ($\rho_1 = 1$, $\rho_2 = 20$, $\rho_3 = 333$, $E_1 = 1$ e $E_2 = 500$). The dashed lines indicate the actual resistivity of the model, the percentages indicate the error in the interpretation of the depth employing the inflection points, and the meaning of the points of maximum and minimum is described in Table 2

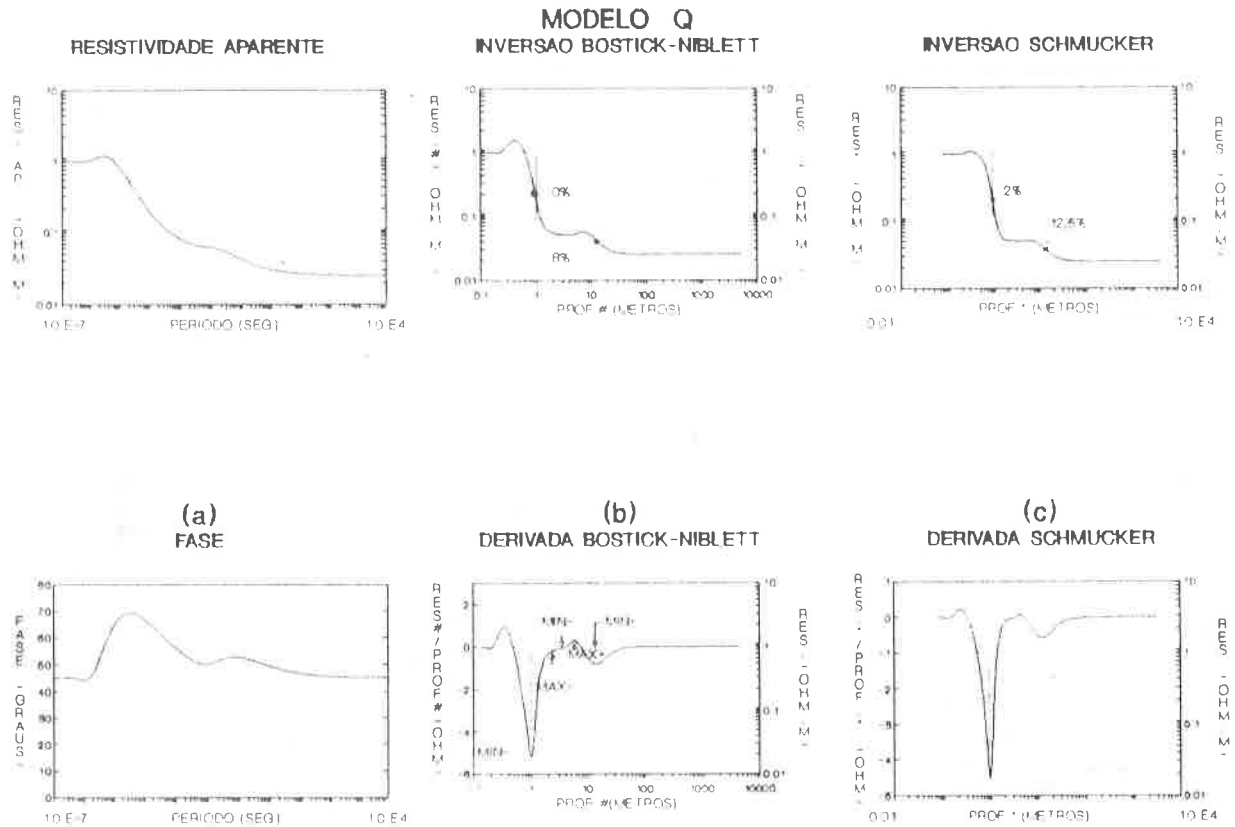


Figura 2. Análise comparativa entre as técnicas de Schmucker e de Bostick-Niblett para o modelo do Tipo Q: ($\rho_1 = 1$, $\rho_2 = 0.05$, $\rho_3 = 0.025$, $E_1 = 1$ e $E_2 = 15$). As linhas tracejadas indicam a resistividade real do modelo, as porcentagens indicam o erro na interpretação da profundidade, empregando pontos de inflexão, e o significado dos pontos de máximo e mínimo encontra-se descrito na Tab. 2.

