

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS GEOFÍSICAS E GEOLÓGICAS

UM SISTEMA DE AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTO DE DADOS
MAGNETOTELÚRICOS USANDO UM MINICOMPUTADOR

Tese Apresentada por
MAURICIO MIGUEL MARTINEZ MARTINEZ
como requisito parcial à obtenção do grau em
MESTRE EM CIÊNCIAS
Na área de

GEOFÍSICA

Conferido pelo Programa de Pós-Graduação em
Ciências Geofísicas e Geológicas da

Universidade Federal do Pará

Aprovado: 19.09.86

JÜRGEN H. BISCHOFF

(ORIENTADOR)

JOÃO BATISTA CORRÉA DA SILVA

NALIN BABULAL TRivedi

Comitê de Tese

T.297 - MARTINEZ, Martinez, Maurício Miguel

Um sistema de aquisição e processamento de dados magnetoteluricos usando um mini computador. Belém, UFPA/CG.

85 p.

Tese apresentada ao Centro de Geociências da Universidade Federal do Pará, para obter o grau de mestre em Ciências na área de Geofísica.

1. Geofísica-2. Geofísica-Métodos.
3. Métodos elétricos. I. Universidade Federal do Pará/Centro de Geociências. II. Título.

RESUMO**ABSTRACT**

1 INTRODUÇÃO.....	
1.1 A Revisão da Literatura.....	
1.2 Pré-Processamento.....	
1.3 Funções Repostas da Terra.....	
1.3.1 Relações Lineares dos Campos.....	
1.3.2 Obtenção dos Elementos do Tensor Z.....	
1.3.2.1 Média Sobre Bandas de Freqüência.....	
1.3.2.2 Número de Pontos Por Década de Freqüência.....	
1.3.2.3 Estimador dos Mínimos Quadrados.....	
1.3.3 Rotação do Tensor Z.....	
1.3.4 Cálculo das Barras de Erro.....	
1.3.5 Skew e Elipticidade.....	
1.3.6 Tipper.....	
1.3.6.1 Estimativas de A, B, Coerência Tipper e Erro Residual.....	
1.3.6.2 Amplitude, Fase e Skew do Tipper.....	
1.3.6.3 Estimativas da Rotação e do Ângulo σ ,.....	
1.3.7 Coerência Predita.....	
1.3.8 Pesos das Componentes Estruturais.....	
1.3.9 Resistividade e Fases Médias.....	
2 INVERSÃO	
2.1 Revisão da Literatura.....	
2.2 Modelo Direto.....	
2.3 Transformação de Bostick.....	
2.4 Transformação de Weidelt.....	
2.5 Técnicas de Inversão.....	
2.5.1 Tentativa e Erro.....	
2.5.2 Inversão Automática.....	
2.5.2.1 Pesquisa Aleatória.....	
2.5.2.2 Algoritmo de Marquardt.....	
2.5.2.3 Matriz de Resolução.....	

2.5.2.4	Matriz de Densidade de Informação.....
2.5.3	Testes Realizados.....
3	APLICAÇÃO A DADOS REAIS
3.1	Introdução.....
3.2	Processamento.....
3.3	Inversão.....
CONCLUSÕES
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS
ANEXOS

RESUMOS

O objetivo da primeira parte deste trabalho, é a descrição matemática e o desenvolvimento de algoritmos e programas, para microcomputadores, do processamento de dados dos campos elétricos e magnéticos da terra, para obter curvas de resistividade aparente; junto com a descrição dos critérios para a análise da qualidade das mesmas. A segunda parte consta da descrição, e da implementação de algoritmos e programas, de dois métodos de optimização não linear: A Pesquisa Aleatória Controlada (PAC) e o algoritmo de Marquardt; Aplicados da inversão das curvas de resistividade aparente obtidas na primeira seção. Nesta segunda parte se faz também a descrição da análise da qualidade dos modelos através destes dois métodos. Para a comprovação prática dos algoritmos e programas foram realizados testes tanto com dados sintéticos como com dados reais.

ABSTRACT

The object of the first section of this work, is the mathematical description and the development of algorithms and programs, for microcomputers, of the processing of observations of the natural electric and magnetic fields of the Earth, in the way of obtain of apparent resistivity curve, together with the description of the criterions of the analysis of the quality of this. The second section is composed of the description, and development of algorithms and programs, of two optimization nonlinear methods: The controlled Random Search (RS) and the Marquardt's Algorithm, applied to the inversion of the Apparent Resistivity curve obtained on the first section. In this second section is made too the description of the analysis of the quality of the obtained models over this two methods. For the practical comprobation of this algorithms and programs it was made testes as much with syntetic values since with real values.

1 INTRODUÇÃO

A primeira parte deste trabalho, versa sobre o processamento de dados dos campos elétricos e magnéticos naturais da Terra, para a obtenção da curva de resistividade aparente, representada pela sua amplitude e sua fase. Estabelecendo relações lineares entre estes campos, no domínio da freqüência, e com a análise de séries de tempo, obtemos o tensor impedância, através dos elementos do mesmo definem-se, não somente as resistividades aparentes xy e yx , como também uma série de critérios para a análise dos dados, como dimensionalidade da estrutura de subsuperfície, intervalos de confiança para a estimativa dos elementos do tensor e outros. As coerências também são utilizadas para qualificar os dados, junto com os pesos das componentes estruturais e as resistividades e fases médias.

A segunda parte, consiste na implementação de dois métodos de optimização não linear. O algoritmo da Pesquisa Aleatória Controlada e o Algoritmo de Marquardt. Estes dois algoritmos realizam a inversão automática do modelo, para uma terra plana, estratificada em camadas horizontais, onde a curva de resistividade aparente depende do período T (seg) e da Resistividade $\rho(\Omega.m)$ e espessura $L(m)$ de cada. Uma série de testes, realizados com um modelo sintético são apresentados. A análise das soluções para ambos os algoritmos é também apresentada e finalmente na terceira parte exemplifica-se as duas primeiras partes com uma estação da Geotransversa Andina, cujos dados aqui se apresentam com a gentil permissão do Instituto de Geofísica da Universidade Libre de Berlin na República Federal da Alemanha.

1.1 Revisão da Literatura

Cagriard (1953) baseado nas equações de Maxwell e nos conceitos dos vetores de Hertz, lançou o conceito da impedância complexa causada pela razão entre o campo magnético (H) e o campo telúrico (E), considerando uma terra homogênea isotrópica e de camadas planas e horizontais; Cantwell (1960) reconheceu a importância da resistividade anisotrópica e da heterogeneidade lateral e então introduz a noção do Tensor Impedância (Z) através das relações lineares dos campo E e H , permitindo a determi-

nação da resistividade aparente conforme descrito por Sims et al. (1971).

Vozoff (1972) recolheu num sumário as informações do processamento do tensor (artigo que é a diretriz principal do tratamento dos dados adotado nesta tese), e das Funções Resposta da Terra (FRT), sendo que Jupp e Vozoff (1976) revisaram os conceitos do Tipper dando-lhe a formulação correta.

Hermance (1973) e Griccot (1975) analizaram o processamento de dados magnetotelúricos (MT) a partir de pequenas seções dados dados de campo, escolhidas pelo critério da polarização, comparando seus resultados com os do processo dos mínimos quadrados e aconselhando este método como uma ferramenta auxiliar.

Reddy e Rankin (1974) analizaram as relações lineares dos campo como um sistema linear de múltiplas entradas, e utilizaram múltiplas coerências como parâmetros de análise.

Ferencay (1980) propôs a utilização da técnica do ajuste do valor mais frequente (ajuste-M), para a obtenção dos elementos do tensor impedância, maximizando a coerência predita como critério de convergência; conseguindo isto através do Algoritmo de Speinder (1980).

Pedersen (1982) analizou os intervalos de confiança das estimativas dos elementos do tensor Z e os erros aleatórios e de tendenciosidade nos campos.

Eggers (1982) postulou uma formulação por auto-estados, mostrando que pela análise através das FRT os parâmetros de análise são falhos em 2 graus de liberdade. Kao e Orr (1982) atacaram este mesmo programa propondo pesos para as componentes estruturais e assim medir diferentemente as suas contribuições.

1.2 Pré-Processamento

Na sondagem MT, o processamento das observações do campo para fornecer valores de resistividade aparente, envolve o problema básico de que as observações do campo são feitas como uma função do tempo, ou seja, no domínio do tempo. Por outro lado os resultados teóricos tem sido todos desenvolvidos para uma freqüência única, ou seja, no domínio da freqüência. Por tanto, antes que a teoria possa ser aplicada às observações de campo, é necessário transformar os resultados de campo para o domínio

do tempo. A aproximação que vem sendo utilizada na prática é a transformação dos dados no domínio do tempo para uma representação no domínio da freqüência.

Porém antes da realização da transformada é conveniente fazer a inspeção dos dados no tempo para verificar e escolher os intervalos de tempo que tenham atividade magnética, sendo, depois de realizada a remoção das tendências lineares, a aplicação de janelas para rejeitar o "Leakeage" e a filtragem, efetuada a visualização das elipses e ângulos de polarização, com a realização dos gráficos polares.

A realização da filtragem nos diferentes períodos, antes de fazer a transformada de Fourier, tem como propósitos: efetuar uma "prewhitening" do espectro, eliminando os picos e compensando tendências espectrais; a redução de grandes valores espectrais indesejados perto da freqüência zero; e a supressão de linhas espectrais além da freqüência de Nyquist para eliminar o Auasing.

As janelas utilizadas para a minimização do "Leakeage", são do tipo nas quais as bordas são suavisadas por um cosseno e são chamadas de Hanning, Hamming ou Tapering, dependendo da maneira como o cosseno suaviza. Feito isto, realizamos a transformada de Fourier nos intervalos escolhidos e formamos os vetores de medida, que serviram de base para os processamentos futuros.

1.3 Funções Reposta da Terra

1.3.1 Relações Lineares dos Campos

Para uma onda plana incidente da normal, da presença de heterogeneidades laterais de resistividade, ou anisotropia da terra, relações lineares porém ser estabilizadas entre as componentes magnéticas (H) e telúricas (E). No domínio da freqüência estas componentes podem ser escritas como:

$$E_x = Z_{xx} H_x + Z_{xg} H_y \quad (1)$$

$$E_y = Z_{yx} H_x + Z_{yy} H_y \quad (2)$$

onde os índices x e y indicam as direções norte e leste respectivamente.

vamente e Z é positivo para baixo.

Que se condensa em notação material a:

$$\bar{E} = \bar{Z}\bar{H} \quad (3)$$

onde:

$$\begin{matrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ \bar{Z} = & \\ Z_{yx} & Z_{yy} \end{matrix} \quad (4)$$

O tensor complexo Z no domínio da freqüência é uma quantidade abstrata sem aparente significado físico imediato. Um passo importante na interpretação de dados MT, é a extração de parâmetros escalares de Z , que mostram de forma mais clara a sua dependência da distribuição da resistividade elétrica em subsuperfície.

1.3.2 Obtenção dos Elementos do Tensor Z

1.3.2.1 Média sobre Bandas de Freqüência

A partir da relação linear dos campos elétricos e magnéticos podemos extraír os Z_{ij} . Isto envolve utilizar duas equações e quatro incógnitas, a aparente insuficiência se resolve efetuando uma média sobre uma banda de freqüência com muitos pontos da transformada, e cada equação é escrita como:

$$ExA^* = Z_{xx} HxA^* + Z_{xy} HyA^* \quad (5)$$

$$ExB^* = Z_{xx} HxB^* + Z_{xy} HyB^*$$

onde A^* e B^* são quaisquer pares de complexos conjugados de Hx , Hy , Ex e Ey e CD^* é a correlação cruzada de C e D definida como:

$$CD^* = [C^*(\omega_1)D_1(\omega_1) + C^*(\omega_2)D_2(\omega_2) + \dots + C^*(\omega_n)D_n(\omega_n)]/n \quad (6)$$

e a medida é efetuada da seguinte maneira:

$$\text{CD}^* (\omega_1) = \frac{1}{A\omega} \quad \text{CD}^* d\omega \quad (7)$$

$\omega_1 + A\omega/2$

$\omega_1 - A\omega/2$

Seis diferentes combinações são possíveis, de modo que seus valores diferentes para cada Z_{ij} podem ser calculadas. Mais comumente, as duas componentes H são utilizadas pois é esperado que possuem um maior grau de impedância (pequena correlação) que quaisquer outros pares.

1.3.2.2 Número de Pontos por Década de Freqüência

Sabendo que as curvas de resistividade aparente se apresentam suaves e regulares quando plotadas na escala bilogarítmica, e como a transformada de Fourier produz os valores de freqüência em uma escala linear, resulta de grande ajuda realizar a média dos valores transformados em bandas cujas freqüências centrais sejam equiparadas em uma escala logarítmica. Assim temos que se n destas bandas forem desejadas em cada década de freqüência, a razão entre as freqüências centrais de bandas adjacentes será:

$$\text{Log} \left(\frac{f_{i+1}}{f_i} \right) = \frac{1}{n} \quad (8)$$

Logicamente, a largura destas bandas, em termos de número de pontos da transformada, também deve crescer logarithmicamente com a freqüência, para assim obter uma suavização consistente na escala logarítmica da freqüência.

1.3.2.3 Estimador dos Mínimos Quadrados

Como uma forma de minimizar a contribuição do ruído, da estimativa dos elementos do tensor Z , utilizamos a técnica dos mínimos quadrados, para isto colocamos as equações promediadas, como escritas nas equações (5), em notação material assim:

$$\mathbf{E}_m = \mathbf{H}_m \mathbf{Z}_m \quad (9)$$

onde:

$$\mathbf{E}_m = \begin{bmatrix} \mathbf{ExA^*} \\ \mathbf{ExB} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{H}_m = \begin{bmatrix} \langle \mathbf{HxA^*} \rangle, \langle \mathbf{HyA^*} \rangle \\ \langle \mathbf{HxB} \rangle, \langle \mathbf{HyB} \rangle \end{bmatrix}$$

e

$$\mathbf{E}_m = \begin{bmatrix} Z_{xx} \\ Z_{xy} \end{bmatrix}$$

onde sabendo-se que o estimador dos mínimos quadrados é dado por:

$$\hat{\mathbf{Z}}_m = (\hat{\mathbf{H}}_m^t \hat{\mathbf{H}}_m)^{-1} \hat{\mathbf{H}}_m^t \mathbf{E}_m \quad (10)$$

Sendo $\hat{\mathbf{Z}}_m$ o vetor dos parâmetros estimados, $\hat{\mathbf{H}}_m^t$ a transporta da matriz $\hat{\mathbf{H}}_m$ e $(\hat{\mathbf{H}}_m^t \hat{\mathbf{H}}_m)^{-1}$ a inversa do produto da matriz $\hat{\mathbf{H}}_m^t$ vezes $\hat{\mathbf{H}}_m$, minimizando assim a contribuição do ruído em E . Resolvendo este sistema, temos que as estimativas para os elementos do tensor impedância são:

$$Z_{xx} = (\langle \mathbf{ExA^*} \rangle \langle \mathbf{HyB^*} \rangle - \langle \mathbf{ExB^*} \rangle \langle \mathbf{HyA^*} \rangle) / \text{DEN} \quad (11)$$

$$Z_{xy} = (\langle \mathbf{ExB^*} \rangle \langle \mathbf{HxA^*} \rangle - \langle \mathbf{ExA^*} \rangle \langle \mathbf{HxB^*} \rangle) / \text{DEN} \quad (12)$$

$$Z_{yx} = (\langle \mathbf{EyA^*} \rangle \langle \mathbf{HyB^*} \rangle - \langle \mathbf{EyB^*} \rangle \langle \mathbf{HyA^*} \rangle) / \text{DEN} \quad (13)$$

$$Z_{yy} = (\langle \mathbf{EyB^*} \rangle \langle \mathbf{HxA^*} \rangle - \langle \mathbf{EyA^*} \rangle \langle \mathbf{HxB^*} \rangle) / \text{DEN} \quad (14)$$

onde:

$$\text{DEN} = (\langle \mathbf{HxA^*} \rangle \langle \mathbf{HyB^*} \rangle - \langle \mathbf{HxB^*} \rangle \langle \mathbf{HyA^*} \rangle) \quad (15)$$

Observamos pelo denominador que se A e B são fortemente dependentes, os dois termos seriam aproximadamente iguais e o sistema ficaria mal condicionado, por isto Sims et al (1971) sugeriram calcular as seis estimativas possíveis para cada Z_{ij} , desprezar as duas que sejam instáveis, e promediar as quatro restantes, pois eles mostraram, que a contribuição do ruído dos si-

nais de E e H, desta maneira se compensam

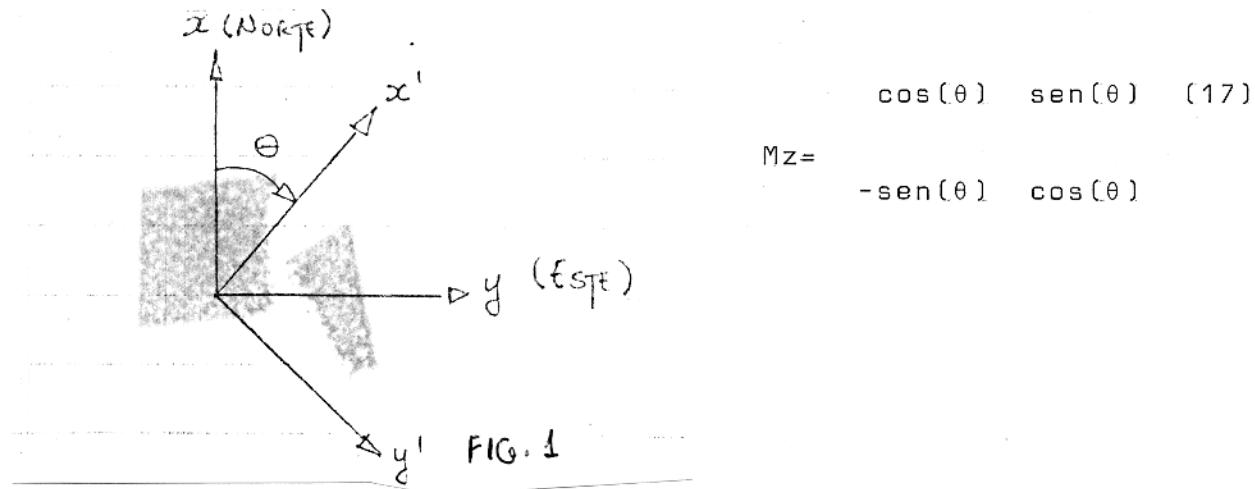
1.3.3 - Rotação do Tensor Z

Tanto numa terra anisotrópica como uma estrutura Bi-dimensional não homogênea, um esforço é feito de forma a eliminar Z_{xx} e Z_{yy} , pela escolha correta das coordenadas. Isto nos leva a determinação da direção de estruturas 2-D e a natureza da anisotropia; entretanto, se o tensor de resistividade não é simétrico, os elementos diagonais do tensor não desapareceram, podendo no entanto chegar a uma solução de compromisso com o valor mínimo dos elementos diagonais.

Não é necessário orientar os sensores ao longo de um eixo particular durante a aquisição dos dados, pois o tensor de impedância pode ser rodado matematicamente do sentido positivo (rotação dos ponteiros do relógio) por:

$$Z'(T) = M Z M^t \quad (16)$$

onde o operador de rotação é dado por:



Antes de prosseguir com a definição de outros parâmetros extraídos de Z é conveniente revisar algumas das propriedades do tensor de rotação. Para isto e por conveniência introduzimos a notação:

$$Z_1 = (Z_{xy} - Z_{yx})/2 \quad (18)$$

$$Z_2 = (Z_{xx} + Z_{yy})/2 \quad (19)$$

$$Z_3 = (Z_{xy} + Z_{yx})/2 \quad (20)$$

$$Z_4 = (Z_{xx} - Z_{yy})/2 \quad (21)$$

Quando aplicada a rotação no tensor de impedância Z , os elementos do tensor impedância rodado Z' podem ser expressos por:

$$Z'_{xx} = Z_2 + Z_3 \sin(2\theta) + Z_4 \cos(2\theta) \quad (22)$$

$$Z'_{xy} = Z_1 + Z_3 \cos(2\theta) + Z_4 \sin(2\theta) \quad (23)$$

$$Z'_{xy} = -Z_1 + Z_3 \cos(2\theta) - Z_4 \sin(2\theta) \quad (24)$$

$$= -Z'_{xy}(\theta + \pi/2)$$

$$Z'_{yy} = Z_2 - Z_3 \sin(2\theta) - Z_4 \cos(2\theta) \quad (25)$$

$$= Z'_{xx}(\theta + \pi/2)$$

A partir destas equações as propriedades de Z podem ser mostradas: Z_1 e Z_2 são rotacionalmente invariantes; sob uma rotação através de π radianas, os elementos de Z traçam elipses no plano complexo, as elipses para todos os elementos tem o mesmo tamanho e forma; e são definidas pelo raio conjugado Z_3 e Z_4 , os centróides das elipses para os elementos da diagonal de Z traçam a mesma elipse com centróide Z_2 .

Os principais raios das elipses de rotação de Z são $Z_3'(\theta_0)$ e $Z_4'(\theta_0)$ com θ_0 calculado pela equação:

$$\tan(4\theta_0) = \frac{2\operatorname{Re} Z_3 Z_4^*}{|Z_4|^2 - |Z_3|^2} \quad (26)$$

Nas considerações da simetria da elipse de rotação, as componentes principais podem, ser escolhidas pelos ângulos de rotação que definem os eixos principais do tensor de impedância com a elipse de rotação; este ângulo é dado pela equação anterior que também possui a propriedade de maximizar $|Z'_{xy} + Z'_{yx}|$ e minimizar $|Z'_{xx} - Z'_{yy}|$.

1.3.4 Cálculo das Barras de Erro

Se temos uma variável Z que depende de X e Y, com uma coerência nula entre X e Y, sendo a e b as funções de transferência em uma banda de freqüência limitada, e sabendo que os seus valores são a_0 e b_0 e os seus valores calculados A e B, temos que os limites de confiança podem ser obtidos da seguinte forma:

Sabendo que $Z = a_0 X_0 + b_0 Y_0 + \Delta Z_0$ e assumindo que tanto X como Y estão livres de erro. Então a razão distribuída de Fischer, envolvendo o desvio de A e B a partir de a_0 e b_0 será:

$$F = \frac{|A - a_0|^2 S_{xx} + |B - b_0|^2 S_{yy} + Re\{2S_{xy}(A - a_0)(B - b_0)\}}{E^2 S_{zz}} \quad n-4 \quad (27)$$

onde S_{xx} , S_{yy} , S_{xy} e S_{zz} são as autocorrelações e correlações cruzadas das variáveis X, Y e Z; n é o número de vezes que o evento foi realizado e E é o resíduo que se cálcula através da equação:

$$E^2 = 1 - \frac{|AS_{xz} - BS_{yz}|^2}{|S_{zz}|^2} \quad (28)$$

A razão distribuída de Fischer 27) tem uma distribuição probabilidade de Fischer com 4 e $n-4$ graus de liberdade. Os limites de confiança para A e B não podem ser calculados individualmente, a menos é claro que S_{xy} seja nula, hipótese descartada desde o início, por outro lado, se assumirmos que $|A - a_0|$ e $|B - b_0|$ são iguais temos que:

$$F = \frac{|A - a_0|^2 S_{xx} + S_{yy} + Re\{2S_{xy}\}}{E^2 S_{zz}} \quad n-4 \quad (29)$$

é o valor de limiar de F para uma dada probabilidade β por ser derivado de:

$$1 - \beta = \frac{1 + 26/(1+26/m)}{1+26/m}^m \quad m \quad (30)$$

onde $m = \frac{n-4}{2}$

Sabendo que com isto, o desvio pode ser calculado por:

$$|AA| = \frac{E^2 S_{zz}}{S_{xx} + S_{yy} + Re\{2 S_{xy}\}} \frac{46}{n-4} \quad (31)$$

e como $46/(n-4)$ pode ser aproximado por $\beta/(1-\beta)$ temos que o desvio pode finalmente ser calculado com:

$$|AA| = \frac{E^2 S_{zz}}{S_{xx} + S_{yy} + Re\{2 S_{xy}\}} \frac{\beta}{1-\beta} \quad (32)$$

A representação gráfica pode ser vista na figura 2.