Comparative analysis between the Schmucker and the Bostick-Niblett techniques for the model type Q: ($\rho_1 = 1$, $\rho_2 = 0.05$, $\rho_3 = 0.025$, $E_1 = 1$ e $E_2 = 15$). The dashed lines indicate the actual resistivity of the model, the percentages indicate the error in the interpretation of the depth employing the inflection points, and the meaning of the points of maximum and minimum is described in Table 2.

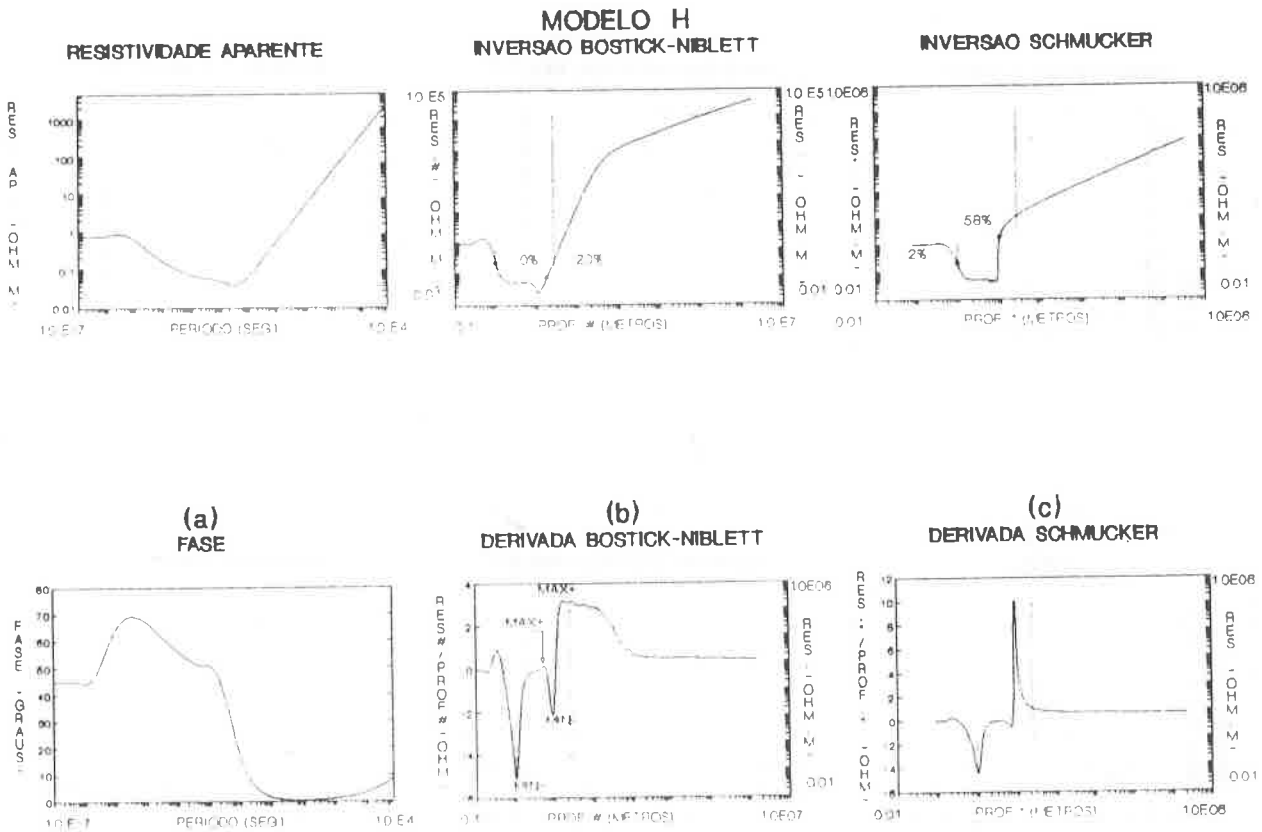


Figura 3. Análise comparativa entre as técnicas de Schmucker e de Bostick-Niblett para o modelo do Tipo H: ($\rho_1 = 1$, $\rho_2 = 0.052$, $\rho_3 = 100000$, $E_1 = 1$ e $E_2 = 24$). As linhas tracejadas indicam a resistividade real do modelo, as porcentagens indicam o erro na interpretação da profundidade, empregando pontos de inflexão, e o significado dos pontos de máximo e mínimo encontra-se descrito na Tab. 2.

Comparative analysis between the Schmucker and the Bostick-Niblett techniques for the model type H: ($\rho_1 = 1$, $\rho_2 = 0.052$, $\rho_3 = 100000$, $E_1 = 1$ e $E_2 = 24$). The dashed lines indicate the actual resistivity of the model, the percentages indicate the error in the interpretation of the depth employing the inflection points, and the meaning of the points of maximum and minimum is described in Table 2.

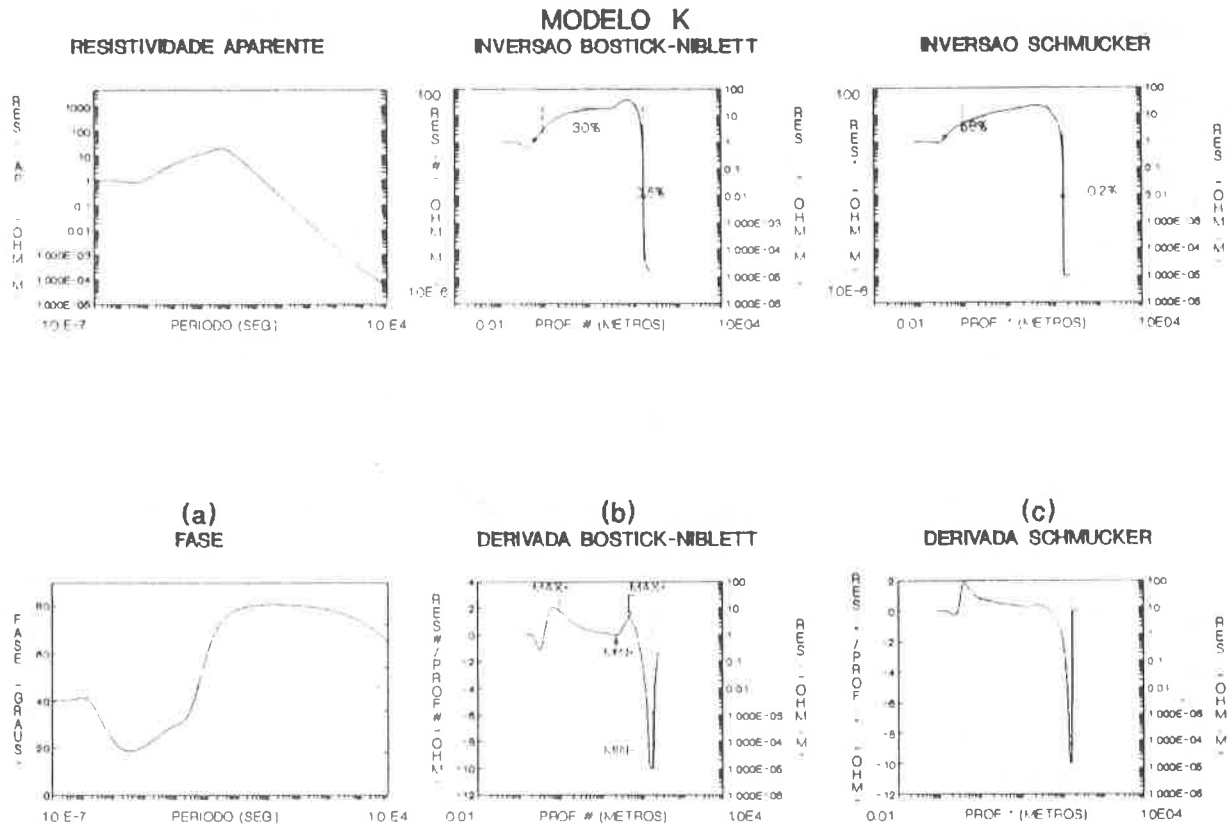


Figura 4. Análise comparativa entre as técnicas de Schmucker e de Bostick-Niblett para o modelo do Tipo K: ($\rho_1 = 1$, $\rho_2 = 20$, $\rho_3 = 0.00001$, $E_1 = 1$ e $E_2 = 171$). As linhas tracejadas indicam a resistividade real do modelo, as porcentagens indicam o erro na interpretação da profundidade, empregando pontos de inflexão, e o significado dos pontos de máximo e mínimo encontra-se descrito na Tab. 2.

Comparative analysis between the Schmucker and the Bostick-Niblett techniques for the model type K: ($\rho_1 = 1$, $\rho_2 = 20$, $\rho_3 = 0.00001$, $E_1 = 1$ e $E_2 = 171$). The dashed lines indicate the actual resistivity of the model, the percentages indicate the error in the interpretation of the depth employing the inflection points, and the meaning of the points of maximum and minimum is described in Table 2.