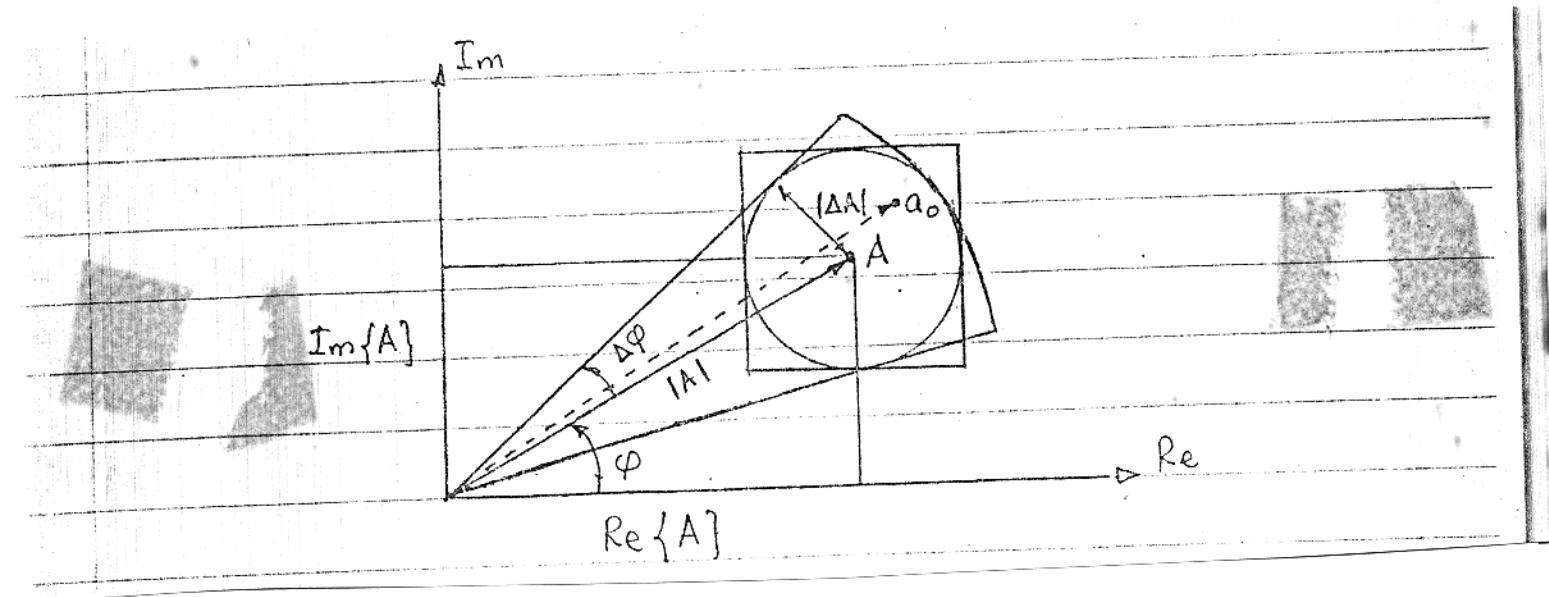


Figura 2

Sendo o desvio da fase $\Delta\sigma$ calculado pela equação:

$$\Delta\sigma = \sin^{-1} \frac{|AA|}{|A|} \quad (33)$$

1.3.5 Skew e Elipticidade

Parâmetros adicionais são extraídos de Z , os quais indicam a extensão do afastamento da forma diagonal nula do tensor impedância 1-D. Estes são definidos das elipses de rotação do plano complexo. Um destes parâmetros é o Skew definido como a normalização da distância da origem ao centróide da elipse de rotação dos elementos fora da diagonal, pela distância da origem ao centróide da elipse de rotação dos elementos da diagonal ou seja:

$$\text{Skew} = \frac{|Z_{xx} + Z_{yy}|}{|Z_{xy} - Z_{yx}|} = \frac{|Zz|}{|Z_1|} \quad (34)$$

A figura 3 mostra a representação gráfica das variáveis envolvidas no cálculo do Skew.

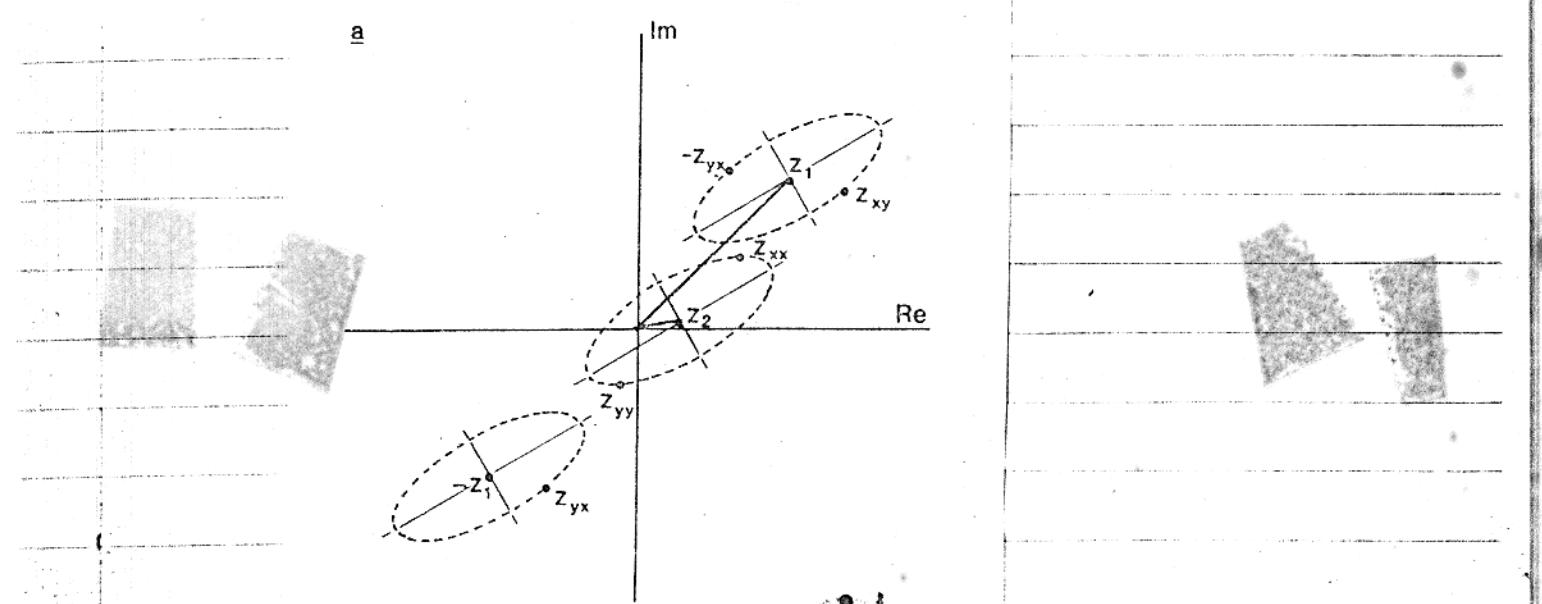


Figura 3

O Skew é rotacionalmente invariante, pois como visto anteriormente Z_1 e Z_2 são rotacionalmente invariantes.

Temos também que através dos eixos das elipses de rotação podemos definir outro parâmetro, sabendo que:

$$\text{Eixo Maior} = Z_{xy}(0^\circ) + Z_{yx}(0^\circ) = 2 Z_3(0^\circ) \quad (35)$$

$$\text{Eixo Menor} = Z_{xx}(0^\circ) - Z_{yy}(0^\circ) = 2 Z_4(0^\circ) \quad (36)$$

podemos estabelecer a Elipticidade como:

$$\text{Elipticidade} = \frac{Z_4(0^\circ)}{Z_3(0^\circ)} \quad (37)$$

A figura 4 mostra a representação gráfica das variáveis envolvidas no cálculo da Elipticidade.

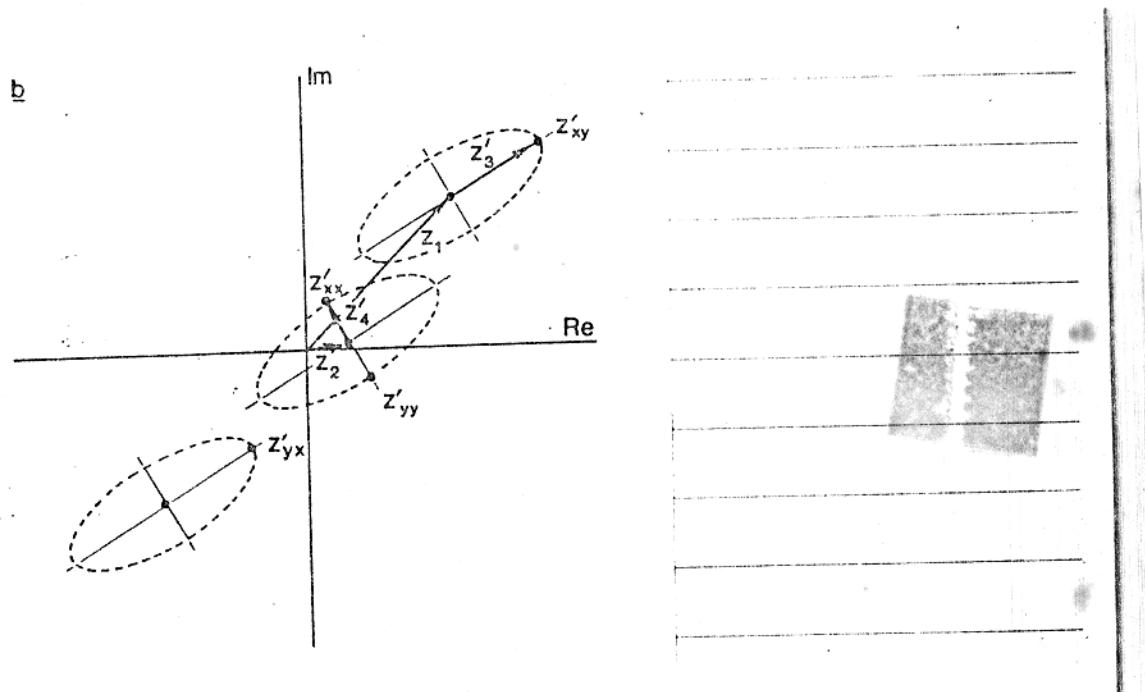


Figura 4

Os dois parâmetros anteriores são nulos para os casos de estruturas 1-D ou 2-D. Ambos são utilizados como medidas semi-quantitativas da tri-dimensionalidade da estrutura e do grau de acoplamento entre as características individuais 3-D.

1.2.6 Tipper

Dos dados de campo queremos encontrar a direção horizontal da qual as componentes horizontais do campo magnético são mais coerentes com a componente vertical Hz. Em estruturas bi-dimensionais esta direção é invariante com a freqüência. E perpendicular ao strike. Assim para uma terra 1-D com direção x' ao longo do strike temos:

$$Hz = A' Hx'$$

onde A' é uma função de transferência complexa denominada Tipper. Esta função de transferência é útil na definição dos eixos estruturais na vizinhança da sondagem MT, pois determina qual dos eixos principais das impedâncias é o da strike. A implitude do Tipper é uma medida relativa da tri-dimensionalidade da estrutura da terra.

Quando temos um sistema de coordenadas arbitrário, temos que a equação (38) por ser escrita através de relações lineares com as componentes Hx e Hy assim:

$$Hz = A Hz + B Hy \quad (38)$$

sendo A e B denominados coeficientes complexos de acoplamento.

1.3.6.1 Estimativa de A , B , Coerência Tipper e Erro Residual

Segundo a derivação dos Z_{ij} como na seção 1.3.2.3, e para tanto, assumindo que o par de campos escolhidos para as correlações são Hz e Hy , temos que:

$$\langle Hz Hx^* \rangle = A \langle Hx Hx^* \rangle + B \langle Hy Hx^* \rangle \quad (40)$$

$$\langle Hz Hy^* \rangle = A \langle Hx Hy^* \rangle + B \langle Hy Hy^* \rangle$$

e pelo estimador dos mínimos quadrados, as estimativas para A e B serão dadas por:

$$A = (\langle \text{HzHx}^* \rangle \langle \text{HyHy}^* \rangle - \langle \text{HzHy}^* \rangle \langle \text{HyHx}^* \rangle) / \text{DEN} \quad (41)$$

$$B = (\langle \text{HzHy}^* \rangle \langle \text{HxHx}^* \rangle - \langle \text{GzHx}^* \rangle \langle \text{HxHy}^* \rangle) / \text{DEN} \quad (42)$$

onde DEN é definido da mesma maneira do que na equação (15). Uma vez obtidas as estimativas para A e B, podemos efetuar o cálculo de Hz predito, e assim obter uma medida de o quanto as mesmas conseguem explicar o campo Hz, a partir das componentes horizontais; para isto é preciso recordar, que a definição de coerência é dada como:

$$\text{Coh}(D) = \frac{CD^*}{\sqrt{\langle CC^* \rangle \langle DD^* \rangle}} \quad (43)$$

É com isto podemos calcular a coerência Tipper com a equação:

$$\text{Coh}(\text{HzHz}) = \frac{p \text{Coh}(\text{HzHx}) + q \text{Coh}(\text{HzHy})}{\sqrt{|p|^2 + |q|^2 + 2R \operatorname{Re} p^* q \text{Coh}(\text{HxHy})}} \quad (44)$$

onde: $p = A * \sqrt{\langle \text{HxHx} \rangle}$ e $q = B * \sqrt{\langle \text{HyHy} \rangle}$

A propriedade importante desta coerência é a de que é real, ou seja a diferença de fase entre Hz e $\overset{p}{\text{Hz}}$ é nula.

Podemos definir o Erro Residual partindo da propriedade dos Mínimos Quadrados.

$$\text{Res}^2 = (1 - \frac{p_p}{\langle \text{HzHz} \rangle} / \langle \text{HzHz} \rangle) \quad (45)$$

ou de uma forma melhor

$$\text{Res} = \sqrt{\frac{\langle \text{Hz} - \overset{p}{\text{Hz}} \text{Hz} - \overset{p}{\text{Hz}} \rangle}{\langle \text{Hz} \text{Hz} \rangle}} \quad (46)$$

$$\text{Res}(\%) = \sqrt{1 - \frac{R^2}{\langle \text{HzHz}^* \rangle}} \times 100 \quad (47)$$

onde R é o denominador da equação (44) da coerência Tipper. Assim este Erro Residual é a percentagem residual do campo Hz que não é predita por $[A, B]$.

1.3.6.2 Amplitude, Fase e Skew do Tipper

A amplitude do Tipper em cada banda de freqüência será dada por:

$$|T| = \sqrt{|A|^2 + |B|^2} \quad (48)$$

Sendo uma medida da intensidade relativa do campo Hz , e será independente da rotação σ , se existe algum σ para o qual $Hz = A'Hx'$, logo $|T|^2 = |A'|^2$ e a sua fase será dada por:

$$\delta = \frac{|A|^2 \tan^{-1}(ai/ar) + |B|^2 \tan^{-1}(bi/br)}{|T|^2} \quad (49)$$

sendo δ invariante com a rotação e contido no intervalo $-\pi/2$ a $\pi/2$, e se a terra é 1-D então δ é igual a fase de A' .

O Skew do Tipper é uma medida rotacionalmente invariante a qual é nula para uma terra 1-D. Podemos calcular através de:

$$\text{Skew do Tipper} = \frac{2(arbi - Aibr)}{|T|^2} \quad (50)$$

1.2.6.3 Estimativas da Rotação e do Ângulo σ

Sabendo-se que para terra 2-D:

$$A = A' \cos(\sigma) \quad \text{e} \quad B = A' \sin(\sigma) \quad (51)$$

levando a:

$$\begin{aligned} \sigma &= \tan^{-1}(br/ar) = \tan^{-1}(bi/ai) \\ &= \tan^{-1}(B/A) \quad (\text{para dados 2-D}) \end{aligned} \quad (52)$$

Supondo que a componente Hx está contaminada com ruído incoerente com Hy e vice-versa temos que:

$$A = tx \cdot A \quad e \quad B = ty \cdot B$$

onde:

$$tx = \frac{|Hx|^2}{|Hx|^2 + |nx|^2} \quad (52)$$

sendo $|nx|^2$ a potência do ruído em Hx , e ainda:

$$ty = \frac{|Hy|^2}{|Hy|^2 + |ny|^2} \quad (53)$$

sendo $|ny|^2$ a potência do ruído em Hy .

Assim, devido a presença de ruído, o com a estimativa anterior está sujeito a grandes variações, por isto é melhor escolher uma estimativa ponderada da seguinte maneira:

$$\sigma_1 = \frac{2^2 \cdot 2^2 \cdot -1}{(ar+bi)^2 \tan(bi/ar) + (ai+br)^2 \tan(br/ai)} \quad (55)$$

Uma segunda estimativa de σ é a extensão natural do método de rotação do tensor para o Tipper, aqui σ é escolhido para maximizar:

$$|A'|^2 = |A \cos(\sigma) + B \sin(\sigma)|^2 \quad (56)$$

sendo que o ângulo que cumpre esta condição é denominado de σ_2 , e é dado pela equação:

$$\tan(2\sigma_2) = \frac{2(arbr + aibi)}{|A|^2 + |B|^2} \quad (57)$$

Usando a função FORTAM ATAN de forma que $-\pi/2 < 2\sigma_2 < \pi/2$, então $|A'|^2$ é um mínimo se $|A|^2 > |B|$ e $|A'|^2$ é um máximo de $|A|^2 > |B|^2$. Se $|A'|^2$ é mínimo, necessitando somar π radiares a $2\sigma_2$; em outro caso, o ângulo final σ_2 é determinado para estar dentro de π radiares. A escolha definitiva para σ_2 é feita tomando-se σ_2 como o ângulo para o qual a fase de A' fica no intervalo $-\pi/2, \pi/2$. Para uma terra 2-D:

$\sigma_1 \approx \sigma_2$, Skew do Tipper ≈ 0 e $|B|^2 \approx 0$.

Como consequência da contribuição do ruído, acontece que as estimativas σ_1 e σ_2 divergem em sentidos contrários de σ . Assim, plotando as duas estimativas poderemos ter uma indicação do afastamento devido ao ruído, desde que o Skew do Tipper seja pequeno.

1.3.7 Coerência Predita

Tendo calculado os Z_{ij} , podemos substituí-los nas relações lineares dos campos para calcular os valores de E_x e E_y . Estes valores, que são calculados de H_x e H_y e por isso diretamente dependentes dos mesmos, ao ser comparados com os valores observados de E_x e E_y , oferecem diferenças que são devidas a contaminação pelo ruído. Por esta razão a coerência entre o E calculado e o observado, tem provado ser a mais sensível medida de ruído disponível. Denominando esta coerência predita temos que é calculada por:

$$\text{Coh}(E, E^P) = \frac{E \cdot E^{P*}}{\sqrt{E^* \cdot E^{P*}}} \quad (58)$$

1.3.8 Pesos das Componentes Estruturais

Na teoria $\text{Skew} = 0$ para estruturas de resistividade elétrica da terra 1-D ou 2-D, e $\text{Skew} > 0$ para estruturas 3-D. Na prática os resultados da análise dos dados geralmente mostram valores de Skew diferentes de zero, conjuntamente com outros fatores (Theta, Resistividade e Fases Médias, etc) que indicam domínio das estruturas 1-D ou 2-D. Além disso o Skew aparece como sendo facilmente contaminado pelo ruído, e o ruído é presença inevitável nos dados de campo, isto faz com que o Skew seja um parâmetro incerto para a estimativa da dimensionalidade da terra.

Por estas razões Kao e Orr (1981) desenvolveram novos fatores para encontrar a dimensionalidade estrutural a partir dos dados de campo. Estes fatores, denominados pesos das componentes estruturais, desenvolvem-se com as componentes de resposta da impedância assim:

$$D_1 = |Z_1|/\sqrt{s} \quad (59)$$

$$D_2 = |Z_3(\theta_0)|/\sqrt{s} \quad (60)$$

$$D_3 = |Z_2|/\sqrt{s} \quad (61)$$

$$D'_3 = |Z_4(\theta_0)|/\sqrt{s} \quad (62)$$

Assim D_1 , D_2 , D_3 e D'_3 representam os pesos de estruturas 1-D, 2-D ou 3-D, e s é dado por:

$$s = |Z_1| + |Z_2(\theta_0)| + C|Z_3| + |Z_4(\theta_0)|^{1/2} \quad (63)$$

Englobando estes novos parâmetros, os antigos Skew e Elipticidade, pois como é fácil ver $\text{Skew} = D_3/D_1$ e $\text{Elipticidade} = D'_3/D_2$. Sendo definido o peso para estruturas 3-D como $D_3 = (D_3 + D'_3)/2$.

A razão para a definição destes novos parâmetros de dimensionalidade é obter pesos quantitativos, facilitando assim o reconhecimento do domínio de uma das estruturas 1-D, 2-D ou 3-D sobre as outras.

1.3.9 Resistividades e Fases Médias

Como uma primeira tentativa para obter um perfil de resistividade elétrica, utiliza-se valores médios da resistividade aparente e da fase as quais são dada pelas seguintes equações:

$$\rho_m = \frac{|(Z_{xy} - Z_{yx})/2|^2}{\omega \mu_0} = \frac{|Z_1|^2}{\omega \mu_0} \quad (64)$$

$$\Phi = \tan^{-1} \left(\frac{\text{Im}\{Z_1\}}{\text{Re}\{Z_1\}} \right) \quad (65)$$

$$\rho'_m = 0.5 [\rho_{\max} + \rho_{\min}] = \frac{|Z_{xy}(\theta_0)|^2 + |Z_{yx}(\theta_0)|^2}{2\omega \mu_0} \quad (66)$$

$$\Phi' = 0.5 [\max + \min] \quad (67)$$

Em geral $\rho_m \neq \rho'_m$, mas para uma estrutura 1-D temos $\rho_m = \rho'_m$ e $\Phi = \Phi'$. Quando tivemos $\rho_m \approx \rho'_m$ e $\Phi \approx \Phi'$ para todas as freqüências disponíveis, isto será uma indicação adicional da validade da aproximação 1-D.

2 INVERSÃO

2.1 Revisão da Literatura

Nabetani e Rankin (1969) desenvolveram um processo iterativo através do qual a diferença residual entre os dados observados e os teóricos calculados com um número crescente de camadas, é reduzido a um valor menor do que o erro nos dados. Desta forma o número de camadas é determinado tanto pelos dados como pelo seu ruído.

Schmucker (1975 não publicado) utilizando transformações de coordenadas e através da equação de Riccati, realizou a transformação de um problema não linear para uma forma linear, e montou um sistema de equações que é resolvido através da recomposição em valores singulares. Retornando depois ao problema original e realizando então a solução exata.

Jones e Hutton (1979) fazendo uma busca aleatória, onde os parâmetros (resistividade e espessura das camadas) são controlados por números aleatórios com média zero e desvio padrão unitário, conseguiram através de uma série de vínculos no espaço de parâmetros, encontrar várias soluções que produzem diferenças residuais menores que o espalhamento dos dados.

Edwards et al. (1981) aplicaram a decomposição de auto vetores pela teoria do Inverso Generalizado para encontrar, os parâmetros de um modelo uni-dimensional (1-D) magnetotelúrico e mostrou que, com a escala logarítmica dos parâmetros do modelo, a identificação física é simplificada.

Fischer et al. (1981) desenvolveram um algoritmo partindo da idéia de que para um dado período, unicamente a estrutura até uma certa profundidade contribuía para a resposta, começando nos períodos curtos e com duas camadas e deslocando-se para os períodos longos introduzindo novas camadas, com alguns critérios estabilizantes e mantendo o número de camadas no mínimo.

Rankin e Pascal (1983) utilizando o método do Ridge-Regression e aplicando o mesmo à função V de Nabetani e Rankin (1969) conseguiram um método eficiente e de rápida convergência.

Silva e Hohmann (1983) aplicaram o algoritmo de

Price, para o método magnético, de busca aleatória controlada através de um simplex que entra em colapso nos mínimos da função objeto com os parâmetros podendo ser controlados com distribuições de probabilidades diferentes, permitindo a incorporação de informação a priori.