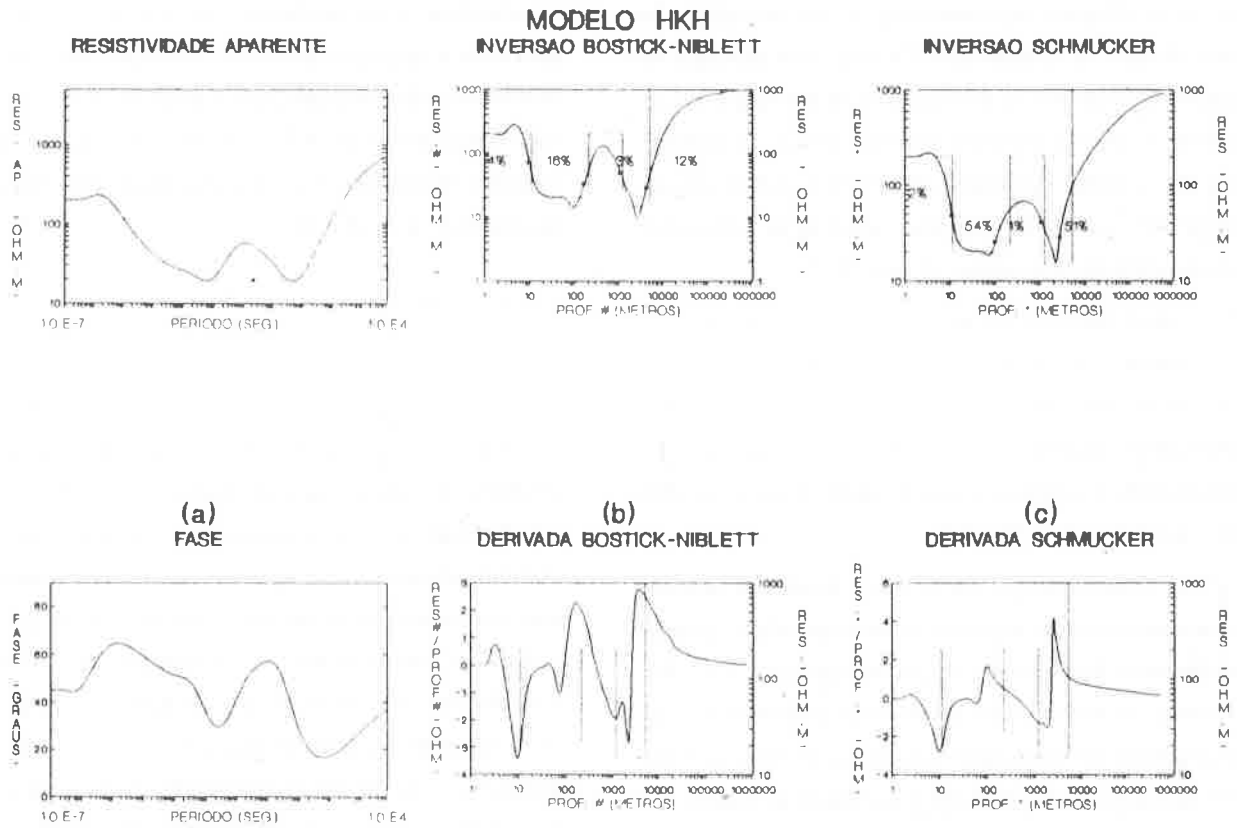


Figura 5. Análise comparativa entre as técnicas de Schmucker e de Bostick-Niblett para o modelo do Tipo HKH: ($\rho_1 = 200, \rho_2 = 20, \rho_3 = 200, \rho_4 = 15, \rho_5 = 1000, E_1 = 10, E_2 = 200, E_3 = 1000$ e $E_4 = 4000$). As linhas tracejadas indicam a resistividade real do modelo, as porcentagens indicam o erro na interpretação da profundidade, empregando pontos de inflexão, e o significado dos pontos de máximo e mínimo encontra-se descrito na Tab. 2.

Comparative analysis between the Schmucker and the Bostick-Niblett techniques for the model type HKH: ($\rho_1 = 200, \rho_2 = 20, \rho_3 = 200, \rho_4 = 15, \rho_5 = 1000, E_1 = 10, E_2 = 200, E_3 = 1000$ e $E_4 = 4000$). The dashed lines indicate the actual resistivity of the model, the percentages indicate the error in the interpretation of the depth employing the inflection points, and the meaning of the points of maximum and minimum is described in Table 2

fundidade, corresponde ao ponto de inflexão dos trechos crescentes das curvas que estão relacionados aos valores de fase que variam entre 0 e $\pi/4$. Mesmo assim, as profundidades dos topos calculadas pela técnica de Bostick-Niblett, para os casos estudados, são sensivelmente mais precisas do que as calculadas pela técnica de Schmucker. De fato, nos modelos estudados, enquanto as profundidades dos topos de camadas resistivas calculadas pela técnica de Bostick-Niblett apresentam erros menores do que 30%, as profundidades estabelecidas pela técnica de Schmucker apresentam erros maiores do que 30%.

Além disso, os valores extremos da resistividade de Bostick-Niblett são mais próximos do valor exato da resistividade da camada, do que os valores correspondentes obtidos com a técnica de Schmucker. Tal característica torna-se mais evidente para o modelo de cinco camadas (Fig. 5).

A transformação de Bostick-Niblett é normalmente considerada superior à de Schmucker, quando os dados de fase não são confiáveis (Jones, 1983). Entretanto, os resultados aqui obtidos mostram que, independente da qualidade dos dados de fase, a transformação de Bostick-Niblett se mantém superior à de Schmucker, principalmente quanto à aproximação obtida para a resistividade elétrica e para a profundidade de camadas resistivas.

ASSOCIAÇÃO ENTRE CONTATO GEOELÉTRICO E PONTO DE INFLEXÃO

A análise comparativa baseou-se na associação entre os contatos geoeletricos e os pontos de inflexão das curvas resistividade elétrica versus profundidade. Estes pontos de inflexão, pontos de mudança na direção da concavidade da curva, correspondem a pontos de máximo ou de mínimo nas curvas derivadas. As derivadas positivas correspondem aos ramos das curvas em que a resistividade elétrica cresce com a profundidade, as derivadas negativas correspondem aos ramos das curvas em que a resis-

tividade elétrica decresce com a profundidade e as derivadas nulas correspondem aos pontos de máximo ou de mínimo das curvas. Portanto, as curvas derivadas facilitam a visualização e a determinação dos pontos de inflexão. A identificação dos contatos geoeletricos seria facilitada, caso fosse possível associá-los a qualquer ponto de inflexão. No entanto, isto não ocorre sempre, por causa de dois aspectos das curvas de resistividade elétrica MT: seu comportamento oscilatório e o comportamento específico das curvas dos tipos A e Q.