2.2 Modelo Direto

Considerando uma fonte de onda plana com a dependência do tempo na forma $\exp(i\omega t)$, incidindo perpendicularmente sobre uma terra estratificada em n camadas horizontais planas, e desprezando as correntes de deslocamento, podemos expressar a equação de onda da m -ésima camada por:

$$\frac{d^2Ex}{dz^2} + i\omega\sigma_m \quad Ex = 0 \quad (68)$$

$$\frac{d^2Hy}{dz^2} + i\omega\sigma_m \quad Hy = 0 \quad (69)$$

onde σ_m é a condutividade da m -ésima camada, μ é a permeabilidade do vácuo e z é o eixo vertical positivo para baixo em coordenadas dextrais. A solução desta equação para Ex e o campo magnético correlacionado Hy é da forma:

$$Ex_m = Am^{-Kmz} + Bm^{-Kmz} \quad (70)$$

$$Hy_m = \frac{Km}{i\omega\mu} (Am^{-Kmz} - Bm^{-Kmz}) \quad (71)$$

onde $Km = \sqrt{i\omega\mu\sigma_m}$ e $\omega = 2\pi/T$. Am e Bm são coeficientes constantes, os quais são determinados utilizando as condições de contorno, onde as componentes tangenciais dos campos elétricos e magnético são contínuas. As condições de contorno entre a m -ésima e a $m+1$ -ésima camada nos fornecem, depois de resolver o sistema de equações para Am e Bm . A seguinte fórmula de recorrência para a impedância Z_m de cada camada:

$$Z_m = P_m \frac{1-R \exp^{-(1+i)2h_m/\delta_m}}{1+R \exp^{-(1+i)2h_m/\delta_m}} \quad (72)$$

onde $R = (P_m - Z_{m+1})/(P_m + Z_{m+1})$, $P_m = K_m \rho_m$, $\rho_m = \rho_1/\sigma_m$, $K_m = i\omega\mu\sigma_m$, e $\sigma_m = 2/(\omega\mu\sigma_1)$. Assim começando pela impedância da última camada $Z_n = P_n$, e subindo nas impedâncias das camadas superiores, chegamos à impedância de superfície $Z_o(T)$, onde se define a resistividade aparente ρ_a , e a fase Φ como:

$$\rho_a = \frac{|Z_o(T)|^2}{\omega\mu} \quad (73)$$

$$\Phi = \tan^{-1} \frac{\text{Im}|Z_o(T)|}{\text{Re}|Z_o(T)|} \quad (74)$$

2.3 Transformação do Bostick

Com a aproximação do "condutor perfeito" de Schmucker e Weidelt (1975), podemos estabelecer que se a profundidade de penetração é muito maior que a parte imaginária da função de transferência, é válida a seguinte equação:

$$\rho_a = \frac{2\pi\mu h^2}{T} \quad (75)$$

de onde facilmente extraímos que a profundidade na transformação de Bostick será dada por:

$$h = \frac{\rho_a T}{2\pi\mu} \quad (76)$$

Para encontrarmos a resistividade é preciso tirar proveito da condutância definida por:

$$\sigma = \frac{h}{\rho(h)} \quad \text{ou} \quad \rho(h) = \frac{h}{\sigma} \quad (77)$$

e através da transformação de coordenadas: $x = \log k^2$ e $y = \log \sigma^2$ chegamos a expressão para a resistividade como sendo:

$$\rho(h) = \rho_a \frac{1+s}{1-s} \quad (78)$$

onde: $S = \frac{d \log \rho_a}{d \log T}$ (79)

2.4 Transformação de Weidelt

Para encontrar as expressões da transformação de Weidelt, lembramos que devido às relações de dispersão, a que a transferência está sujeita, temos que:

$$C = u - i v = |C| e^{-i\Phi}$$

onde: $u > 0$ e $v > 0$, o que obriga a: $0 > \Phi > \pi/2$

A partir desta e de outras considerações, Schmücker e Kuckres (comunicação escrital estabeleceram as seguintes relações:

$$z^* = u; \rho^* = 2\omega\mu v^2 \quad (81)$$

onde z^* e ρ^* são a profundidade e a resistividade do modelo respectivamente. Apesar disto não pode ser aprovado a rigor, os seguintes argumentos se apresentam a seu favor:

- 1) $z^* = u$ pode ser considerado como a profundidade do "campo de gravidade" do sistema de corrente induzida em-fase.
- 2) pode ser mostrado que z^* cresce continuamente quando a frequência decresce.
- 3) para um semi-espacô uniforme e número de onda em y nulo, temos $v = 1 / 2\omega\mu\sigma$, logo ρ^* é correto neste caso, pois para condutores perfeitos ρ^* tende para zero desde que v tende para zero.

Agora devido também às relações de dispersão entre a amplitude e a fase, podemos chegar a uma expressão aproximada da última assim:

$$\Phi = \frac{\pi}{4} (1-S) \quad \text{onde: } S = \frac{d \log \rho_a}{d \log T} \quad (82)$$

e lembrando que a relação entre a resistividade aparente e a função de transferência é dada por:

$$\rho_a = \omega\mu |C|^2 \quad (83)$$

Chegamos as expressões da Transformada de Weidat que são:

$$Z^* = |C| \cos \Phi = \rho a / \omega \mu \cos \Phi \quad (84)$$

$$\rho^* = 2 \omega \mu |C|^2 \sin^2 \Phi = 2 \rho a \sin^2 \Phi \quad (85)$$

Este método de aproximação desempenha-se particularmente bem quando temos um decréscimo monotônico na resistividade com relação a profundidade.

Nas figuras 5 e 6 mostra-se a amplitude e fase exata e aproximada pela equação (82) da resistividade aparente dado por um modelo com resistividade das camadas aumentando com a profundidade e das figuras 7 e 8 temos a comparação entre o modelo utilizado e as aproximações dadas pelas transformações de Bostick e a da Weidat, calculadas tanto com a fase exata como com a fase aproximada. Nas figuras 9 e 10 temos a amplitude e fase exata e aproximada pela equação (82), da resistividade aparente dada por um modelo com resistividade das camadas diminuindo com a profundidade, e das figuras 11 e 12 comparamos o modelo com as transformações de Bostick e a de Weibalt, calculadas tanto com a fase exata como a fase aproximada. Nas figuras 13 e 14 mostramos a amplitude aparente dada por um modelo com resistividade das camadas "mista" (aumentando e diminuindo) com a profundidade. Observando o comportamento dos três modelos, podemos notar, que a aproximação da fase dada pela equação (82), se afasta consideravelmente da fase exata nos pontos de inflexão da mesma; que as transformações de Bostick e de Weibalt somente podem nos oferecer uma visão qualitativa da distribuição da resistividade de subsuperfície, e não ser no caso do modelo com resistividade das camadas diminuindo com a profundidade, onde estas transformações se aproximam de Bostick e menos influenciada pelo cálculo da fase do que a transformação de Weibalt, pois esta última sofre uma dispersão ao ser calculada com a aproximação da fase.

2.5 Técnicas de Inversão

2.5.1 Tentativa e Erro

Utilizando as facilidades do display gráfico da HP-

9845, implementamos um programa que utilizando o modelo direto descrito anteriormente, gráfica conjuntamente os valores observados e os da função calculada, permitindo que o operador, através da inspeção visual, e variando ao seu arbítrio os parâmetros das camadas (número de camadas, resistividade e espessura de cada), venha a obter uma aproximação inicial suficientemente boa para o algoritmo de inversão automática. O programa é fácil manuseio para o operador, e o tempo de cálculo depende sobretudo do número de camadas e de pontos observados.

2.5.2 Inversão Automática

2.5.2.1 Busca Aleatória

Seja $\tilde{y}(T)$ um vetor N-dimensional de observações contendo, $N/2$ observações do logaritmo da amplitude da resistividade aparente, e $N/2$ observações da fase da resistividade aparente. O vetor $\tilde{y}(T)$ é aproximado pelo funcional $\tilde{y}(T, \tilde{p})$, que é o modelo direto anteriormente descrito para uma terra estratificada em n camadas. O vetor \tilde{p} contém r resistividades e $r-1$ espessuras, tendo por tanto $2r-1$ dimensões, e T o logaritmo do período em que é feita a observação. Queremos encontrar uma estimativa \tilde{p} que minimiza uma norma qualquer (como função objetivo), com os vínculos estabelecidos para cada parâmetro a priori.

Para solucionar este problema não linear vinculado, utilizamos o algoritmo de busca aleatória controlada (BACI, descrito por Price (1977). Este algoritmo aceita vínculos dos parâmetros através do estabelecimento da função distribuição de probabilidade de cada um deles, e por não utilizar derivadas pode-se estabelecer como função objeto qualquer norma, inclusive a norma 1.

Silva e Hohmann (1982) fazem uma descrição do algoritmo de Price, e nós utilizamos a sua implementação (com modificações para o método MT) em FORTRAN para o nosso estudo, eles também estabelecem o cálculo da matriz de covariância como sendo

$$C_{ij} = \frac{1}{L-1} \sum_{k=1}^L (p_{ik}^* - \bar{p}_i)(p_{jk}^* - \bar{p}_j) \quad (68)$$

onde L é o número de pontos de busca na BAC, C_{ij} é um elemento da matriz de covariância, \hat{p}_k^* é a k-ésima estimativa do i-ésimo parâmetro e \tilde{p}_i^* é a melhor estimativa do i-ésimo parâmetro dada por:

$$\tilde{p}_i^* = \frac{1}{L} \sum_{k=1}^L p_k^* \quad (87)$$

sendo que a matriz de covariância pode ser normalizada para obter os elementos da matriz correlação:

$$r_{ij} = \frac{c_{ij}}{\sqrt{c_{ii} c_{jj}}} \quad (88)$$

2.5.2.2 Algoritmo de Marquardt

O objetivo da inversão é obter a aproximação do modelo observado da melhor maneira possível, isto é feito pelo ajuste do vetor de parâmetros até que a função objeto:

$$\epsilon^2 = \frac{1}{2(N-M)} \sum_{i=1}^{N/2} \epsilon_i^2 + \epsilon_2^2 \quad (89)$$

onde N é o número de observações, M é o número de parâmetros, e ϵ_1^2 e ϵ_2^2 são definidos por:

$$\epsilon_1^2 = \sum_{i=1}^{N/2} w_{1i} (\log p_a(T_{1i}) - \log p_a(T_{1i}, \tilde{p}))^2 \quad (90)$$

$$\epsilon_2^2 = \sum_{i=1}^{N/2} w_{2i} (\Phi(T_{1i}) - \Phi(T_{1i}, \tilde{p}))^2 \quad (91)$$

minimizada, $p_a(T_{1i})$ e $\Phi(T_{1i})$ são a amplitude e a fase da resistividade aparente observada, $p_a(T_{1i}, \tilde{p})$ é $\Phi(T_{1i}, \tilde{p})$ são a amplitude e a fase da resistividade aparente calculadas pelo modelo direto de uma terra estratificada em camadas e o vetor \tilde{p} é composto pelas resistividades de cada camada. Sendo que Fischer et al. [1981] propuseram que os pesos w_1 e w_2 podem ser relacionados com o intervalo de confiança estabelecido dos dados obser-

vados, se este intervalo vai de p_{\min} a Φ_{\max} e de Φ_{\min} a Φ_{\max} assim:

$$\omega_1 i = \frac{(N/2) \cdot \log p_{\max}(T_i) - \log p_{\min}(T_i)}{N/2} \quad (92)$$

$$i=1 \dots \log p_{\max}(T_i) - \log p_{\min}(T_i)$$

$$\omega_2 i = \frac{(N/2) \cdot (\Phi_{\max}(T_i) - \Phi_{\min}(T_i))}{N/2} \quad (93)$$

$$i=1 \dots \Phi_{\max}(T_i) - \Phi_{\min}(T_i)$$

de forma que estes pesos estão normalizados:

$$\omega_1 i = \frac{N/2}{i=1} \quad \omega_2 i = \frac{N/2}{i=1} \quad (94)$$

por tratar-se de um problema não linear, é preciso resolvê-lo iterativamente linearizando através de uma série de Taylor truncada depois do primeiro termo derivativo.

$$\hat{y}^0(T_i) = \hat{y}(T_i, \hat{p}^0) + \sum_{j=1}^M \frac{\partial \hat{y}(T, \hat{p})}{\partial p_j} \Big|_{p_j=p_j^0} (p_j - p_j^0), i=1, 2, \dots, N \quad (95)$$

$$T=T_i$$

A equação (95) constitui um sistema de N equações lineares em M incógnitas. Colocando a mesma em notação matricial fica:

$$\hat{y} = \tilde{A} \tilde{p} \quad (96)$$

onde \tilde{A} é a chamada matriz de sensibilidade e cujos elementos são dados por:

$$a_{ij} = \frac{\partial \hat{y}(T, \hat{p})}{\partial p_j} \Big|_{p_j=p_j^0}, i=1, 2, \dots, N \quad (97)$$

$$j=1, 2, \dots, M$$

$$T=T_i$$

\tilde{y} é dado pelas diferenças:

$$\tilde{y} = \tilde{y}_0(T_i) - \tilde{y}(T_i, \tilde{p}_0), \quad i=1, 2, \dots, N, \quad (98)$$

e \tilde{p} é dado pelas diferenças:

$$\tilde{p} = (\tilde{p}_j - \tilde{p}_{j0}) \quad (99)$$

Para garantir a convergência da solução, a aproximação inicial \tilde{p}_0 tem que estar dentro da região de convergência do método empregado, de forma que as derivadas de segunda ordem e superiores não contribuem de maneira significativa no erro de truncamento na série de Taylor. Também de forma a evitar problemas de convergência, pelo usual mal condicionamento da matriz de sensibilidade, e para garantir que o Hessiano (matriz simétrica de segundos derivados de $\tilde{y}(T, \tilde{p})$ em relação aos parâmetros), Marquardt (1963) utilizou matrizes normalizadas e introduziu um fator de ajuste λ que assegura a convergência. De acordo com a teoria por ele desenvolvida sempre existe um λ (na t-ésima iteração) que obrigue a ϵ_{t+1}^* a este o sistema em dotação fica:

$$(\bar{A}_t^* + \lambda_t^{\frac{1}{2}} I)\tilde{p}^* = \tilde{y}^* \quad (100)$$

onde as normalizações seguintes foram aplicadas:

$$\bar{A}_{ij}^* = \frac{a_{ij}}{a_{ii} a_{jj}} \quad (101)$$

$$\tilde{p}_{ij}^* = \frac{p_j}{a_{jj}} \quad \text{e} \quad \tilde{y}_{ij}^* = \frac{y_i}{a_{ii}} \quad (102)$$

assim através de um processo iterativo, detido quando se atingir um valor de linear, escolhido de acordo com as características de cada problema, chegamos a uma solução que ajuste da melhor maneira possível, no sentido dos mínimos quadrados, as observações.

2.5.2.3 Matriz de Resolução

Tendo a equação matricial definindo o problema di-

reto $\hat{y} = \hat{A}\hat{p}$; temos pela teoria de Inversão generalizado, a matriz \hat{A} pode ser decomposta nos seus valores singulares da seguinte maneira:

$$\hat{A} = \hat{U} \hat{S} \hat{V}^t \quad (103)$$

onde as matrizes tem dimensões; $\hat{A}_{n \times m}$, $\hat{U}_{n \times p}$, $\hat{S}_{p \times p}$ e $\hat{V}_{m \times p}$; e aqui \hat{U} é a matriz $n \times p$ que contém os p autovetores associados aos autovalores não nulos do problema:

$$\hat{A}\hat{A}^t \hat{U}_j = s_j^2 \hat{U}_j, \quad j=1, 2, \dots, N \quad (104)$$

\hat{V} é a matriz $m \times p$ que contém os autovalores associados aos autovalores não nulos do problema:

$$\hat{A}^t \hat{V}_j = s_j^2 \hat{V}_j, \quad j=1, 2, \dots, M \quad (105)$$

sendo p o posto da matriz \hat{A} . Finalmente \hat{S} é a matriz $p \times p$ diagonal que contém justamente os valores singulares s_j de \hat{A} . O inverso generalizado \hat{A}^{-1} é dado por:

$$\hat{H} = \hat{V} \hat{S}^{-1} \hat{U}^t \quad (106)$$

com o qual podemos calcular o vetor solução:

$$\hat{p} = \hat{H}\hat{y} \quad (107)$$

O vetor solução \hat{p} relacionado com os problemas direto nos dá a relação entre os valores estimados e os valores reais dos parâmetros, denominando esta relação de matriz de resolução, obtida da seguinte maneira:

$$\hat{p} = \hat{H}\hat{y} = \hat{H}\hat{A}\hat{p} = \hat{R}\hat{p}, \quad \hat{R} = \hat{H}\hat{A} = \hat{V}\hat{S}\hat{U}^t\hat{U}\hat{S}^t\hat{V}^t = \hat{V}\hat{V}^t \quad (108)$$

A matriz \hat{R} mostra a dependência linear da estimativa com os parâmetros do modelo escolhido, uma matriz resolução próxima a uma matriz identidade, significa uma boa resolução dos parâmetros, e a presença de valores altos fora da diagonal será o diagnóstico de que somente estamos obtendo soluções que são nada mais que combinações dos valores reais.

2.5.2.4 Matriz de Densidade de Informação

Da mesma maneira relacionando a solução do Inverso generalizado com o modelo direto, temos a relação entre os dados observados e os dados ajustados, denominando esta relação de matriz de densidade de informação, que é obtida da seguinte maneira:

$$\hat{y} = \hat{A}\hat{p} = \hat{A}\hat{H}\hat{y} = \hat{F}\hat{y}, \quad \hat{F} = \hat{A}\hat{H} = \hat{U}\hat{S}\hat{V}^{-1}\hat{Y}\hat{S}^{-1}\hat{V}^T = \hat{U}\hat{D}^T \quad (109)$$

Em particular, \hat{F} descreve a dependência linear dos dados; altos valores na diagonal mostram que estes dados contém informações específicas sobre o modelo que não estão contidas nos outros dados. Entretanto, altos valores fora da diagonal mostram que estas informações também estão contidas em outros dados.

2.5.3 Testes Realizados

Como teste dos algoritmos de inversão escolhemos um modelo de 5 camadas, com duas camadas de resistividade alta englobando outras três de baixa resistividade, como mostra a tabela 1.

Resistividade Ω-m	Espessura m
459	100
50	400
28	3000
45	7000
10000	

Tabela 1 - Resistividade e espessuras do modelo original.

Vinte e seis dados de resistividade aparente e fase, equi-espacados na escala logarítmica da freqüência, foram calculados entre os períodos $T = 0,001$ seg e $T = 100$ seg, com o auxílio do modelo direto descrito na seção 2.2, e as equações (72), (73) e (74). Estes dados estão na tabela 2.

Período	Sem ruído		Com ruído		Com ruídos e suavizados		
	Resist.	Fase	Resist.	Fase	Resist.	Fase	
	seg	-m	graus	-m	graus	-m	graus
1	0.0010	181.046	63.49	178.284	62.52	170.692	62.69
2	0.0016	148.080	62.47	149.801	63.20	149.366	62.55
3	0.0024	123.740	60.94	124.413	61.28	125.069	61.10
4	0.0038	106.468	59.16	105.523	58.63	106.427	58.74
5	0.0059	94.457	57.55	92.608	56.42	93.422	56.76
6	0.0092	85.499	56.47	84.268	55.59	84.044	55.58
7	0.0143	77.753	55.95	76.049	54.73	76.699	55.35
8	0.0222	70.343	55.75	71.093	56.35	70.335	55.84
9	0.0346	63.234	55.57	63.670	55.95	63.224	55.56
10	0.0538	56.720	55.22	55.441	53.98	56.341	55.75
11	0.0838	51.052	54.65	51.487	55.11	51.016	54.44
12	0.1204	46.340	53.87	46.040	53.58	46.373	53.74
13	0.2031	42.539	53.00	42.282	52.68	42.460	52.80
14	0.3162	39.369	52.16	39.445	52.26	39.569	52.35
15	0.4924	36.561	51.22	37.262	52.20	36.961	51.59
16	0.7667	34.229	49.92	34.074	49.69	34.647	50.18
17	1.1938	32.814	48.39	33.306	49.12	33.117	48.77
18	1.8588	31.927	47.32	31.825	47.17	31.599	47.17
19	3.8943	30.284	46.32	29.556	45.21	29.557	45.10
20	4.5066	27.966	43.60	27.453	42.80	27.879	42.29
21	7.0170	26.878	38.00	27.118	38.34	27.610	37.44
22	10.9260	28.941	30.46	28.784	30.30	29.817	30.43
23	17.0125	35.538	23.04	35.179	22.80	36.039	23.19
24	26.4897	48.120	17.12	47.355	16.85	48.187	17.37
25	41.2463	68.810	13.05	68.348	12.96	68.407	13.28
26	64.2233	100.824	10.56	98.987	10.36	90.233	11.01

Tabela 2 - Dados utilizados nos testes

A filosofia de trabalho, adotada neste trabalho, para a inversão, foi a de obter através da DAC um modelo perto do mínimo global para depois, detalhar o modelo com o algoritmo de Marquardt. Por isto realizamos primeiro a inversão com o PAC, e o modelo obtido, é o ponto inicial para a inversão com o algoritmo de Marquardt. Isto foi realizado para a inversão conjunta da amplitude e da fase e para a inversão da amplitude e da fase separadamente, sendo que para os testes utilizamos três conjuntos de dados. Primeiro os dados sintéticos sem ruído, descritos no parágrafo anterior, que estão na tabela 2. Segundo estes mesmos dados contaminados com ruído gaussiano, média zero e aditivo e o terceiro foram o segundo conjunto de dados, suavisados através da média móvel de três pontos, com pesos (0.25, 0.5, 0.25). Todos estes dados estão na tabela 2.

No primeiro teste, no qual os dados estão sem ruído, e cujo resultado se mostra nas tabelas 3a e 3b, observamos que a inversão conjunta e a da amplitude, devolvem o modelo original, e a inversão da fase fica menos próxima comparativamente às outras das estimativas.

Resistividade Ω-m	Inversão Inicial Ω-m	Espessura m	Intervalo Inicial m
439.32	350	550	100.94
48.93	40	60	406.98
27.85	20	35	2397.60
37.75	30	55	6504.20
8083.20	7500	12600	5000

Tabela 3a - Resultados obtidos através da busca aleatória controlada.

BAC				Marquardt			
Apr. Inicial		Conjunta		Amplitude		Fase	
Resist.	Esp.	Resist.	Esp.	Resist.	Esp.	Resist.	Esp.
-m	m	-m	m	-m	m	-m	m
439.32	102.94	449.99	100.00	447.59	100.00	406.54	95.05
48.93	406.96	50.00	399.99	50.00	400.00	45.17	380.18
27.85	2397.60	28.00	2991.54	28.00	3000.00	25.29	2851.47
37.75	6564.20	44.97	7010.04	45.00	7000.00	40.65	6653.06
8083.20		10004.90		10000.07		9033.09	
$\epsilon^2=0.00302$		$\epsilon^2=7.625 \times 10^{-7}$		$\epsilon^2=7.45 \times 10^{-11}$		$\epsilon^2=1.49 \times 10^{-9}$	
ruído=13.49%		ruído=0.2%		ruído=0.002%		ruído=0.02%	

Tabela 3b - Resultados da inversão obtidas através da busca aleatória controlada do algoritmo de Marquardt (dados sem ruídos).

No segundo teste, feito com os dados contaminados com ruído, observamos o devastador efeito que o ruído tem sobre a fase, fornecendo a inversão com a mesma, uma estimativa muito longe da original, sendo que na estimativa da inversão conjunta e da amplitude o efeito se faz sentir sobretudo na estimativa do valor da resistividade das camadas. Apesar disto fornecem um resultado muito mais razoável do que a fase. Os resultados deste teste estão nas tabelas 4a e 4b.

Resistividade Intervalo Inicial Espessura Intervalo Inicial

421.64	350	550	104.31	75	125
47.97	40	60	443.88	300	500
27.58	20	35	2879.10	2000	4000
43.76	30	55	6820.60	5000	9000
11490.00	7500	12500			

Tabela 4a - Resultados obtidos através da busca aleatória.