Comportamento Oscilatório

Na faixa de baixo período, a curva de resistividade elétrica aproxima-se assintoticamente da resistividade elétrica da primeira camada de maneira oscilatória. Contudo, as amplitudes das oscilações, que são diretamente proporcionais ao contraste de resistividade elétrica e de espessura da primeira camada, são relativamente pequenas. Elas tornam-se progressivamente menores com a diminuição do período e manifestam-se mais como um máximo (quando $\rho_2 \leq \rho_1$), ou como um mínimo (quando $\rho_1 \leq \rho_2$), na parte inicial das curvas de resistividade elétrica aparente. Comportamento similar ocorre na parte da curva correspondente à transição da influência de ρ_2 para ρ_3 . Para uma família de curvas, onde se varia apenas a espessura da segunda camada, quanto maior for esta, maior será o efeito do comportamento assintótico oscilatório na transição da influência de ρ_2 para ρ_3 . À medida que a espessura diminui, a intensidade do efeito também diminui, tornando as curvas MT bastante semelhantes às de sondagem elétrica DC, arranjo Schlumberger (Kaufman e Keller, 1981, pp. 89-92).

O comportamento das curvas de resistividade elétrica e as duas inversões nos modelos A, Q, H e K, consideradas na análise comparativa, mostram que a parte esquerda das curvas, onde a influência da segunda camada é pequena, coincide com a de

um meio de duas camadas definidas pelos parâmetros ρ_1 , ρ_2 e E_1 . Portanto, apresentam os máximos e mínimos que caracterizam o efeito do comportamento oscilatório. O comportamento das partes finais das curvas também é similar ao das curvas de duas camadas onde a última camada tem a resistividade elétrica ρ_3 . Como as curvas das figuras de 1 a 5 foram baseadas em modelos com espessuras relativamente grandes para a segunda camada, o efeito do comportamento oscilatório na parte correspondente à transição da influência de ρ_2 para ρ_3 é bastante pronunciado. Quando as curvas derivadas são calculadas, estes efeitos correspondem às seqüências de pontos de máximo e de mínimo típicas para cada seqüência típica de três camadas, entre os pontos de máximo e de mínimo que definiriam os contatos geoeletricos, conforme ilustrado nas figuras correspondentes.

Com o intuito de facilitar a interpretação, e definir os verdadeiros contatos geoeletricos para modelos com mais de três camadas, por meio da Transformação de Bostick-Niblett, utilizando as curvas derivadas como auxílio na visualização e na determinação dos pontos de inflexão, foi elaborada a Tabela 2. Esta tabela sintetiza o tipo de associação ponto de inflexão-contato geoeletrico, dado pelas seqüências típicas de pontos de máximo e de mínimo das curvas derivadas, em função das seqüências típicas de três camadas. Além disso, sintetiza também as seqüências típicas, quando o efeito oscilatório na parte correspondente à transição da influência de ρ_2 para ρ_3 é ausente, ou não tem uma amplitude de sinal suficiente para ser distinguido de outras fontes de ruído.

Comportamento Específico das Curvas dos Tipos A e Q

Nas curvas do tipo A e Q, mesmo na ausência do efeito do comportamento oscilatório, existe um ponto de mínimo positivo (A) ou de máximo negativo (Q), que corresponde a um falso contato geoeletrico, no

meio dos pontos de máximo positivo nas curvas do tipo A, ou de mínimo negativo nas curvas do tipo Q que definem os verdadeiros contatos geoeletricos, conforme ilustrado na Tabela 2.

CONCLUSÕES

Este trabalho apresenta uma análise comparativa das técnicas assintóticas mais utilizadas na interpretação de sondagens magnetotelúricas, o que possibilita estabelecer critérios para o tratamento do problema inverso MT unidimensional. O termo Transformação de Bostick-Niblett é proposto para designar a técnica assintótica, cujo cálculo da resistividade é baseado na inclinação da curva de resistividade elétrica aparente, sem a utilização dos dados de fase.

A análise comparativa entre a Transformação de Bostick-Niblett e a de Schmucker, através de modelos sintéticos unidimensionais, mostrou que a primeira apresenta vantagens sobre a segunda, independente da existência de dados de fase, principalmente no que concerne à aproximação da resistividade elétrica e da profundidade do topo de camadas resistivas.

O cálculo das curvas derivadas facilita a visualização e a determinação dos pontos de inflexão, os quais correspondem a pontos de máximo ou de mínimo das curvas derivadas. Os mesmos apresentam interesse, porque alguns pontos de inflexão das curvas resultantes da transformação podem ser associados a contatos geoeletricos. Para o caso de modelos unidimensionais de três camadas foi possível estabelecer o tipo de associação, real ou falsa, existente entre os dois contatos geoeletricos e a seqüência dos pontos de inflexão das curvas resultantes da transformação. Foram também definidas as causas dos pontos de inflexão que apresentam correlação falsa com os contatos geoeletricos.

O parâmetro resistividade pode ser estimado considerando os valores correspondentes aos pontos de máximo e de mínimo das curvas de Bostick-

Tabela 2. Associação ponto de inflexão-contato geoeétrico dada pelas seqüências típicas de pontos de máximo e de mínimo das curvas derivadas, em função de modelos de três camadas.

Association between maximum and minimum points of derivatives curves and the geoelectric contacts, as a function of three layer models.

Tipo de Modelo	Tipo de Associação das Curvas Derivadas							
	Efeito Oscilatório Pronunciado					Efeito Oscilatório Reduzido		
	REAL	FALSA	FALSA	FALSA	REAL	REAL	FALSA	REAL
A	MAX ⁺	MIN ⁺	MAX ⁺	MIN ⁻	MAX ⁺	MAX ⁺	MIN ⁺	MAX ⁺
Q	MIN ⁻	MAX ⁻	MIN ⁻	MAX ⁺	MIN ⁻	MIN ⁻	MAX ⁻	MIN ⁻
H	MIN ⁻	-	MAX ⁺	MIN ⁻	MAX ⁺	MIN ⁻	-	MAX ⁺
K	MAX ⁺	-	MIN ⁺	MAX ⁺	MIN ⁻	MAX ⁺	-	MIN ⁻

Niblett, separados pelos pontos de inflexão associados aos contatos geoeétricos.

AGRADECIMENTOS

Um dos autores (R. G. N. Ramos) agradece o suporte do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S/A/IPT. Ambos os autores agradecem o apoio dado pelo CNPq, pela FINEP e pela PETROBRÁS, bem como as sugestões, incorporadas ao texto, de dois revisores anônimos.

REFERÊNCIAS

- BOSTICK, F. X.** (1977) A Simple Almost Exact Method of MT Analysis. In: WORKSHOP on Electrical Methods in Geothermal Exploration. Salt Lake City, U. S. Geological Survey, Appendix, 175-177 il. (Contract: 14-08-0001-G-359).
- CAGNIARD, L.** (1953) Basic Theory of the Magnetotelluric Method of Geophysical Prospecting. Geophysics, 18: 605-635.
- GOLDBERG, S. and ROTSTEIN, Y.** (1982) A Simple form of Presentation of Magnetotelluric Data Using the Bostick Transform. Geophys. Prosp., 30: 211-216.
- JONES, A. G.** (1983) On the Equivalence of the "Niblett" and "Bostick" Transformation in the Magnetotelluric Method. Jour. of Geophys., 53: 72-73.
- KAUFMAN, A. A. and KELLER, G. V.** (1981) The Magnetotelluric Sounding Method. Amsterdam, Elsevier Scientific Publ., 583 pp. (method in Geochemistry and Geophysics, 15).
- LUGÃO, P. P. and FONTES, S. L.** (1991) Magnetotellurics on the Eastern Margin of the Recôncavo Basin, Salvador (Brazil). In: 2nd Internat. Congr. of the Brazilian Geophys. Society, Salvador, Expanded Abstracts, v. 1: 300-304.
- MURAKAMI, Y.** (1985) Two Representations of the Magnetotelluric Sounding Survey. Geophysics, 50: 161-164.
- NIBLETT, E. R. and SAYN-WITTGENSTEIN, C.** (1960) Variation of Electrical Conductivity with Depth by the Magnetotelluric Method. Geophysics, 25: 998-1008.
- OHOFUGI, W. e FIGUEIRA, E. P.** (1982) Aplicação do Método Magnetotelúrico na Bacia do Paraná - um Trabalho Pioneiro. In: Congr. Bras. de Geol., 32, Salvador, Anais SBG, v. 5: 2357-2368.