BAC				MARQUARDT			
Apr. Inicial	Conjunta	Amplitude	Fase	Resist.	Esp.	Resist.	Esp.
-m	-m	-m	-m	-m	-m	-m	-m
421.64	104.31	412.89	100.91	306.35	111.38	57.72	34.03
47.97	443.88	49.93	418.68	47.87	413.95	6.40	250.72
27.58	2879.10	27.76	3515.54	28.03	3378.51	3.51	1217.88
43.76	6820.60	55.05	7625.96	47.37	6701.41	7.33	2874.12
11490.00		12340.20		7266.49		1612.37	
$\epsilon^2 = 0.0077$		$\epsilon^2 = 8.4 \times 10^{-5}$		$\epsilon^2 = 2.9 \times 10^{-5}$		$\epsilon^2 = 1.5 \times 10^{-4}$	
22.39%		2.13%		1.25%		2.86%	

Tabela 4b - Resultados da inversão obtidas através da busca aleatória controlada e do algoritmo de Marquardt (dados com ruído).

No terceiro caso, quando aplicamos a suavização dos dados com ruído, observamos uma sensível melhoria da estimativa dada pela inversão da fase, e notamos que na inversão da amplitude as estimativas das resistividades se vêem afetadas para pior, já na conjunta este comportamento melhora um pouco, os resultados deste teste se mostram nas Tabelas 5a e 5b.

Resist. Intervalo Inicial	Espessura Intervalo Inicial.		
-m	-m	m	m
516.41	350	550	92.23
50.57	40	60	437.27
27.42	20	35	3330.10
53.17	30	55	7471.10
8666.50	7500	12500	5000

Tabela 5a - Resultados obtidos através da busca aleatória controlada (dados suavizados)

BAC	MARQUARDT			
Apr.Inicial	Conjunta	Amplitude	Fase	
Resist.	-	-	-	-
516.49	92.23	410.60	99.67	204.66
50.57	437.27	49.89	408.36	46.06
27.42	3330.10	27.97	3990.11	28.06
53.17	7471.10	71.01	8774.57	46.29
8666.50		8945.76		1698.73
$\epsilon^2=0.0063$		$\epsilon^2=8 \times 10^{-5}$		$\epsilon^2=3 \times 10^{-5}$
20.05%		2.08%		1.27%
				1.27%

Tabela 5b

A seguir mostraremos a utilidade da matriz de resolução, na análise da qualidade das estimativas dos parâmetros obtidos nos três testes acima. A matriz de resolução não depende das observações, mas somente do modelo e do ponto escolhido. É portanto a mesma para os 3 casos, desde que o ponto seja o mesmo. Por isto, colocamos na tabela 6, as matrizes da resolução da inversão conjunta, da amplitude e da fase, todas calculadas com o posto 8. O posto escolhido corresponde ao autovalor cuja razão entre ele e o subsequente (ordenados em ordem descendente), é maior que 10.

Nas matrizes de resolução observamos que elas se aproximam bastante do ideal (uma matriz identidade), a exceção de alguns parâmetros. Assim vimos que na matriz de resolução da inversão conjunta, a estimativa da espessura da terceira camada é uma combinação linear do valor da resistividade da quarta camada com o seu próprio valor, sendo que na estimativa da resistividade da quarta camada acontece o mesmo com relação ao valor dela mesma é o valor da espessura da terceira camada. Na matriz de resolução resultante da inversão da amplitude, este caso se verifica com a estimativa da espessura da primeira camada em relação aos valores da resistividade da segunda e quarta camadas. E na matriz de resolução resultante da inversão da fase, o mesmo acontece com a estimativa da resistividade da quarta camada com relação ao valor da resistividade da segunda e terceira camada.

a. Conjunta

	Res.1	Res.2	Res.3	Res.4	Res.5	Res.1	Res.2	Res.3	Res.4
Res.1	0.999								
Res.2	-0.000	0.999							
Res.3	-0.000	-0.001	0.995						
Res.4	-0.002	-0.015	-0.058	0.469					
Res.5	-0.002	-0.010	-0.041	-0.373	0.998				
Res.1	0.000	0.000	0.002	0.021	0.000	0.999			
Res.2	0.000	0.002	0.008	0.081	0.000	0.002	0.998		
Res.3	-0.002	-0.021	-0.080	-0.730	-0.002	0.021	0.012	0.553	
Res.4	-0.000	-0.002	-0.010	-0.092	-0.000	-0.002	0.001	-0.056	0.954

Tabela 6 - Matrizes de resolução

b. Amplitude

	Res.1	Res.2	Res.3	Res.4	Res.5	Res.1	Res.2	Res.3	Res.4
Res.1	0.645								
Res.2	-0.016	0.963							
Res.3	-0.002	-0.005	0.998						
Res.4	-0.014	-0.032	-0.008	0.976					
Res.5	-0.022	-0.052	-0.012	-0.037	0.999				
Res.1	-0.073	-0.160	-0.042	-0.116	-0.000	0.452			
Res.2	0.004	0.009	0.002	0.007	0.000	-0.033	0.999		
Res.3	-0.026	-0.058	-0.015	-0.042	-0.000	0.200	0.001	0.963	
Res.4	-0.001	-0.002	-0.000	-0.001	-0.000	0.007	0.000	-0.001	0.99

c. Fase

	Res.1	Res.2	Res.3	Res.4	Res.5	Res.1	Res.2	Res.3	Res.4
Res.1	0.970								
Res.2	-0.029	0.819							
Res.3	-0.029	-0.180	0.813						
Res.4	-0.029	-0.180	-0.186	-0.604					
Res.5	-0.030	-0.180	-0.189	-0.402	0.995				
Res.1	-0.030	-0.090	-0.092	-0.197	-0.002	0.964			
Res.2	-0.014	-0.090	-0.093	-0.197	-0.002	-0.035	0.889		
Res.3	-0.014	-0.090	-0.093	-0.197	-0.002	0.035	-0.010	0.959	
Res.4	-0.014	-0.090	-0.093	-0.197	-0.002	-0.035	-0.010	0.040	0.881

A matriz densidade de informação nos permite tirar conclusões sobre a informação contida nos dados. Para uma melhor visualização desta matriz preferimos representá-la através de um gráfico de contornos e sua respectiva perspectiva vista do canto superior direito, as figuras a seguir mostram as matrizes densidade de informação referente aos dados da amplitude da resistividade aparente esta fase. Nelas observamos que os pontos que se encontram nos extremos dos perfis são os que contém maior quantidade de informação. Pela comparação entre as duas matrizes de informação, a da amplitude e a da fase, podemos ver que a da amplitude indica que o perfil da amplitude contém mais pontos com informação que o perfil da fase possui os pontos com informação mais concentrada.

3 APLICAÇÃO A DADOS REAIS

3.1 Introdução

Os dados utilizados aqui para exemplificar o processamento e a inversão matemática, descritos nos dois capítulos anteriores, fazem parte de uma geotransversal que começa no Oceano Pacífico e vai até o escudo Brasileiro, da faixa compreendida entre os 24° S e os 20° S de latitude, a geotransversal completa se mostra na figura 21. Dentro dela escolhemos a estação ESC, localizada no altiplano Boliviano, e cujos dados foram coletados nos dias de 14 a 20 de setembro de 1982. Na figura 22 mostra-se uma parte dos dados do dia 19, estes dados foram utilizados a cada 4 segundos, e as características do equipamento e as condições da coleta dos dados estão descritos no artigo de Schwarz et al. (1984).

3.2 Processamento dos Dados

Seguindo o processo descrito no capítulo 1 efetuamos o processamento dos dados, e nas tabelas 7a e 7b mostramos o tensor obtido, antes e depois de rodá-lo para a direção principal. Nas tabelas 8a e 8b mostramos estes mesmos tensores (sem e com rotação) representados na sua amplitude e fase. Na tabela 9 estão as coerências entre os campos Ex, Ey, Hy e Hx; nesta tabela observamos que existe uma alta correlação entre os campos Ex e Hy e entre Ey e Hx, e que as outras coerências se mantêm relativamente baixas. Na tabela 10 mostramos o Skew, o ângulo de rotação para a direção principal. A elipticidade (Beta), e os pesos das componentes estruturais D_1 , D_2 e D_3 , como vemos pelos valores dos últimos, a estação ESC se comporta como uma terra 1-D, pois os valores de D_1 se sobrepõem aos de D_2 e D_3 , e o valor do Skew se mantém em média abaixo de 0.2. Na tabela 11 estão os valores das resistividades e fases médias, que por manter-se quase iguais nos dão outra indicação da unidimensionalidade na estação ESC.

3.3 Inversão dos Dados

Para a inversão, tomamos os dados denominados R-M e PHI-M na tabela 11, nos períodos compreendidos entre 5620 seg e 16 seg; e para ajustar estes dados escolhemos um modelo de 3 camadas. Realizamos primeiro a inversão como o algoritmo da busca aleatória controlada. Para isto solicitamos que fossem realizadas, um máximo de 2000 avaliações da função que define o modelo, e que o número de pontos de busca no espaço dos parâmetros fosse igual a 50. Minimizamos a norma residual 2 e pedimos que o resíduo fosse menor que 5%, os intervalos iniciais para as resistividades foi de 0.1 -m a 1000 -m e para as espessuras de 1 km a 100 km. O mínimo global encontrado, o nível de ruído que ele possui, a amplitude e a fase da resistividade aparente. A diferença entre estas e a amplitude e a fase da resistividade aparente escolhida (R-M e PHI-M), e a transformação de Weidelt, aparecem na tabela 12.

Nas tabelas 13a e 13b temos as especificações da entrada do programa, os níveis de ruído produzidos pelos 50 pontos no espaço dos parâmetros, as coordenadas dos 10 pontos selecionados e os seus respectivos níveis de ruído. Na tabela 14 mostramos a análise estatística dos 50 pontos no espaço dos parâmetros, e temos a média e o desvio padrão, e as matrizes de correlação e covariância. Nesta tabela é importante observar que, para a resistividade e espessura da segunda camada, temos um desvio padrão extremamente alto, 71% para a resistividade e 25% para a espessura, o que nos indica que estes parâmetros não estão bem resolvidos, ou que eles são a fonte de incerteza; na matriz de correlação só identificamos uma forte correlação entre a espessura da primeira e segunda camada, sendo que não identificam outras correlações significativas.

Tomando o modelo denominado mínimo global da PAC, como modelo inicial para o algoritmo de Marquardt, realizamos a segunda inversão. Na tabela 15 mostramos o modelo obtido, o nível de ruído, o valor de ϵ^2 definido pelas equações (89), (90) e (91), a amplitude e a fase da resistividade aparente produzida pelo modelo, as diferenças entre estas e a amplitude e a fase (R-M e PHI-M) encontradas na seção anterior, e a transformação de Weidelt. Na tabela 16 estão a matriz ortogonal \tilde{V} da decomposi-

ção da matriz sensibilidade calculada. No modelo encontrado, e os valores singulares da mesma decomposição. Na tabela 17 mostramos o posto adotado, de acordo com o critério descrito da seção 2.5.3, e as matrizes de correlação, resolução e covariância. Na matriz de correlação vemos altas correlações entre as estimativas da resistividade e espessura da segunda camada e a espessura da primeira camada, assim como entre a espessura da primeira e segunda camada, e entre a resistividade e espessura da segunda camada. Na matriz de resolução observamos que o parâmetro designado pela resistividade da segunda camada está muito mal resolvido como já era de se esperar pelo alto desvio padrão encontrado na estimativa da PAC para este parâmetro. Nas figuras 24, 25, 26 e 27 representamos os mapas de contornos e as perspectivas, vistas do canto superior direito, das matrizes densidade e informação da amplitude e fase da resistividade aparente dada pelo modelo encontrado, nelas podemos ver que, poucos pontos possuem informação dentro da curva, e que, estes pontos com informação se localizam nos extremos da curva.

CONCLUSÃO

É extremamente dispendioso o trabalho dedicado ao processamento e interpretação de dados magnetotelúricos, e todo este será em vão, se não se contar com dados de extrema boa qualidade na coleta das observações dos campos elétrico e magnético. O trabalho de equipe de campo deve ser preciso, para isto deve-se fomentar o intercâmbio de informações com equipes de reconhecida experiência na coleta de dados. É preciso também estabelecer, entre os corpos utilizados, uma normalização os métodos de processamento e interpretação dos dados, assim como o intercâmbio de informações e experiências.

A quantidade e forma de representação, dos critérios a ser analisados deve ser regional, pois em um sistema de produção, é preciso contar com o compromisso entre tempo e exatidão; devido a que de fato a coleta dos dados, pode demorar de 1 a 2 semanas por estação, o processamento e interpretação também pode prolongar-se por 1 a 2 semanas por estação. O que naturalmente pode tornar-se crítico quando se tem um número significativo de estações.

No processamento, é de vital importância, conhecer exatamente a função de transferência do equipamento utilizado; pois de outra forma se torna impossível obter boas curvas de resistividade aparente. Os pesos das componentes estruturais, parecem ser uma ferramenta rápida e confiável, para a determinação da dimensionalidade da estrutura de subsuperfície, e as resistividades e fases médias como critérios para reconhecer a unidimensionalidade da terra. Estas entretanto, não são recomendáveis para a realização da inversão, pois todos os efeitos se disfarçam e provocam distorções no modelo estimado. Desta forma é melhor utilizar, para a inversão, uma das resistividades rodadas, ou seja, a correspondente a polarização E ou B, dependendo das características do local e dos dados.

Pelos testes realizados com os métodos de inversão, vimos que é útil realizar a suavização dos dados da fase, pois isto melhora a solução a suavização da amplitude não parece oferecer melhorias, portanto não se aconselha a suavização da mesma. É preciso procurar na medida do possível realizar a inversão conjunta da amplitude e da fase, assim como a pesagem nos

dados, pois isto incorpora maior qualidade de informação disponível, e por sua vez ajuda a resolver as ambiguidades.

Sempre deve realizar-se a análise da qualidade da solução, para poder saber se a solução obtida é confiável ou não. Para isto, recomenda-se utilizar os valores das matrizes de resolução, correlação, covariância e densidade de informação, e o ajuste obtido.

Infelizmente a análise do ruído se vê impossibilitada, pois desconhecemos a distribuição do ruído nos dados da amplitude e fase da resistividade aparente. Mas deve-se tornar sempre presente, que o algoritmo de Marquardt minimiza o efeito do ruído Gaussiano, aditivo e de média zero que os dados possuam na determinação dos parâmetros. Se a distribuição do ruído, nas observações, não obedece alguma destas condições, então o modelo estimado não representará corretamente a distribuição de resistividade de subsuperfície.

BIBLIOGRAFIA

- BEVINGTON, P.R. - 1969 - Data Reduction and Error Analysis for the Physical Sciences, McGraw-Hill Book Co. New York.
- CAGNIARD, L. - 1953 - Basic Theory of the Magnetotelluric Method of Geophysical Prospecting. *Geophysics* 18(3), p. 605-635.
- CANTWELL, T. - 1960 - Detection and Analysis of Low Frequency Magnetotelluric Signals. Tese de Doutorado, MIT, Cambridge, Mass.
- EDWARDS, R.N.; BAILEY, R.C. e GARLAND, G.D. - 1981 - Conductivity Anomalies: Lower Crust or Asthenosphere? Physics of the Earth and Planetary Interiors 25(3):263-272.
- EGGERS, D.E. - 1982 - An Eigenstate Formulation of the Magnetotelluric Impedance Tensor. *Geophysics* 47(8):1204-1214.
- FERENCZY, L. - 1980 - M-Fitting in the Processing of the Magnetotelluric Data. *Acta Geodaetica Geophys. Et Montanist.* 15 p.45-58.
- FISCHER, G. e LEQUANG, B.V. - 1981 - Topography and minimization of the standard deviation in one dimensional magnetotelluric modelling. *Geophys. J.Roy. Astr.Soc.* 67 p. 279-292.
- FISCHER, G. e SCHNEGG, P.A. - 1980 - The dispersion relations of the magnetotelluric response and their incidence on the inversion problem. *Geophys. J.Roy. Astr. Soc.* 62 p. 661-674.
- FISCHER, G.E.; SCHNEGG, P.A.; PEGUIRON, M. e LEQUANG, B.V. - 1981 - An Analytic One-Dimensional Magnetotelluric Inversion Scheme, *Geophys. J.Roy.Astr.Soc.* 67 p. 257-278.
- FORSYTHE, G.E.; MALCOLM, M.A. e MOLER, C.B. - 1977 - Computer Methods for Mathematical Computations Prentice Hall Inc. New Jersey.
- GOLDBERG, S. e ROTSEIN, Y. - 1982 - A Simple Form of Presentation of Magnetotelluric Data Using the Bostick Transformation *Geophysical Prospecting* 30 p. 211-216.
- GOLDSTEIN, M.A. e STRANGWAY, D.W. - 1975 - Audio-Frequency Magnetotelluric with a Grounded Electric Dipole Source *Geophysics* 40(4): 669-683.
- GOLUB, G.H. e REINSCH, C. - 1970 - Singular Value Decomposition and Least Squares Solution, *Numer. Math.* 14, p. 403-420.
- GRILLOT, L.R. - 1975 - Calculation of the Magnetotelluric Tensor Impedance Analysis of Band Limited MT Signal Pairs *Geophysics*

- 40(5):790-797.
- GUNDEL, A. - 1977 - Eromagnetische Induktion in einer Dreidimensionalen Salzstruktur. Tese de Doutorado Göttingen, República Federal da Alemanha.
- HAAK, V. - 1978 - Interpretations - Verfahren für die magnetotellurik unter Besonderer Berücksichtigung Lateral Variierender Elektrischer Leitfähigkeit im Erdinnern und eines Raumlich Inhomogenen Induzieren Magnetefelds. München RFA.
- HERMANCE, J.P. - 1973 - Processing of magnetotelluric data Physics of the EARTH and Planetary Interiors 71, p. 349-364.
- JONE, A.B. e HUTTON, R. - 1979 - A Multi-station Magnetotelluric Study in Southern Schotland II Monte-Carlo Inversion of the Data and Its Geophysical and Tectonic Implications Geophys.J. Roy.Astr.Soc. 56, p.351-368..
- JUPP, D.L.B. - 1978 - Estimation of the Magnetotelluric Impedance Functions Physics of the Earth and Planetary Interiors, 17 (21):75-82.
- JUPP, D.L.B. e VOZOFF, K. - 1975 - Stable Iterative Methods for the Inversion of Geophysical Data, Geophys. J.Roy.Astr.Soc.42, p. 957-976.
- JUPP, D.L.B. e VOZOFF, K. - 1976 - Discussion on: The Magnetotelluric Method in the Exploration of Sedimentary Basins. Geophysics, 41(2):325-328.
- KAO, D. e QRR, D. - 1982 - Magnetotelluric Studies in the Market Weighton Area of Eastern Ingland, Geophys. J.Roy.Astr.Soc. 78 (21):323-338.
- KAO, D.W. e RANKIN, D. - 1975 - Enhacement od Signal-to-Noise Ratio in Magnetotelluric Data Geophysics, 42(1):103-110.
- KHACHAY, O.A. - 1978 - On Solving the Inverse Problem of magneto telluric Souding for a complex impedance Izvestiya, Academy of Science USSR Physics of the Solid Earth, 14(2):896-900.
- LARSEN, J.C. - 1981 - A New Technique for Layered Earth Magnetotelluric Inversion Geophysics, 46(9):1247-1257.
- LAWSON, C.L. e HANSON, R.J. - 1974 - Solving Least Sovares Problems. Prentice Hall Englewood Cliffs New Jersey.
- MARQUARDT, D.W. - 1963 - An Algorithm for Least Squares Estimation of Non Linear Parameters. J.Soc.Ind.Appl.Math. 11, p. 431-441.
- MORRISON, H.T.; WOMBELL, E. e WARD, S.H. - 1968 - Analysis of Earth Impedance Using Magnetotellurics Fields, Journal of Geo

- physical Research, 73(8):2769-2778.
- NABETANI, S. e RANKIN, P. - 1969 - An Inverse Method of Magnetotelluric Analysis of Multilayered Earth Geophysics, 34(11):75-86.
- OLDENBURG, D.W. - 1979 - One Dimensional Inversion of Natural Source Magnetotelluric Observation Geophysics, 44(71): 1218-1244.
- PATELLA, P. - 1976 - Interpretation of Magnetotelluric Resistivity and Phase Scattering Over Horizontal Layers, Geophysics, 41(1):96-105.
- PEDERSEN, L.B. - 1982 - The Magnetotelluric Impedance Tensor, Its Random and Bias Errors, Geophysical Prospecting, 30(2): 188-210.
- PRICE, W.L. - 1977 - A Controlled Random Search Procedure for Global Optimization, The Computer Journal, 20, p. 367-370.
- RANKIN, D. e PASCAL, F. - 1983 - A Practical Method for the inversion of Magnetotelluric Data for a Layered Earth, Geophysics, 48(61):736-744.
- RANKIN, D. e REDDY, I.K. - 1969 - A Magnetotelluric Study of Resistivity Anisotropy, Geophysics, 34(31):438-449.
- REDDY, I.K. e RANKIN, D. - 1974 - Coherence Function for Magnetotelluric Analysis Geophysics, 39(31):312-320.
- ROKYTYANSKY, I.I. - 1982 - Geoelectromagnetic Investigation of the Earth's Crust and Mantle, Springer Verlag.
- SCHUMUCKER, V. e WEIDELT, P. - 1975 - Electromagnetic Induction in the Earth, Lecture Notes, 178 p.
- SCHWARZ, G.; HAAK, V.; MARTINEZ, E. e BANNISTER, J. - 1984 - The Electrical Conductivity of the Andean Crust in Northern Chile and Southern Bolivia as Inferred from Magnetotelluric Measurements, Journal of Geophysics, 55, p. 169-178.
- SILVA, J.B.C. e HOHMANN, G.H. - 1983 - Nonlinear Magnetic Inversion Using a Random Search Method Geophysic, 48(121):1645-1658.
- SILVESTER, P. e HASLAM, C.R.S. - 1972 - Magnetotelluric Modelling by the Finite Element Method Geophysical Prospecting, 20(4): 872-891.
- SIMS, W.E.; BOSTICK JR. F.X. e SMITH, H.W. - 1971 - The Estimation of Magnetotelluric Impedance Tensor Elements from Measured Data Geophysics, 35(51):938-942.
- SOARE, A.; STANICA, R.; PLAVITA, R. e CUCU, G. - 1978 - Some Techniques of Magnetotelluric Data Processing Revue Roumaine de

- Geologie, Geophysique et Geographie Tome 22, p. 107-112.
- STEINER, F. - 1980 - M-Fitting [Fitting According to the Most Frequent Value] and its Comparison with the Method of Least Squares. Acta Geodaetica Geophysica et Montanistica, 15, p. 37-44.
- VOZOFF, K. - 1972 - The Magnetotelluric Method in the Exploration of Sedimentary Basins Geophysics, 37(1):98-141.
- VOZOFF, K. e JUPP, D.L.B. - 1975 - Joint Inversion of Geophysical Data Geophys. J.Roy.Astr.Soc.42, p. 977-991.
- WEIDELT, P. - 1972 - The Inverse Problem of Geomagnetic Induction Zeitschrift für Geophysik 38, p. 257-289.
- WV, F.T. - 1968 - The Inverse Problem of Magnetotelluric Soundings Geophysics, 33(6):972-979.

	MITTE	STD	ABW	MITTE	STD	ABW
1	10.63	.046		22.85	.915	
2	3.29	2.330		22.05		
3	.42	.011		3.12	.770	

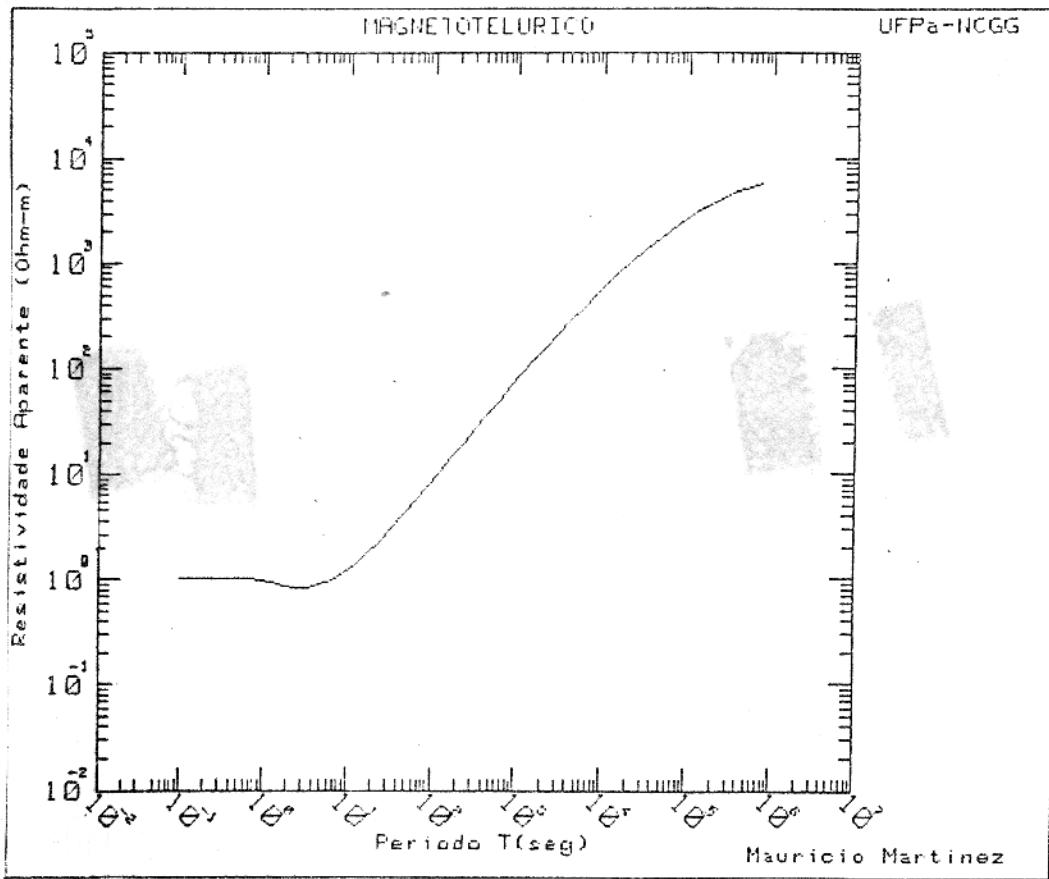
MATRIZ CORRELAÇÃO

	RES	1	RES	2	RES	3	ESP	1	ESP	2
RES	1	10.000000E-01	48.2085931E-03	21.9565634E-02	25-0375253E-02	33.0204525E-02				
RES	2	43.2095931E-03	10.000000E-01	44.2486969E-02-58.2546783E-02	32.1521290E-02					
RES	3	21.9565634E-02	44.2486969E-02	10.000000E-01-01.6410805E-02-45.	0939797E-03					
ESP	1	-25.0375253E-02-58.2546783E-02-20.6410895E-02	10.000000E-01-92.	0015264E-02						
ESP	2	33.0204525E-02	32.1521290E-02-45.0939797E-03-92.0015264E-02	10.000000E-01						

MATRIZ COVARIANÇA

	RES	1	RES	2	RES	3	ESP	1	ESP	2
RES	1	21.1187692E-04	51.8276635E-04	11.5568086E-05-10.5314867E-03	11.6810473E-03					
RES	2	51.8276635E-04	54.7257171E-01	11.8561208E-03-12.4737680E-01	57.8998011E-02					
RES	3	11.5568086E-05	11.8661208E-03	13.1183288E-05-21.6389242E-04-39.7577845E-05						
ESP	1	-10.5314867E-03-12.4737680E-01-21.6389242E-04	83.7776092E-02-64.	8221567E-02						
ESP	2	11.6310447E-03	57.8998011E-02-39.7577945E-05-64.	8221567E-02	59.2555352E-02					

Tabela 14



50

Figura 5 - Amplitude da Resistividade Aparente produzida por um modelo com resistividade das camadas aumentando com a profundidade.

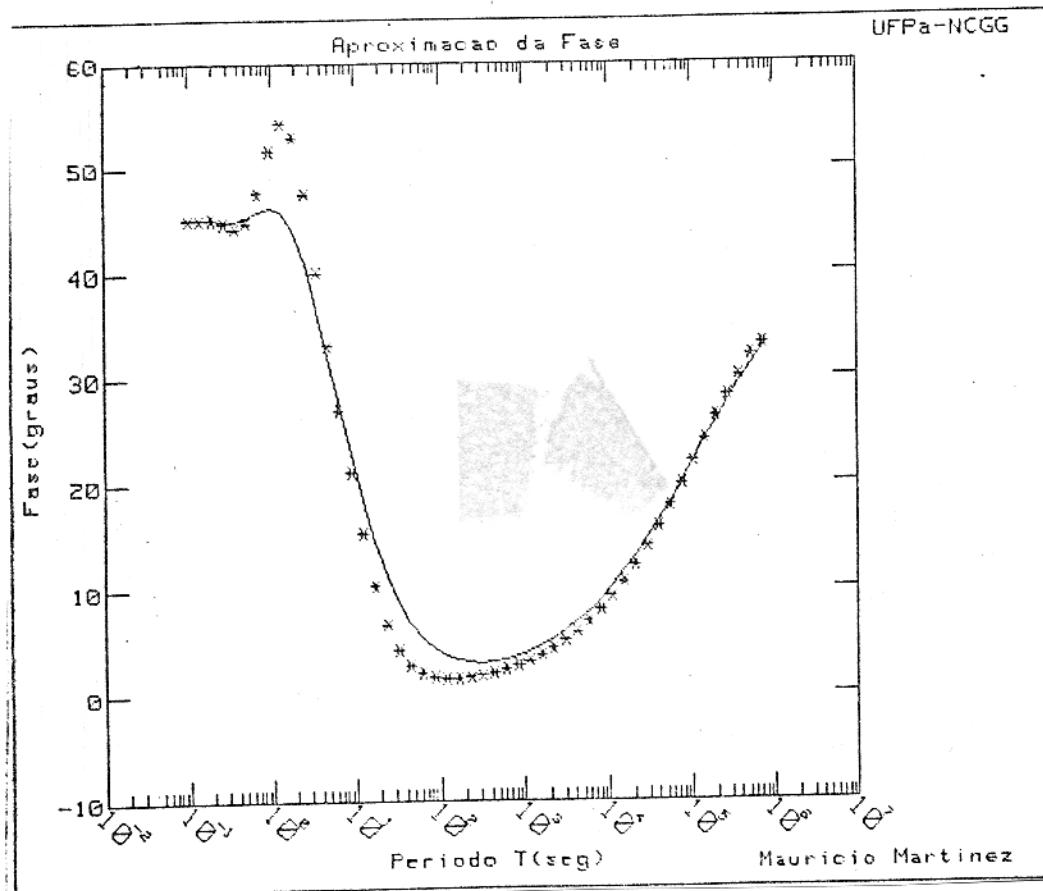


Figura 6 - Fase [exata e aproximada] calculada pela eq.(82) da Resistividade Aparente produzida por um modelo com resistividade das camadas aumentando com a profundidade.

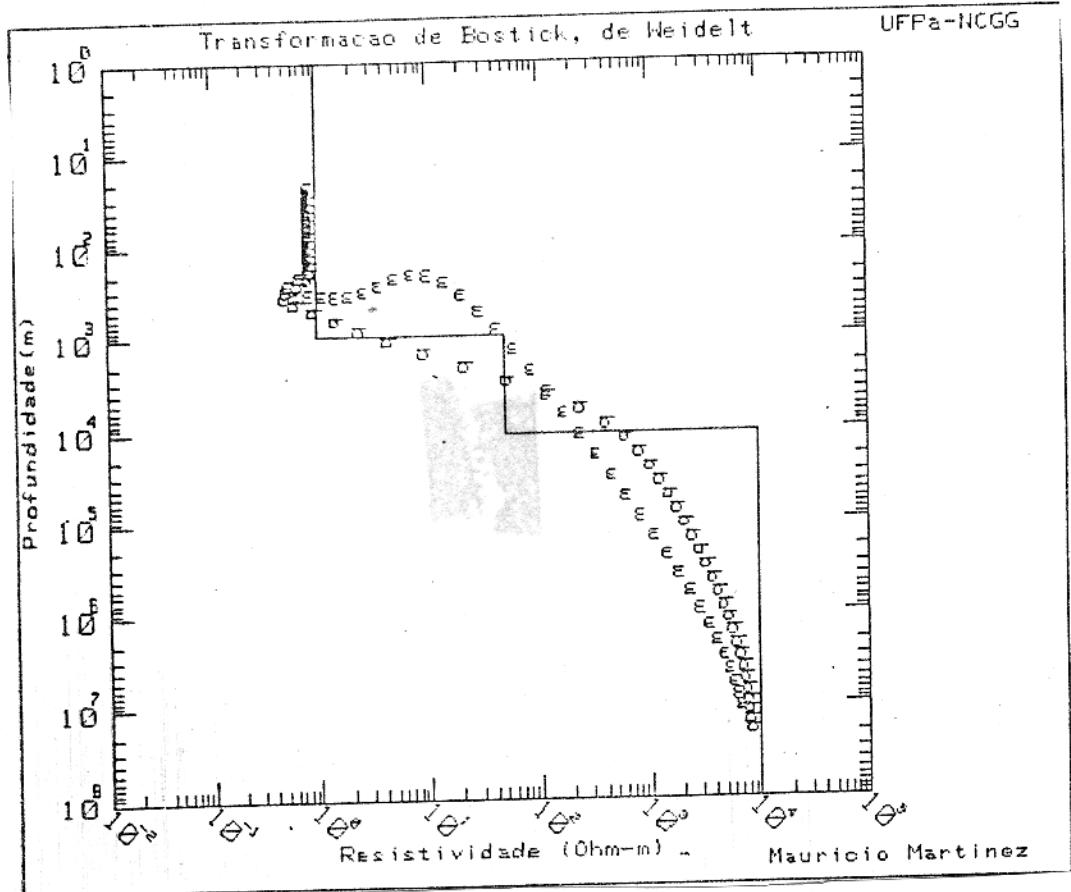


Figura 7 - Comparação do modelo com as transformadas de Bostick (b) e de Weidelt (ω), calculadas com a fase aproximada pela equação (82).

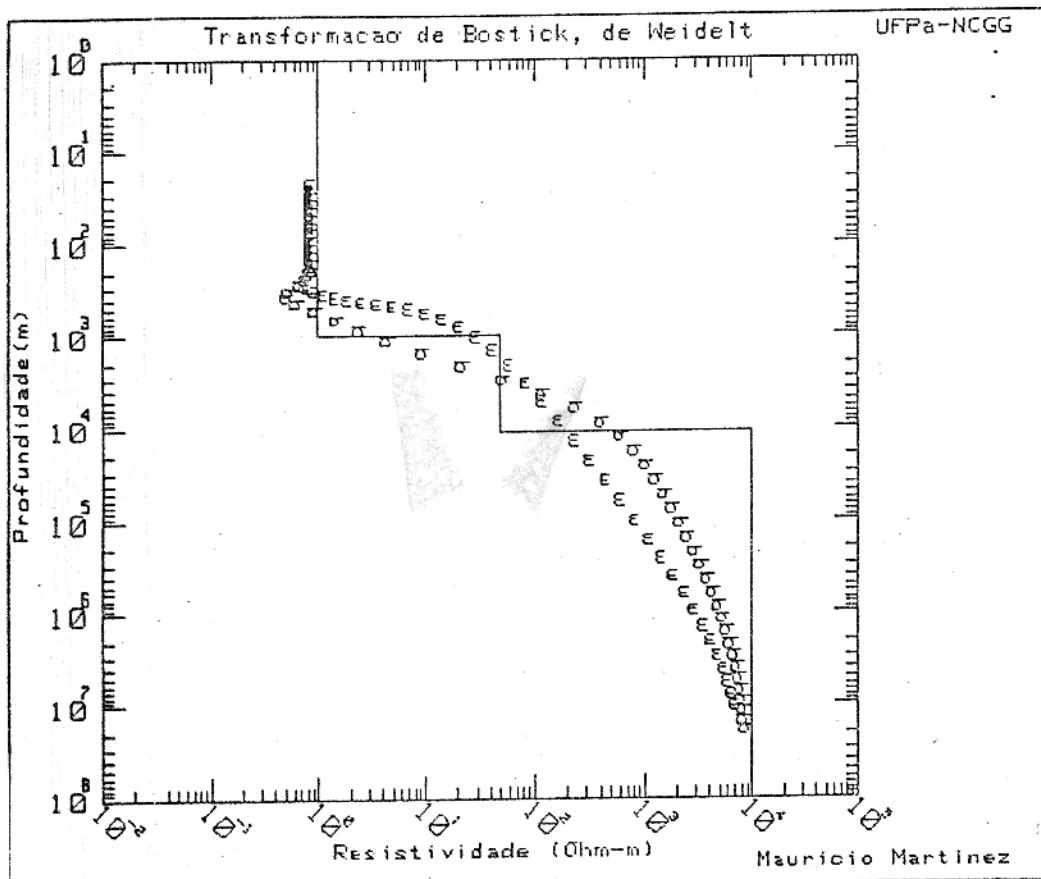


Figura 8 - Comparação do modelo com as transformadas de Bostick (b) e de Weidelt (ω), calculadas com a fase exata.

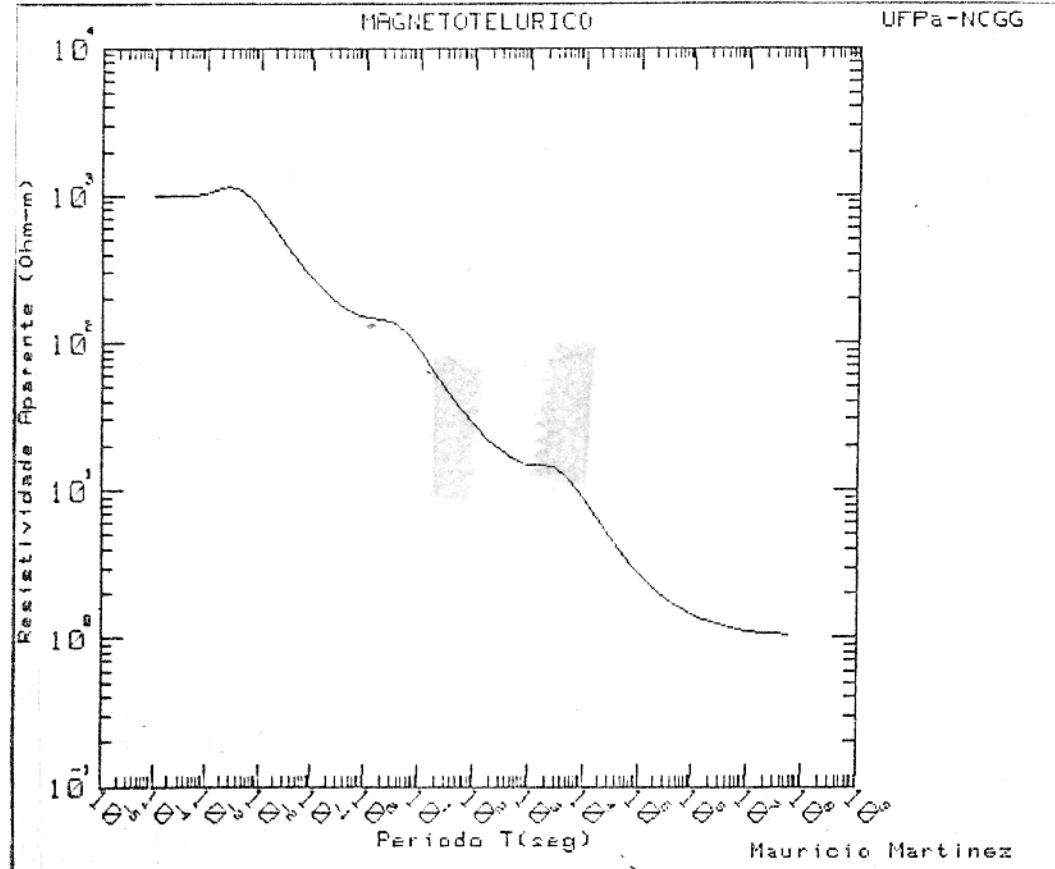


Figura 9 - Amplitude da Resistividade Aparente produzida por um modelo com resistividade das camadas diminuindo com a profundidade.

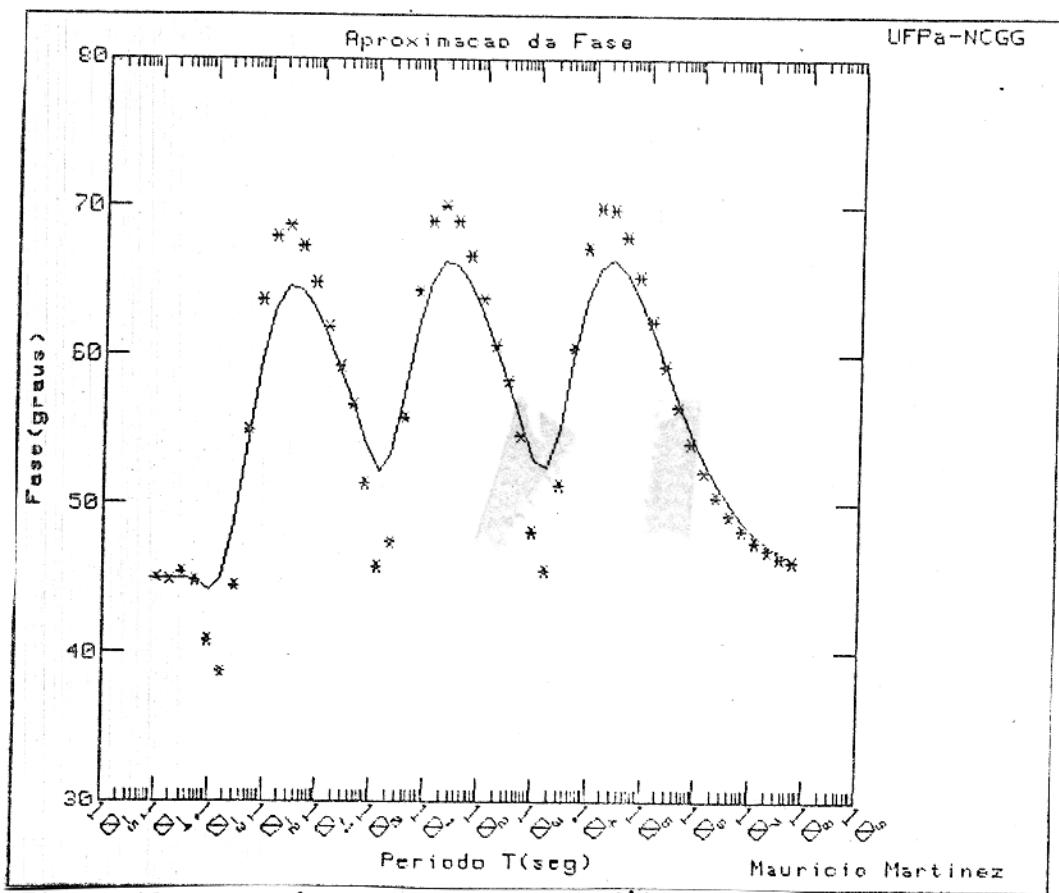


Figura 10 - Fase exata e aproximada (*) com a equação (82) da resistividade Aparente produzida por um modelo com resistividade das camadas diminuindo com

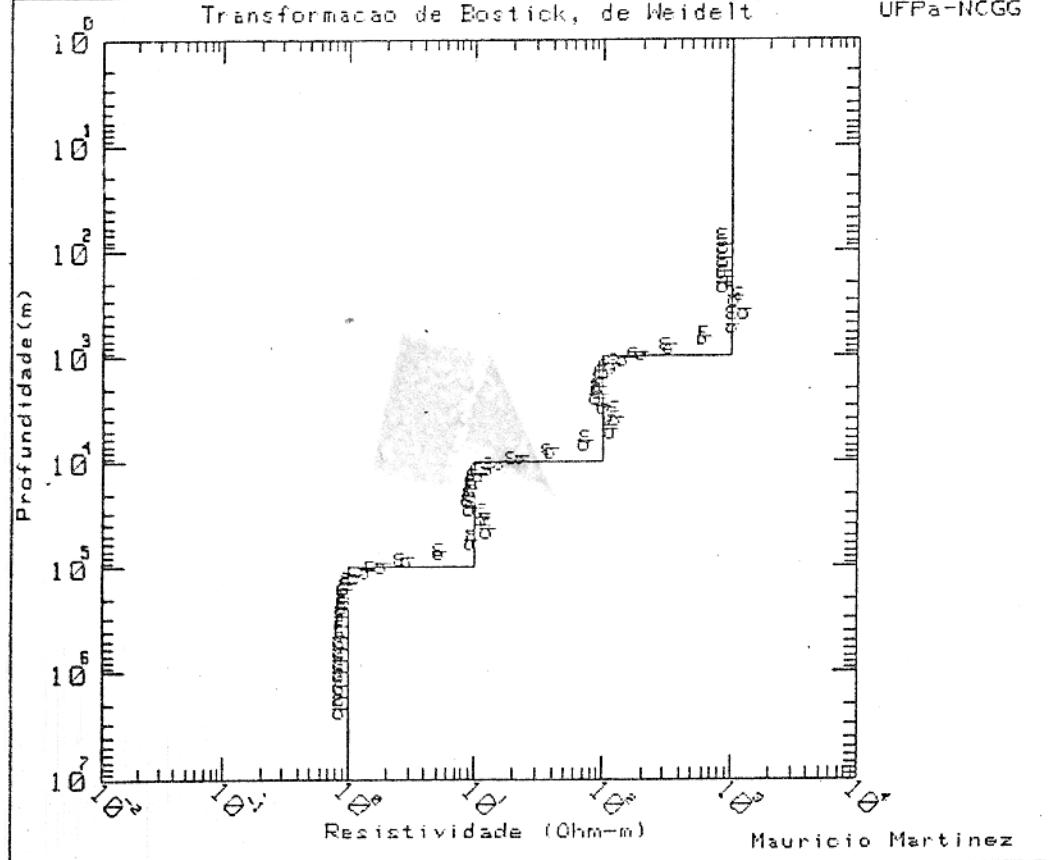


Figura 11 - Comparação do modelo com as transformadas de Bostick (b) e de Weidelt (ω), calculadas com a fase aproximada pela equação (82).

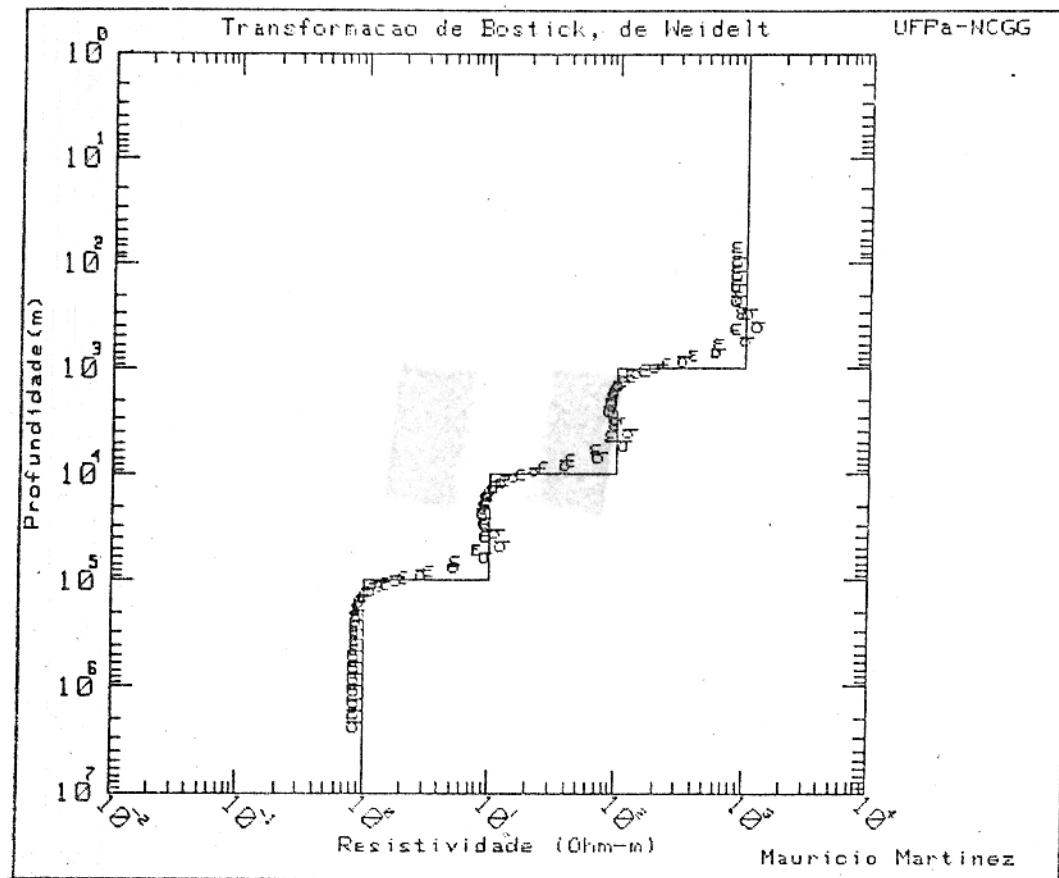


Figura 12 - Comparação do modelo com as transformadas de Bostick (bl) e de Weidelt (ω), calculadas com a fase exata.