- OHOFUGI, W.** (1982)- Resolução do Método Magnetotélurico na área de Piquiri-Cantu, Bacia do Paraná. In: Geologia da Bacia do Paraná; Reavaliação da Potencialidade e Prospectividade em Hidrocarbonetos. IPT, Publicações Especiais no. 12, São Paulo.
- OLIVEIRA, M. F. B. and FONTES, S. L.** (1991) Magnetotélurica na Bacia do Parnaíba: Primeiros Resultados. In: 2nd Internat. Congr. of the Brazilian Geophys. Society, Salvador, Expanded Abstracts, v. 1: 294-299.
- SCHMUCKER, U.** (1970) Anomalies of Geomagnetic Variations in the Southwestern United States. Bull. Scripps Inst. Oceanography. San Diego, California, University of California Press, 13: 165.
- SCHMUCKER, U. and JANKOWSKI, J.** (1972) Geomagnetic Induction Studies and the Electrical State of the Upper Mantle. Tectonophysics, 13: 233-256.
- SCHMUCKER, U.** (1973) Regional Induction Studies: a Review of Methods and Results. Phys. of the Earth and Planet. Int., 7: 365-378.
- SILVA, R. W.; SAMPAIO, E. S. and HOOVER D. B.** (1986) Regional AMT Survey in the North Central Part of Bahia State. In: 56th Annual Intern. Meeting of SEG, Houston, Expanded Abstracts, 1: 97-100 .
- STANLEY, W. D.; SAAD, A. R. and OHOFUGI, W.** (1985) Regional Magnetotelluric Surveys in Hydrocarbon Exploration, Paraná Basin, Brazil. A.A.P.G. Bull, 69: 346-360, n. 3.
- VAN'YAN, L.; BERDICHEVSKIY, M.; VASIN, N.; OKULYESSKIY, B. and SHILOVSKIY, P.** (1980) On the Normal Geoelectric Profile. Izvestiya, Earth Physics, 16(2): 131-133.
- VOZOFF, K. and JUPP, D. L. B.** (1975) Joint Inversion of Geophysical data. Geophys. Jour. of R. Astr. Society, 42: 977-991.
- WEIDELT, P.** (1972) The Inverse Problem of Geomagnetic Induction. Zeitschrift fur Geophysik, 38(2): 257-290.
- WEIDELT, P.; MULLER, W.; LOSECKE, W. and KNODEL, K.** (1980) Die Bostick Transformation. In: HAAK, V. e HOMILIUS, J., Protokoll ber das Kolloquium Elektromagnetische Tiefenforschung, Berlin-Hanover: 227-230.
- WHITTALL, K. P. and OLDENBURG, D. W.** (1992) Inversion of Magnetotelluric Data for a One-Dimensional Conductivity. Tulsa, Society of Exploration Geophysicists, 114 pp., (Geophysical Monograph Series, 5).

Recebido em 14.08.90
 Versão revisada em 10.02.93
 Aceito em 12.04.93
 Editor associado Luiz Rijo