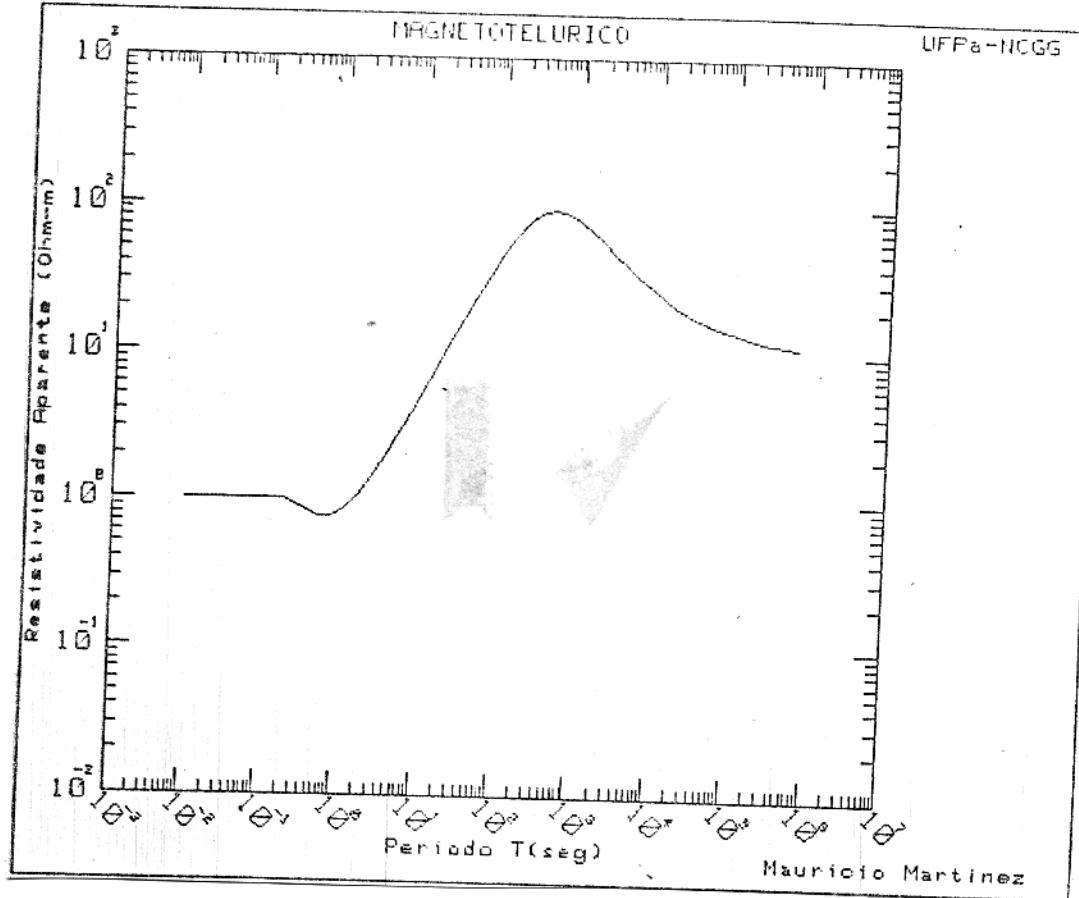


Figura 13 - Amplitude da Resistividade Aparente produzida por um modelo com resistividade das camadas "mistas" (aumentado e diminuindo) com a profundidade.

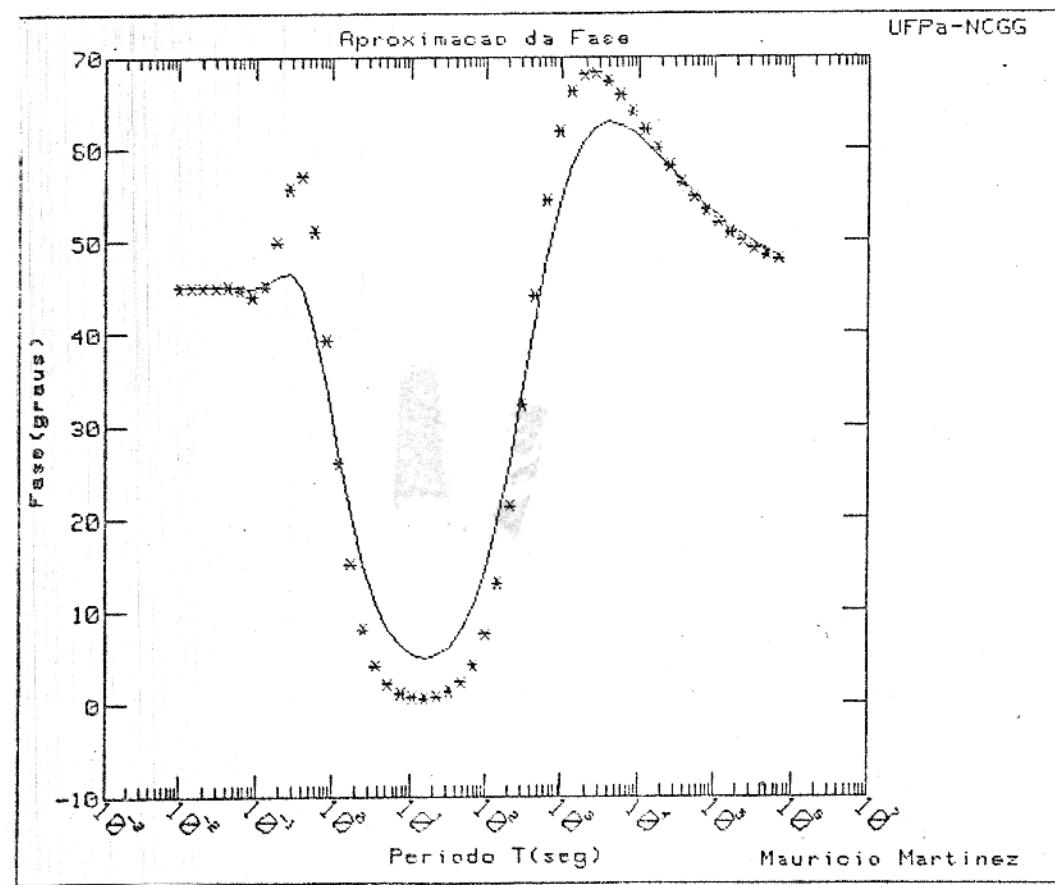


Figura 14 - Fase (exata e aproximada (*)) calculada para eq.(82) da Resistividade Aparente produzida por um modelo com Resistividade "mista" (aumentando e diminuindo) com a profundidade.

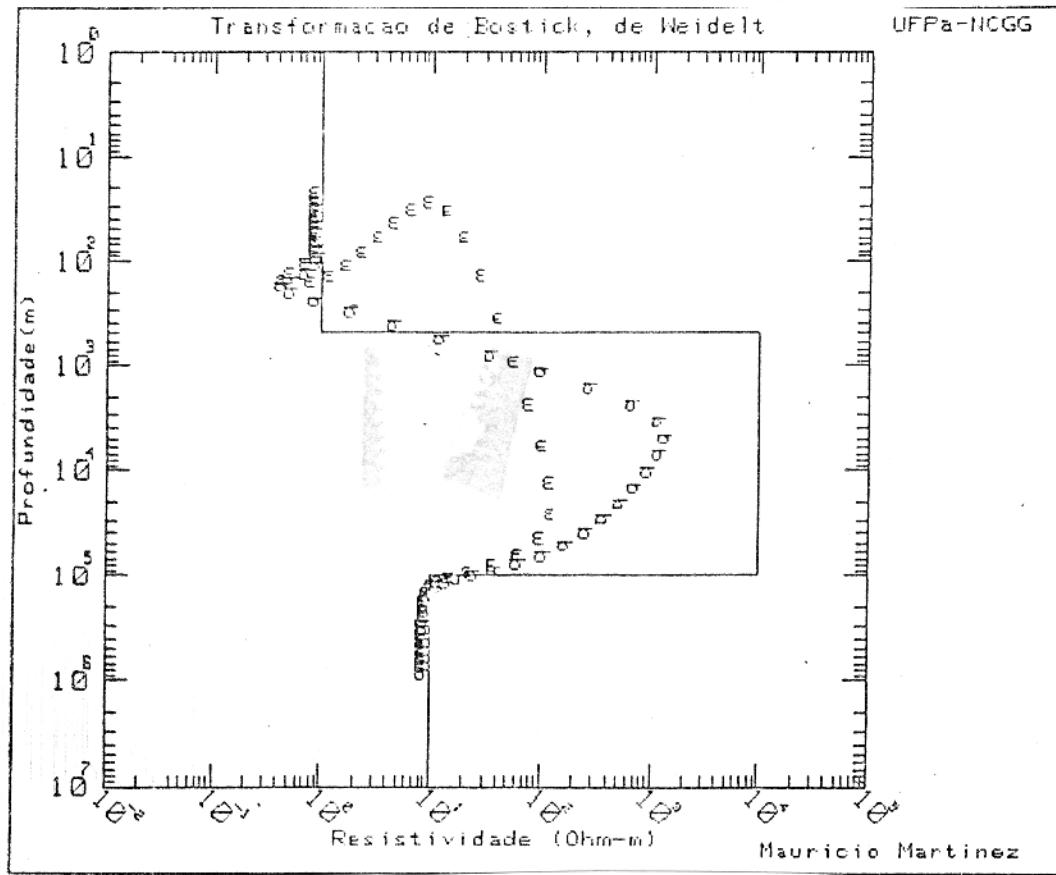


Figura 15 - Comparação do modelo com as Transformações de Bostick (b) e de Weidelt (ω), calculadas com a fase aproximada pela equação (82).

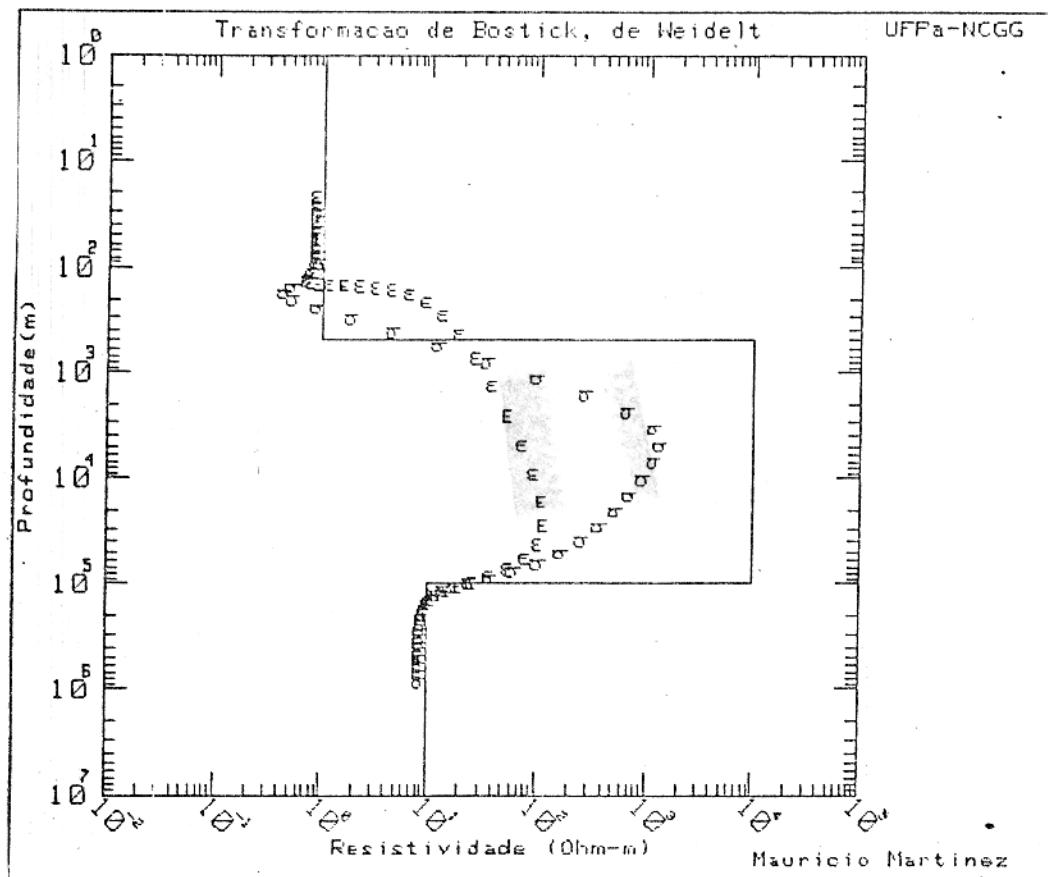


Figura 16 - Comparação do modelo com as Transformações de Bostick (b) e de Weidelt (ω), calculadas com a fase exata.

MATRIZ F DA AMPLITUDE

CONTOUR KEY	
1	0.100
2	0.200
3	0.300
4	0.400
5	0.500
6	0.600
7	0.700
8	0.800
9	0.900
10	1.000

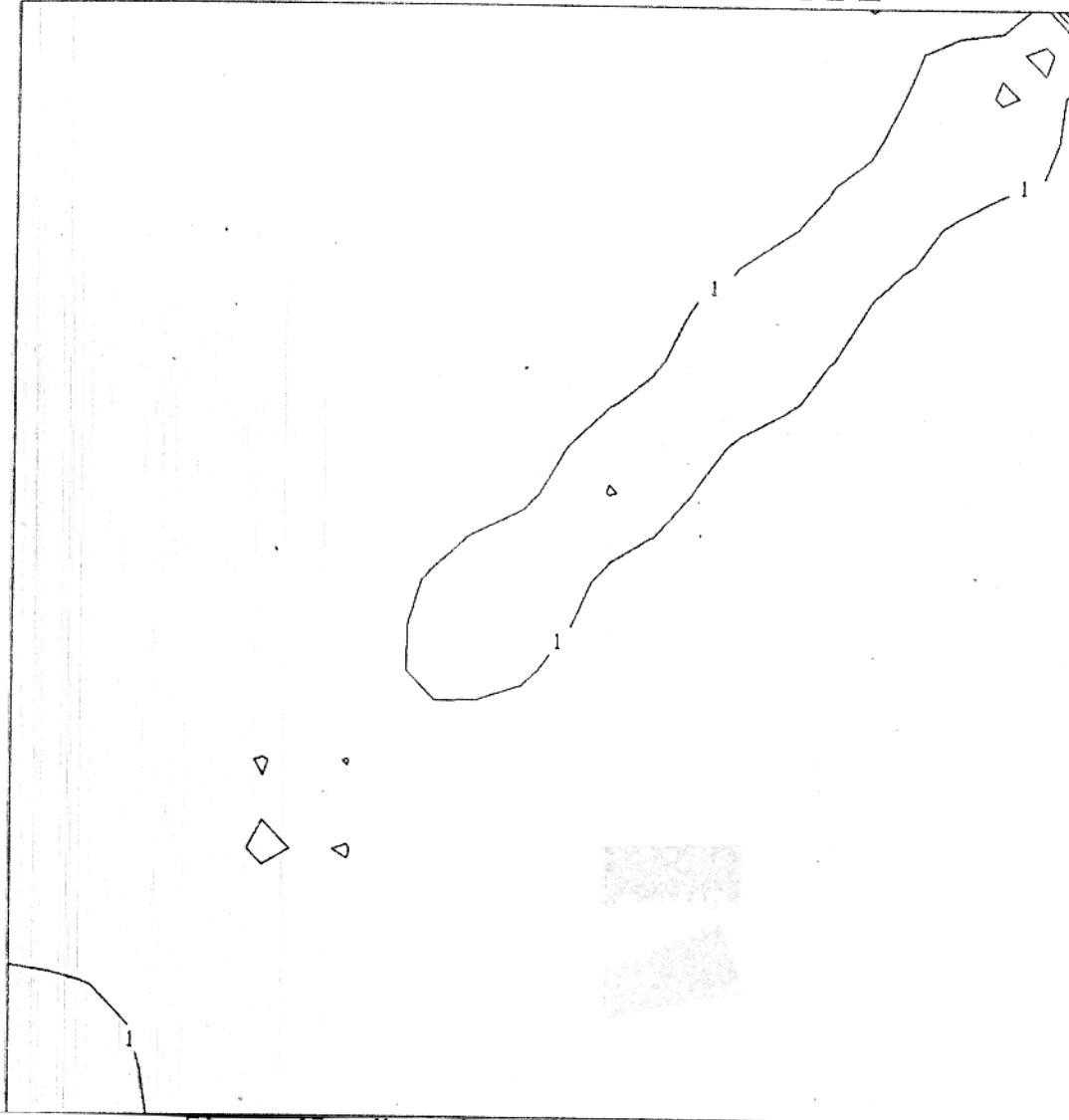


Figura 17 - Mapa de contornos da matriz densidade de Informação da Amplitude da Resistividade Aparente.

VISTA 3D DA MATRIZ F DA AMPLITUDE

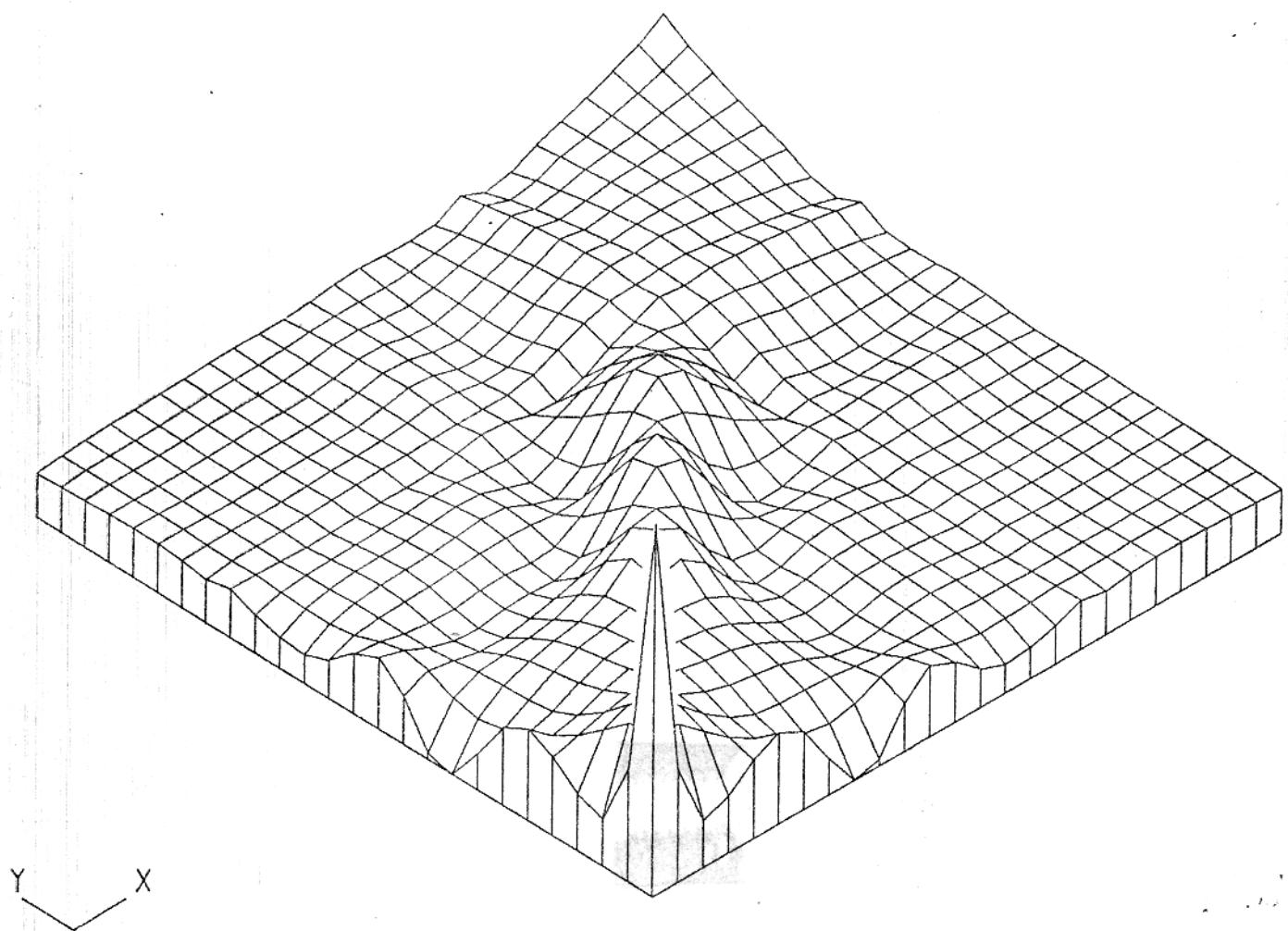


Figura 18 - Perspectiva tridimensional da matriz Densidade de Informação, da Amplitude da Resistividade Aparente vista do canto superior direito.

MATRIZ F DA FASE

CONTOUR KEY	
1	0.100
2	0.111
3	0.122
4	0.133
5	0.144
6	0.156
7	0.167
8	0.178
9	0.189
10	0.200



Figura 19 - Mapa de contornos da matriz Densidade de Informação da Fase da Resistividade Aparente.

VISTA 3D DA MATRIZ F DA FASE

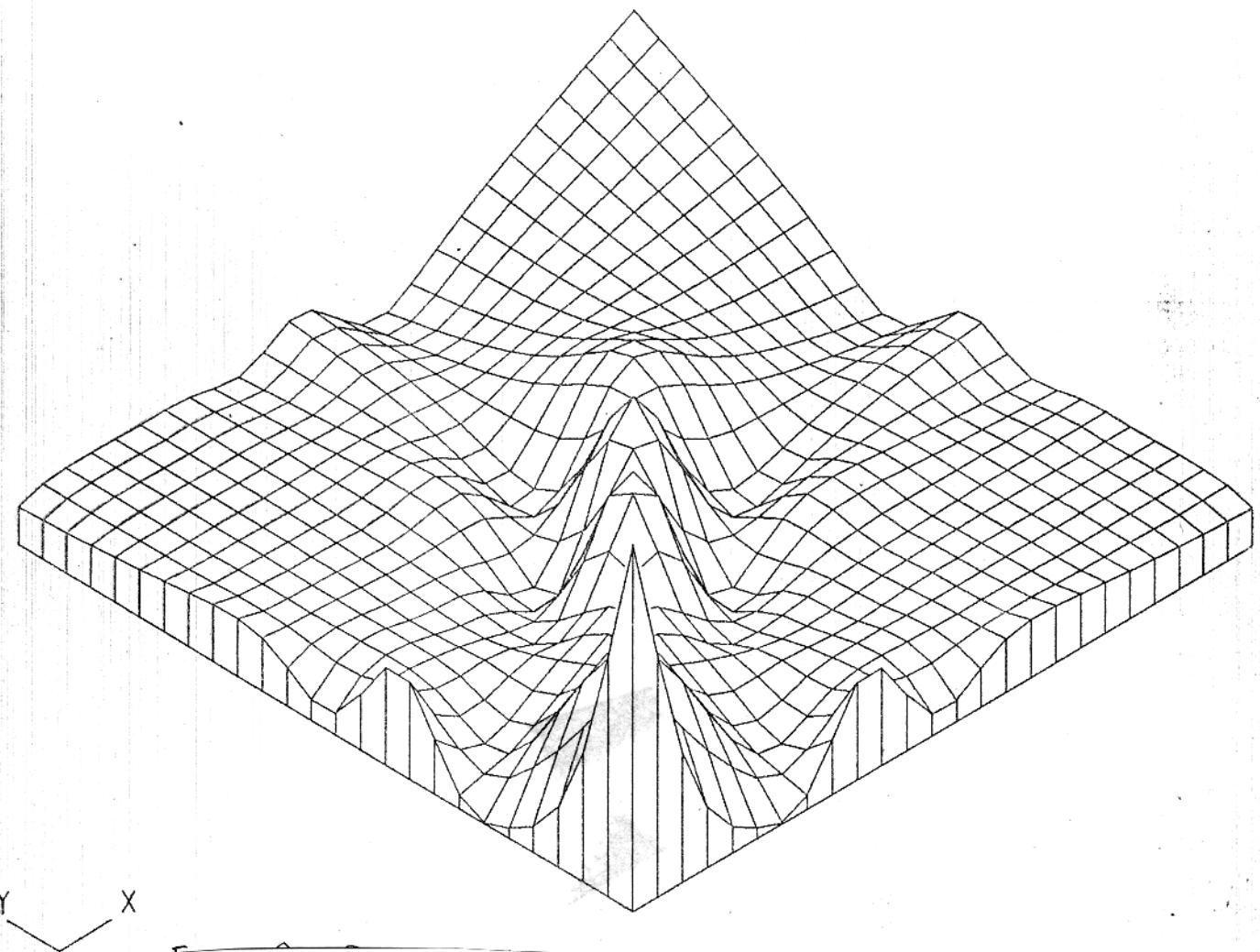


Figura 20 - Perspectiva tridimensional da matriz Densidade de Informação, da Fase de Resistividade Aparente, vista do canto superior direito.

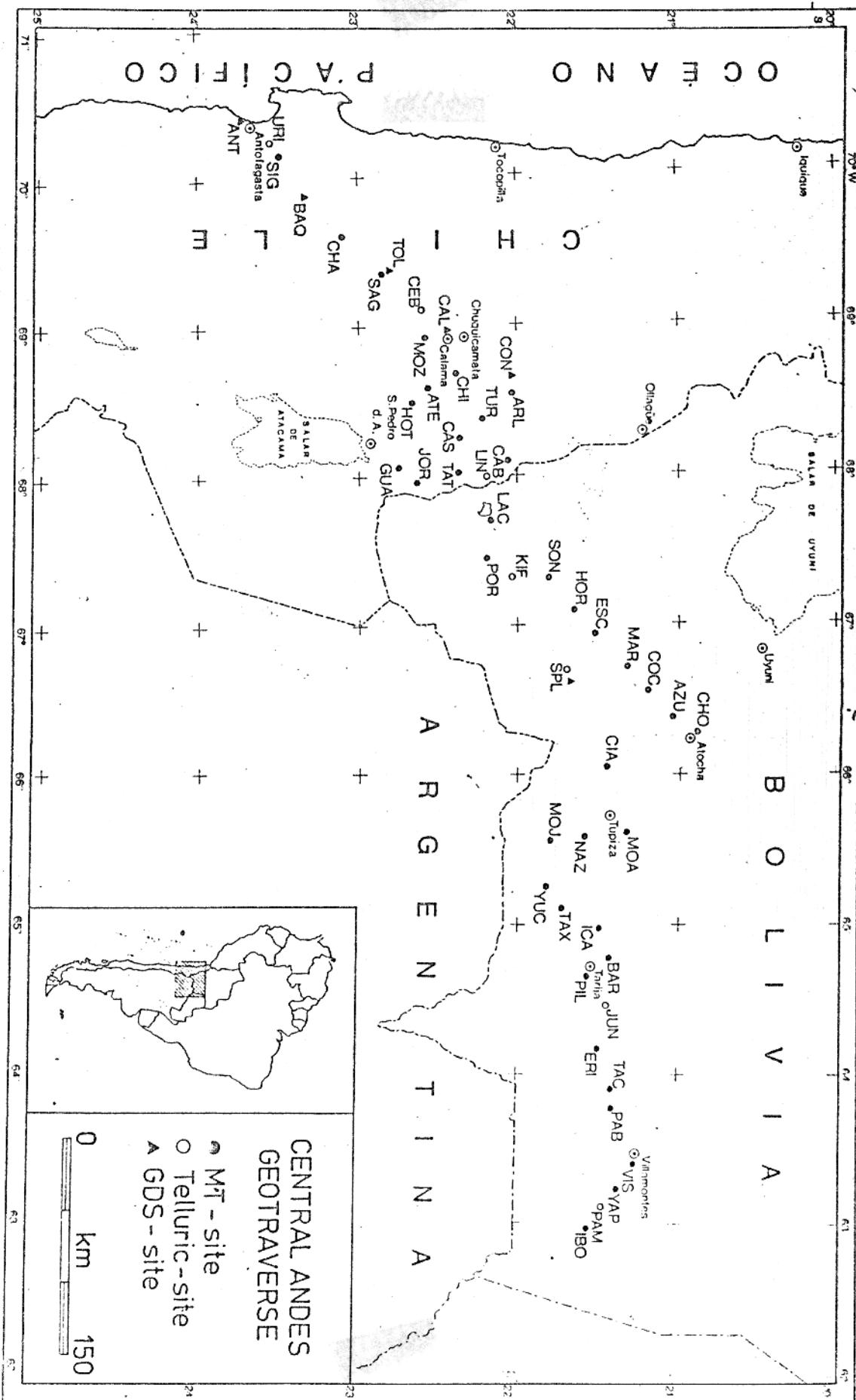


Figura 21 - Mapa mostrando a localização geográfica da geotransformação andina, e a localização da a mesma da estação ESC.

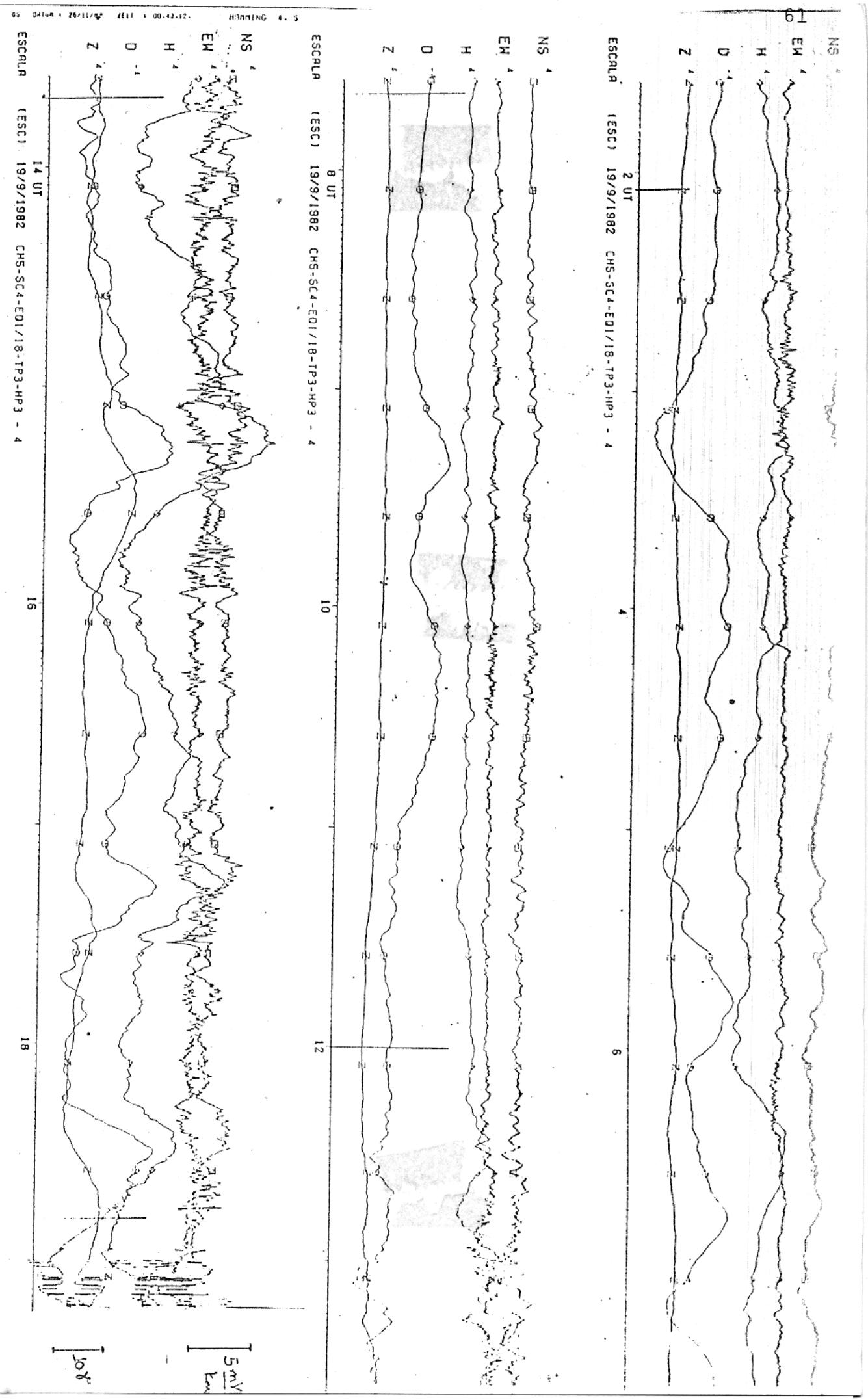


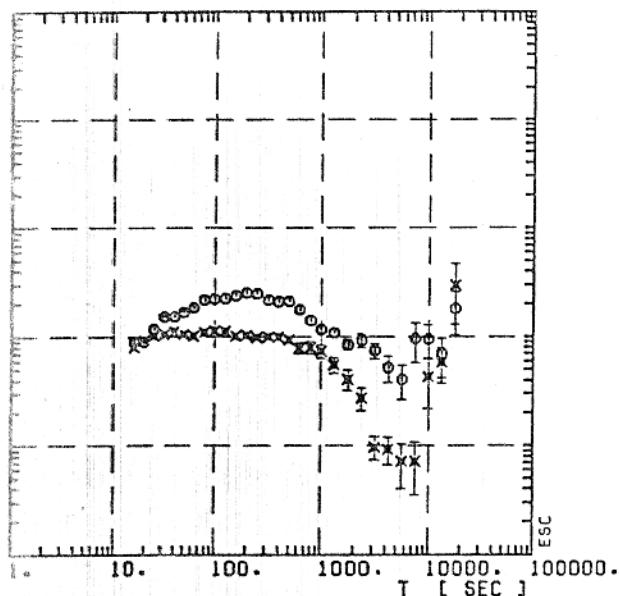
Figura 22 - Dados de campo elétrico e magnético recoletados na estação ESC no dia 19 de setembro de 1982. Digitalizados a cada 4 seg.

19 de setembro de 1982. Digitalizados a cada 4 seg.

ESC

ESCALA 14-20

APPARENT RESISTIVITY

○ RHO_{XY} ✕ RHO_{ZY}

PHASE

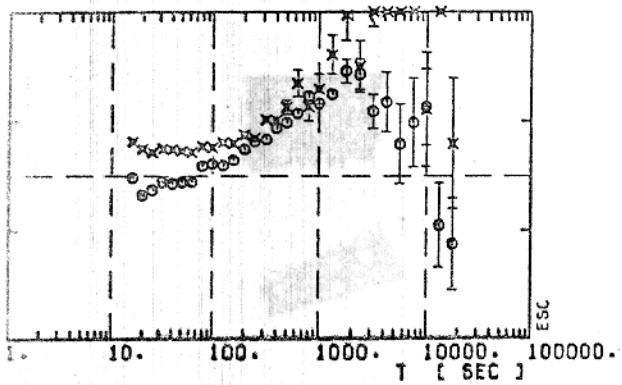
○ PHI_{XY} ✕ PHI_{ZY}

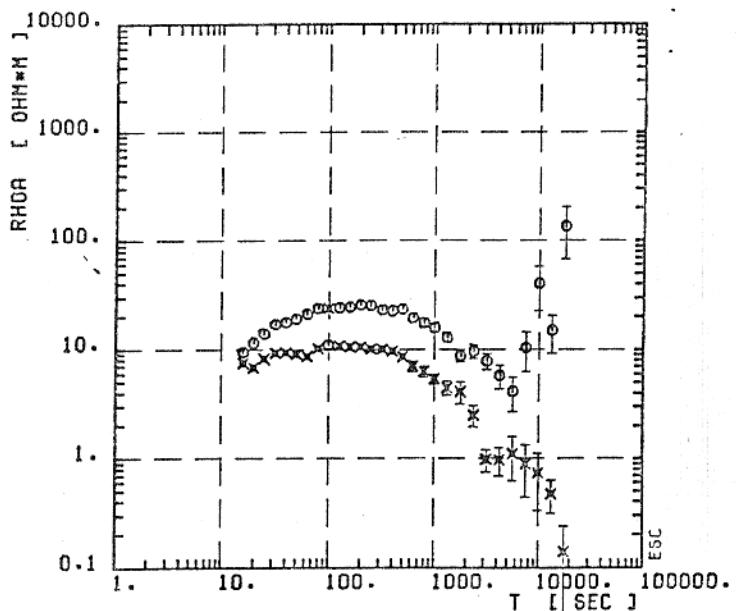
Figura 23a - Amplitude e fase da Resistividade Aparente, com os elementos Zxy e Zyx do tensor sem rotação.

ESC

ESCALA 14-20

APPARENT RESISTIVITY

○ RHOMAX ✕ RHOMIN



PHASE

○ PHIMAX ✕ PHIMIN

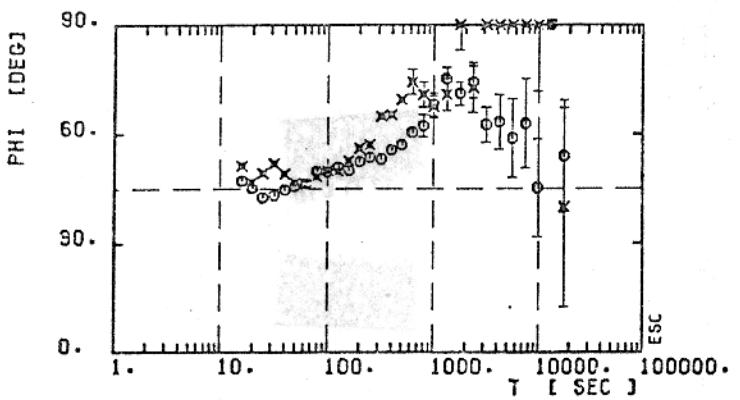


Figura 23b - Amplitude e fase da Resistividade Aparente, com os elementos Zxy e Zyx do tensor com rotação.

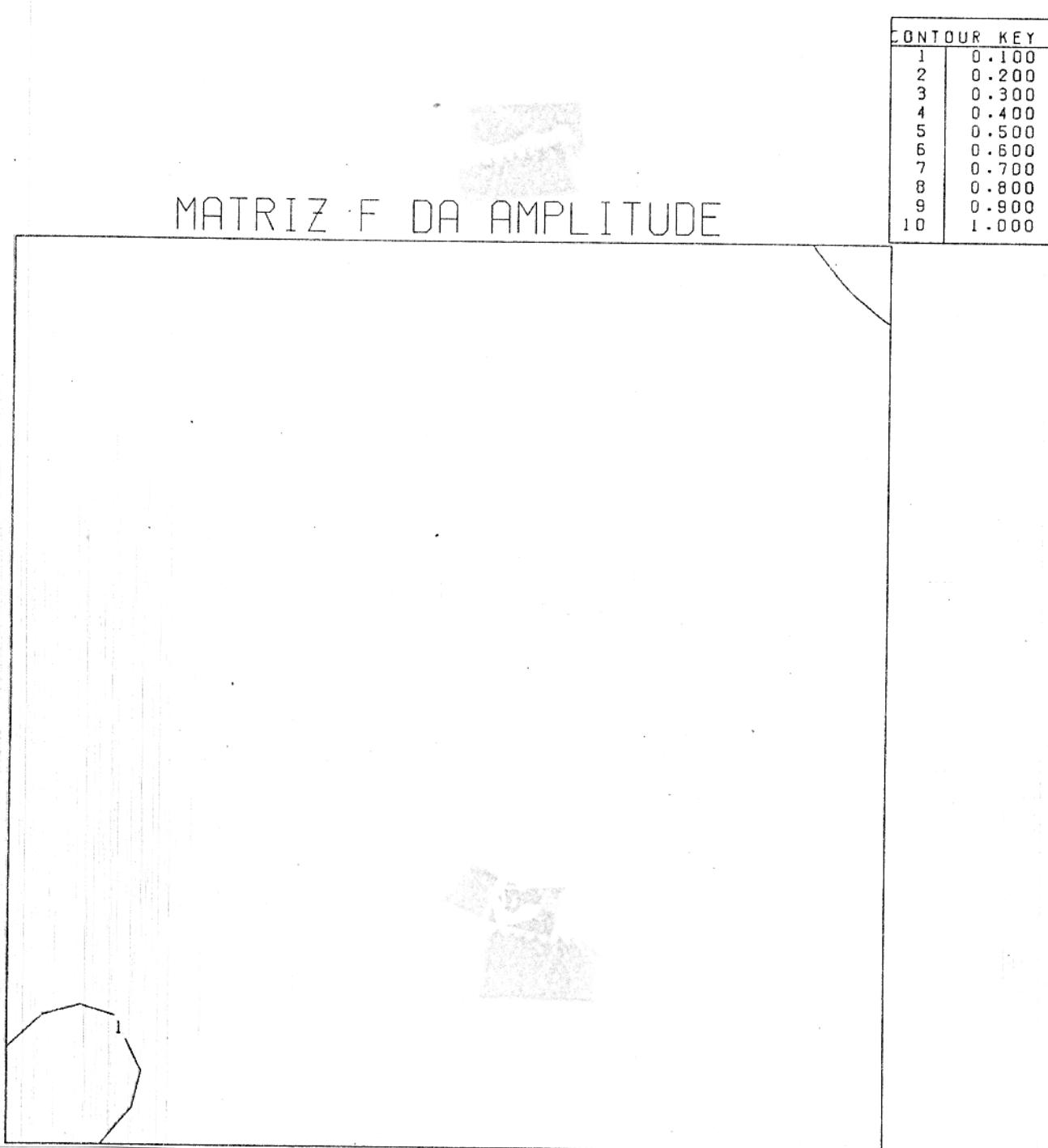


Figura 24 - Mapa de contornos da matriz Densidade de Informação da Amplitude da Resistividade Aparente.

VISTA 3D DA MATRIZ F DA AMPLITUDE

64

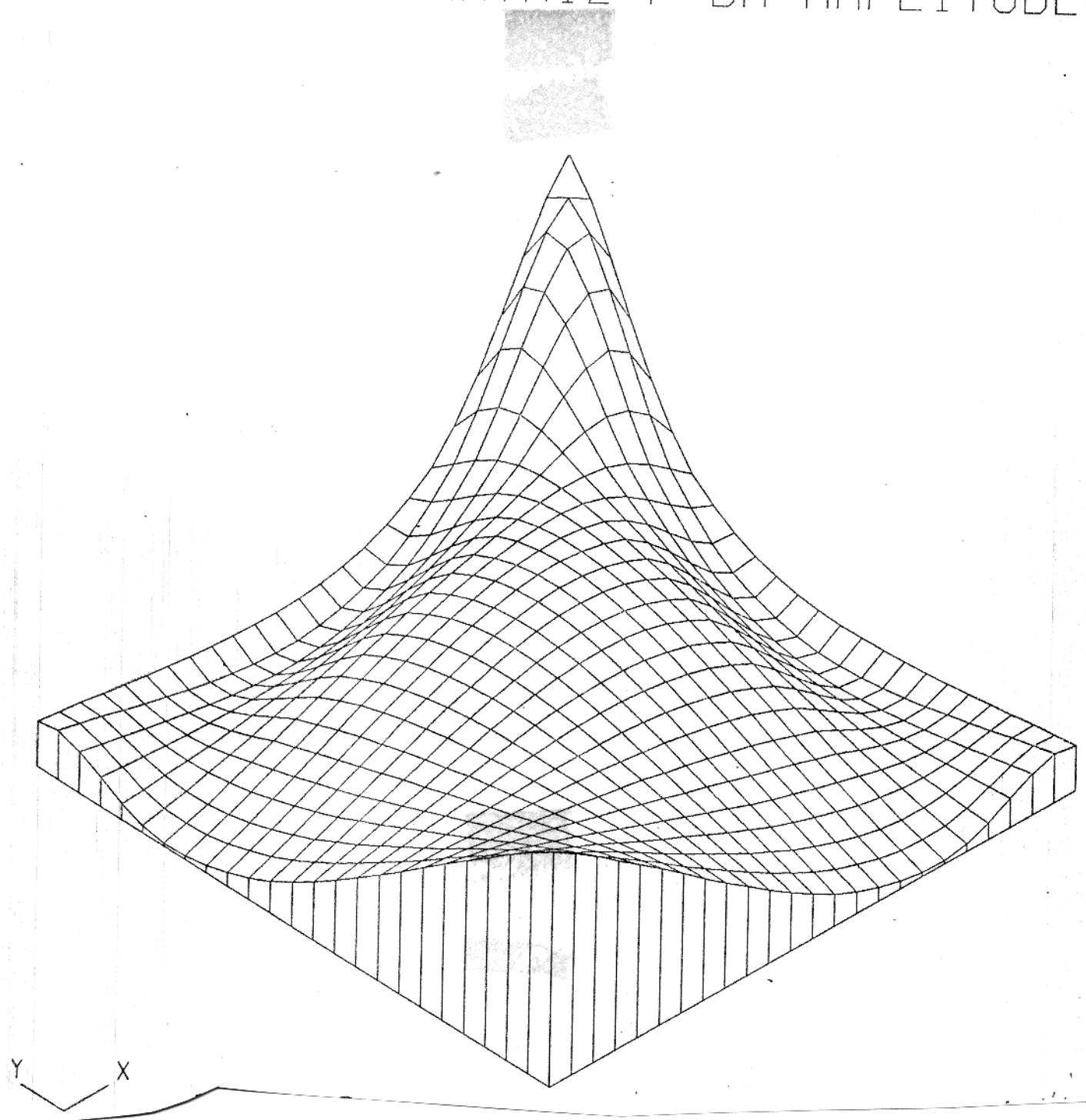


Figura 25 - Perspectiva tridimensional da matriz Densidade de Informação, da Amplitude da Resistividade Aparente, vista do canto superior direito.

MATRIZ F DA FASE

CONTOUR KEY	
1	0.100
2	0.111
3	0.122
4	0.133
5	0.144
6	0.156
7	0.167
8	0.178
9	0.189
10	0.200

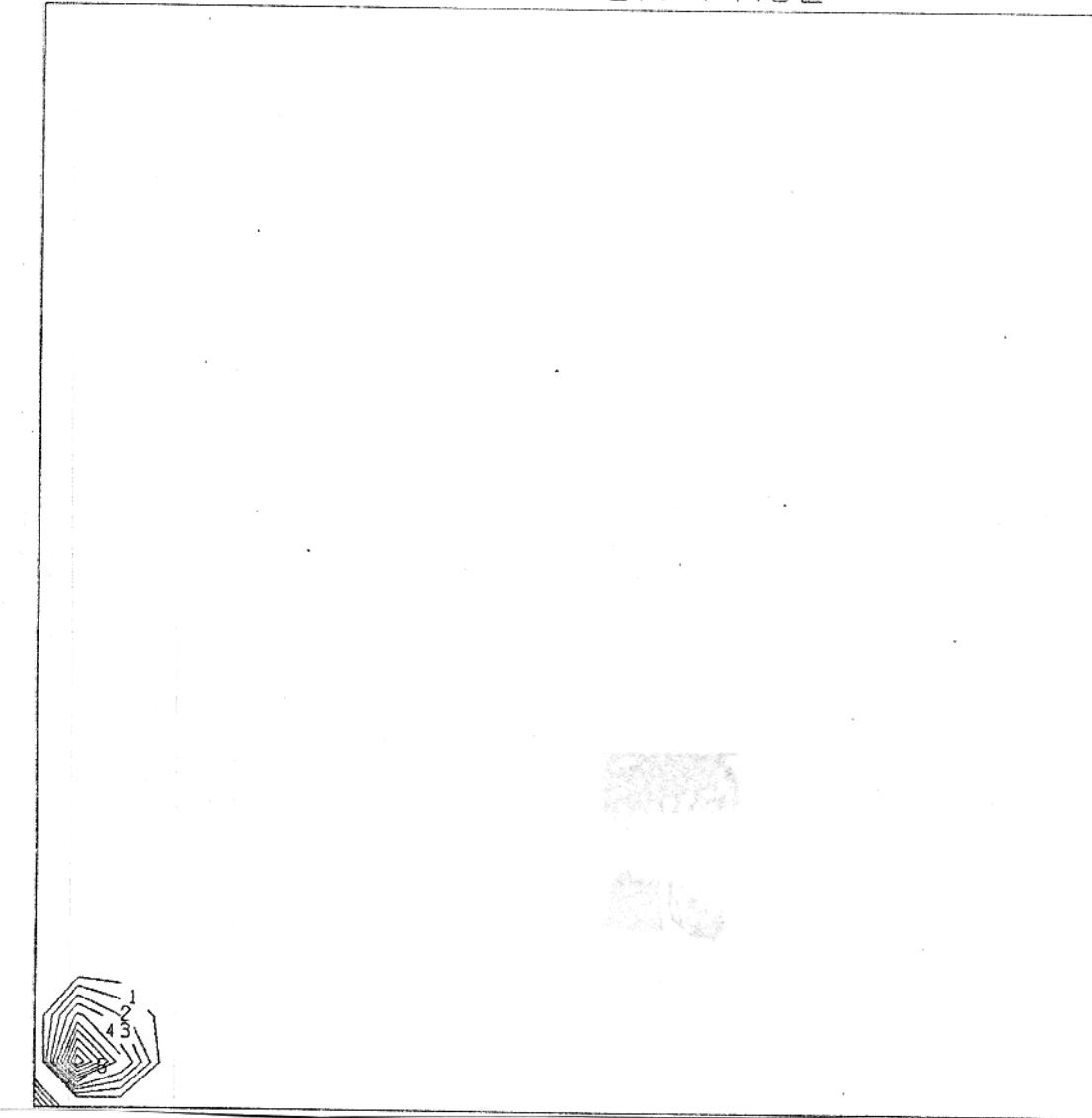


Figura 26 - Mapa de contorno da matriz Densidade de Informação da Fase da Resistividade Aparente.

VISTA 3D DA MATRIZ F DA FASE

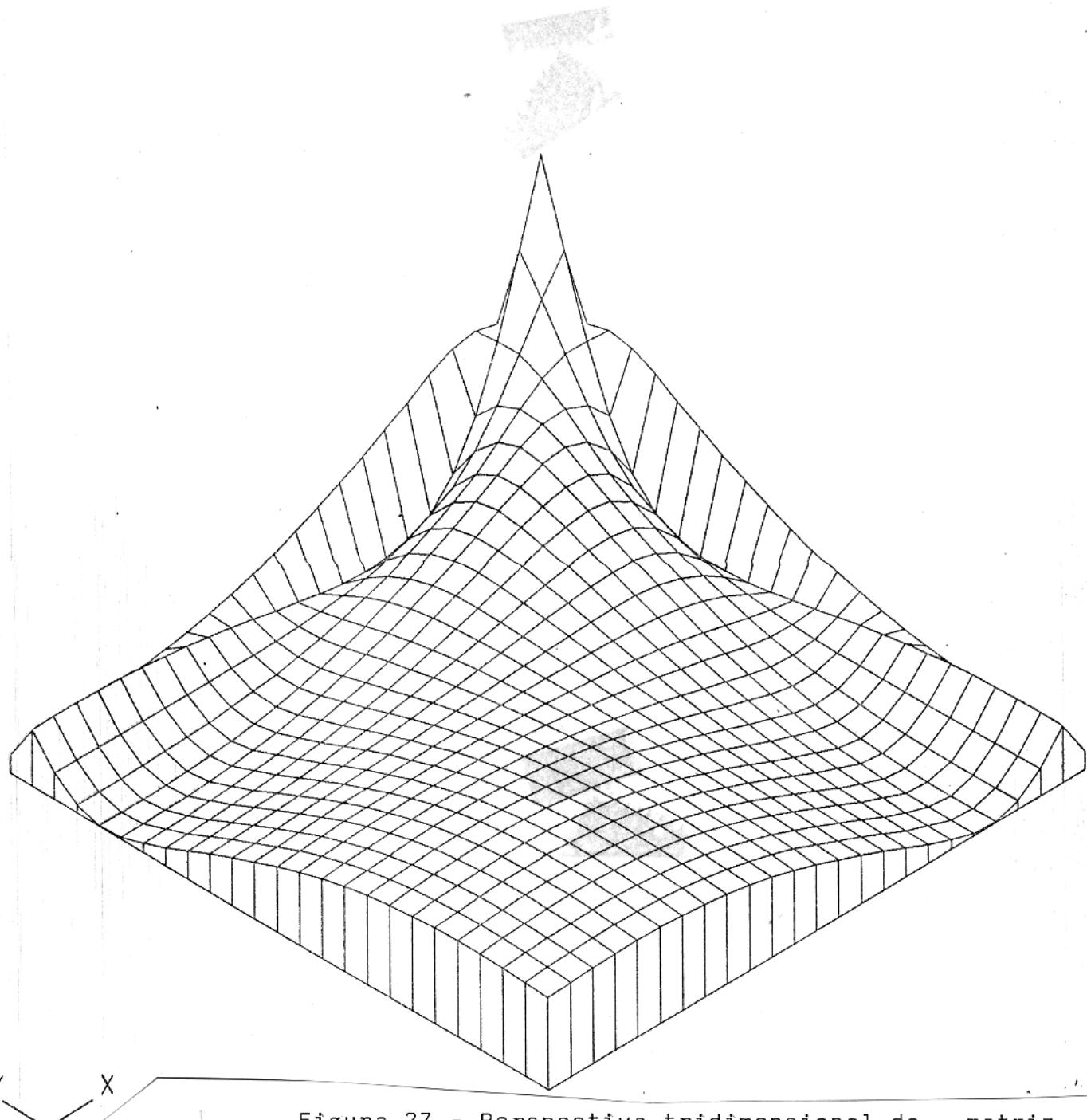


Figura 27 - Perspectiva tridimensional da matriz
Densidade de Informação, da Fase de Re-
sistividade Aparente, vista do canto
superior direito.

TABELA 7a.

Valores do TENSOR SEM ROTAÇÃO

67

T(SEG)	ZXX	ZXY	ZYX	ZYY
1 17800.0	(.017, -.069)	(.008, .005)	(-.007, -.018)	(.048, .031)
2 13300.0	(.021, -.064)	(.044, .027)	(-.045, .014)	(-.005, -.020)
3 10000.0	(.010, -.026)	(.006, .079)	(-.008, -.022)	(.078, .039)
4 7500.0	(.003, -.022)	(.041, .062)	(.017, -.011)	(.002, -.008)
5 5620.0	(.013, -.017)	(.036, .057)	(.003, -.025)	(.021, -.021)
6 4220.0	(-.007, -.017)	(.041, .075)	(.007, -.034)	(.008, -.003)
7 3160.0	(-.009, -.011)	(.054, .087)	(-.002, -.046)	(.017, .006)
8 2370.0	(.001, -.016)	(.048, .119)	(-.019, -.075)	(.001, .017)
9 1780.0	(-.008, .004)	(.048, .133)	(-.011, -.094)	(-.007, .005)
10 1330.0	(-.013, -.007)	(.070, .197)	(-.023, -.145)	(-.028, .063)
11 1000.0	(.225, -.022)	(.112, .225)	(-.066, -.175)	(.017, .092)
12 800.0	(-.033, .011)	(.131, .276)	(-.074, -.202)	(.045, .061)
13 630.0	(-.040, .002)	(.165, .330)	(-.091, -.218)	(.060, .049)
14 500.0	(-.050, .027)	(.217, .396)	(-.136, -.254)	(.032, .063)
15 400.0	(-.047, .052)	(.267, .439)	(-.167, -.297)	(.037, .073)
16 320.0	(-.045, .080)	(.335, .492)	(-.021, -.341)	(.107, .083)
17 250.0	(-.032, .101)	(.399, .572)	(-.252, -.371)	(.125, .041)
18 200.0	(-.014, .133)	(.477, .633)	(-.290, -.422)	(.146, .016)
19 158.0	(.026, .173)	(.564, .696)	(-.334, -.464)	(.146, .021)
20 126.0	(.067, .206)	(.636, .710)	(-.404, -.536)	(.123, -.005)
21 100.0	(.137, .202)	(.722, .805)	(-.460, -.598)	(.113, -.021)
22 80.0	(.182, .215)	(.799, .830)	(-.497, -.669)	(.141, -.083)
23 63.0	(.235, .207)	(.875, .844)	(-.560, -.722)	(.002, -.115)
24 50.0	(.297, .185)	(.944, .802)	(-.630, -.817)	(.109, -.131)
25 40.0	(.320, .154)	(1.009, .933)	(-.718, -.929)	(.076, -.119)
26 32.0	(.328, .117)	(1.083, 1.019)	(-.773, -1.006)	(.024, -.057)
27 25.0	(.377, .058)	(1.096, .963)	(-.866, -1.102)	(.050, -.137)
28 20.0	(.344, .027)	(1.143, .963)	(-.911, -1.220)	(.063, -.194)
29 16.0	(.283, -.024)	(1.346, 1.332)	(-.953, -1.357)	(.162, -.100)

TABELA 7b:

Valores do TENSOR COM ROTAÇÃO

T(SEG)	ZXX	ZXY	ZYX	ZYY
1 17800.0	(.017, -.069)	(.010, .011)	(-.005, -.012)	(.048, .031)
2 13300.0	(.019, -.072)	(.052, .009)	(-.037, -.004)	(-.003, -.012)
3 10000.0	(.014, -.035)	(-.009, .062)	(-.023, -.039)	(.074, .048)
4 7500.0	(-.026, -.041)	(.016, .032)	(-.008, -.041)	(.031, .011)
5 5620.0	(-.005, -.035)	(.012, .044)	(-.016, -.038)	(.039, -.003)
6 4220.0	(-.025, -.032)	(.017, .054)	(-.017, -.055)	(.026, .012)
7 3160.0	(-.025, -.025)	(.027, .067)	(-.029, -.066)	(.033, .020)
8 2370.0	(-.012, -.027)	(.041, .094)	(-.026, -.100)	(.014, .026)
9 1780.0	(-.026, -.015)	(.029, .114)	(-.030, -.113)	(.011, .024)
10 1330.0	(-.031, -.015)	(.069, .165)	(-.024, -.177)	(-.010, .071)
11 1000.0	(.226, -.020)	(.104, .229)	(-.074, -.171)	(.016, .090)
12 800.0	(-.042, -.008)	(.095, .247)	(-.110, -.231)	(.054, .080)
13 630.0	(-.050, -.037)	(.110, .295)	(-.146, -.261)	(.070, .088)
14 500.0	(-.056, -.022)	(.149, .354)	(-.204, -.296)	(.088, .112)
15 400.0	(-.059, -.002)	(.191, .400)	(-.243, -.336)	(.099, .127)
16 320.0	(-.143, .011)	(.167, .444)	(-.189, -.359)	(.205, .152)
17 250.0	(-.046, -.017)	(.271, .529)	(-.380, -.414)	(.139, .159)
18 200.0	(-.037, -.023)	(.316, .599)	(-.451, -.456)	(.169, .172)
19 158.0	(.198, .199)	(.515, .486)	(-.383, -.634)	(-.026, -.000)
20 126.0	(.187, .225)	(.596, .567)	(-.444, -.679)	(.003, -.024)
21 100.0	(.245, .236)	(.646, .656)	(-.536, -.747)	(.005, -.055)
22 80.0	(.295, .240)	(.722, .718)	(-.574, -.831)	(.028, -.108)
23 63.0	(.322, .205)	(.781, .718)	(-.654, -.848)	(-.005, -.113)
24 50.0	(.375, .170)	(.849, .775)	(-.725, -.924)	(.031, -.116)
25 40.0	(.382, .130)	(.911, .853)	(-.816, -1.009)	(.014, -.095)
26 32.0	(.392, .100)	(.945, .960)	(-.911, -1.065)	(-.040, -.040)
27 25.0	(.411, .019)	(1.011, .932)	(-.951, -1.138)	(.016, -.097)
28 20.0	(.384, -.059)	(1.050, .924)	(-1.004, -1.259)	(.023, -.108)
29 16.0	(.428, -.063)	(1.149, 1.005)	(-1.150, -1.384)	(.017, -.061)

VALORES DO TENSOR (MÓDULO E FASE) SEM ROTAÇÃO

T(SEG)	ZXX	ZXY	ZYX	ZYY
1 17800.0	.071 (-76.)	.019 (32.)	.019 (-111.)	.057 (33.)
2 13300.0	.067 (-72.)	.052 (32.)	.047 (163.)	.021 (-104.)
3 10000.0	.023 (-69.)	.079 (06.)	.023 (-110.)	.037 (27.)
4 7500.0	.022 (-82.)	.074 (57.)	.020 (-33.)	.008 (-76.)
5 5620.0	.021 (-53.)	.067 (28.)	.026 (-72.)	.030 (-45.)
6 4220.0	.018 (-112.)	.085 (61.)	.035 (-78.)	.009 (-21.)
7 3160.0	.014 (-129.)	.102 (53.)	.046 (-92.)	.018 (19.)
8 2370.0	.016 (-36.)	.128 (68.)	.077 (-104.)	.017 (87.)
9 1780.0	.009 (153.)	.141 (70.)	.095 (-97.)	.009 (144.)
10 1330.0	.015 (-152.)	.209 (70.)	.147 (-99.)	.069 (114.)
11 1000.0	.226 (-6.)	.251 (04.)	.167 (-111.)	.094 (80.)
12 800.0	.035 (162.)	.306 (65.)	.215 (-110.)	.076 (54.)
13 630.0	.040 (177.)	.376 (64.)	.236 (-113.)	.077 (39.)
14 500.0	.057 (152.)	.452 (61.)	.288 (-118.)	.103 (38.)
15 400.0	.070 (132.)	.514 (59.)	.341 (-119.)	.114 (46.)
16 320.0	.092 (119.)	.595 (56.)	.342 (-94.)	.135 (38.)
17 250.0	.106 (108.)	.697 (55.)	.448 (-124.)	.132 (18.)
18 200.0	.134 (96.)	.793 (53.)	.512 (-124.)	.147 (6.)
19 158.0	.180 (82.)	.865 (49.)	.572 (-124.)	.148 (8.)
20 126.0	.217 (72.)	.953 (43.)	.671 (-127.)	.123 (-2.)
21 100.0	.244 (56.)	1.081 (48.)	.754 (-128.)	.115 (-11.)
22 80.0	.282 (50.)	1.189 (40.)	.833 (-127.)	.164 (-30.)
23 63.0	.313 (41.)	1.216 (44.)	.914 (-128.)	.141 (-55.)
24 50.0	.350 (32.)	1.292 (43.)	1.032 (-128.)	.170 (-50.)
25 40.0	.355 (26.)	1.374 (43.)	1.174 (-128.)	.141 (-57.)
26 32.0	.348 (20.)	1.487 (43.)	1.269 (-128.)	.062 (-67.)
27 25.0	.381 (9.)	1.462 (41.)	1.402 (-128.)	.146 (-70.)
28 20.0	.345 (4.)	1.495 (40.)	1.523 (-127.)	.204 (-72.)
29 16.0	.204 (-5.)	1.694 (45.)	1.650 (-125.)	.100 (-32.)

Valores do TABELA 86

TENSOR (MÓDULO E FASE) COM ROTAÇÃO

T(SEG)	ZXX	ZXY	ZYX	ZYY
1 17800.0	.072 (-76.)	.015 (48.)	.013 (-113.)	.057 (33.)
2 13300.0	.074 (-76.)	.053 (10.)	.037 (-174.)	.012 (-102.)
3 10000.0	.038 (-68.)	.063 (98.)	.045 (-120.)	.038 (33.)
4 7500.0	.049 (-123.)	.036 (64.)	.041 (-102.)	.033 (20.)
5 5620.0	.035 (-99.)	.046 (75.)	.041 (-113.)	.039 (-5.)
6 4220.0	.040 (-128.)	.057 (72.)	.057 (-107.)	.028 (24.)
7 3160.0	.035 (-135.)	.073 (68.)	.072 (-114.)	.038 (31.)
8 2370.0	.029 (-113.)	.102 (66.)	.104 (-105.)	.031 (64.)
9 1780.0	.030 (-150.)	.117 (75.)	.117 (-105.)	.026 (65.)
10 1330.0	.035 (-154.)	.179 (67.)	.178 (-98.)	.072 (98.)
11 1000.0	.227 (-5.)	.252 (66.)	.186 (-113.)	.091 (80.)
12 800.0	.042 (-169.)	.265 (69.)	.256 (-116.)	.096 (56.)
13 630.0	.062 (-144.)	.315 (70.)	.299 (-119.)	.112 (52.)
14 500.0	.061 (-159.)	.385 (67.)	.359 (-125.)	.143 (52.)
15 400.0	.059 (-178.)	.443 (64.)	.414 (-126.)	.161 (52.)
16 320.0	.144 (-176.)	.474 (69.)	.433 (-116.)	.255 (37.)
17 250.0	.049 (-160.)	.594 (63.)	.562 (-133.)	.211 (49.)
18 200.0	.043 (-148.)	.677 (62.)	.641 (-135.)	.241 (45.)
19 158.0	.281 (45.)	.708 (43.)	.741 (-121.)	.026 (-179.)
20 126.0	.292 (50.)	.823 (44.)	.811 (-123.)	.024 (-82.)
21 100.0	.340 (44.)	.921 (45.)	.919 (-126.)	.055 (-84.)
22 80.0	.380 (39.)	1.018 (45.)	1.010 (-125.)	.111 (-75.)
23 63.0	.382 (33.)	1.061 (43.)	1.071 (-128.)	.114 (-92.)
24 50.0	.412 (24.)	1.149 (42.)	1.175 (-128.)	.120 (-75.)
25 40.0	.403 (19.)	1.248 (43.)	1.297 (-129.)	.096 (-82.)
26 32.0	.405 (14.)	1.347 (45.)	1.401 (-131.)	.057 (-135.)
27 25.0	.412 (-2.)	1.375 (43.)	1.483 (-130.)	.098 (-81.)
28 20.0	.389 (-9.)	1.398 (41.)	1.611 (-129.)	.110 (-78.)
29 16.0	.433 (-8.)	1.739 (49.)	1.800 (-130.)	.063 (-75.)

TABELA 9.

VALORES DAS COERENCIAS

T(SEG)	HXHX	EXEY	EYHY	EXHX	EYHX	EXHY
1 17800.0	.51	.30	.47	.43	.25	.24
2 13300.0	.57	.95	.41	.68	.85	.44
3 10000.0	.52	.33	.57	.44	.30	.62
4 7500.0	.34	.69	.33	.07	.53	.74
5 5620.0	.69	.23	.55	.63	.56	.80
6 4220.0	.91	.53	.72	.54	.86	.85
7 3160.0	.70	.43	.58	.53	.81	.91
8 2370.0	.55	.33	.34	.45	.78	.92
9 1780.0	.59	.40	.39	.53	.71	.93
10 1330.0	.56	.18	.24	.47	.80	.96
11 1000.0	.55	.19	.18	.52	.80	.98
12 800.0	.38	.15	.24	.32	.87	.96
13 630.0	.43	.25	.36	.32	.87	.97
14 500.0	.51	.31	.42	.45	.93	.97
15 400.0	.59	.56	.64	.64	.96	.98
16 320.0	.59	.48	.53	.59	.96	.97
17 250.0	.64	.61	.63	.66	.98	.97
18 200.0	.46	.47	.50	.50	.97	.96
19 158.0	.44	.49	.45	.55	.96	.94
20 126.0	.47	.59	.46	.63	.97	.94
21 100.0	.57	.70	.58	.72	.98	.92
22 80.0	.43	.68	.47	.68	.97	.89
23 63.0	.49	.74	.50	.74	.97	.88
24 50.0	.52	.78	.55	.76	.98	.89
25 40.0	.30	.68	.32	.65	.97	.84
26 32.0	.22	.59	.22	.56	.96	.83
27 25.0	.25	.63	.20	.59	.95	.80
28 20.0	.19	.55	.23	.50	.94	.78
29 16.0	.15	.35	.19	.29	.92	.82

TABELA 10:

T(SEG)	SKEW	TETHA	BETA	D1	D2	D3
1 17800.0	2.742	3.309	22.084	.170	.029	.558
2 13300.0	.951	-18.936	3.948	.395	.071	.327
3 10000.0	.872	-12.976	2.643	.376	.144	.354
4 7500.0	.395	-41.797	6.997	.416	.060	.293
5 5620.0	.538	-42.790	6.892	.451	.041	.275
6 4220.0	.175	-36.094	77.285	.574	.004	.217
7 3160.0	.065	-32.462	29.362	.646	.011	.105
8 2370.0	.011	-30.043	3.775	.778	.060	.118
9 1780.0	.073	-44.248	* *** * ***	.767	.000	.117
10 1330.0	.196	-21.983	1.955	.704	.091	.158
11 1000.0	.575	2.130	3.615	.520	.078	.291
12 800.0	.140	-22.624	5.750	.738	.032	.144
13 630.0	.089	-26.596	3.477	.743	.060	.138
14 500.0	.129	-26.053	2.466	.728	.079	.144
15 400.0	.154	-27.439	2.463	.727	.071	.143
16 320.0	.193	-33.892	6.410	.628	.041	.101
17 250.0	.143	-36.717	1.617	.731	.101	.136
18 200.0	.153	-41.353	1.441	.730	.110	.135
19 158.0	.183	43.560	1.520	.718	.099	.141
20 126.0	.170	31.383	1.632	.738	.086	.133
21 100.0	.168	30.054	2.649	.734	.057	.137
22 80.0	.173	26.683	2.357	.729	.067	.142
23 63.0	.155	21.439	2.517	.745	.064	.138
24 50.0	.177	19.625	2.301	.745	.063	.138
25 40.0	.157	17.775	2.365	.770	.055	.126
26 32.0	.130	20.551	4.139	.788	.032	.116
27 25.0	.152	13.238	1.910	.787	.059	.117
28 20.0	.147	16.181	1.078	.790	.089	.106
29 16.0	.131	36.466	5.141	.804	.018	.099

TABELA 31

T(SEG)	R-II Ω-m	R-ML Ω-m	PHI-II Gauss	PHI-ML Gauss
1 17800.0	.53	.55	56.89	57.34
2 13300.0	4.28	4.42	8.31	7.95
3 10000.0	4.14	4.74	92.11	78.92
4 7500.0	1.76	1.80	71.33	71.29
5 5629.0	1.68	1.69	71.15	70.92
6 4220.0	2.19	2.19	72.68	72.67
7 3160.0	2.62	2.62	67.17	67.16
8 2370.0	3.97	4.00	70.95	70.91
9 1780.0	3.90	3.90	75.43	75.43
10 1330.0	6.65	6.76	74.79	74.80
11 1000.0	7.63	7.80	66.01	66.09
12 800.0	8.61	8.63	66.79	66.75
13 630.0	9.37	9.45	65.28	65.16
14 500.0	10.88	11.01	61.50	61.29
15 400.0	11.62	11.73	59.47	59.30
16 320.0	10.45	10.49	66.96	66.74
17 250.0	13.06	13.31	55.38	55.16
18 200.0	13.54	13.85	53.98	53.75
19 158.0	12.96	13.20	51.28	51.10
20 125.0	13.21	13.39	50.15	50.20
21 100.0	13.39	13.47	49.09	49.89
22 80.0	12.98	13.09	50.03	50.10
23 63.0	11.31	11.39	47.50	47.48
24 50.0	10.57	10.75	47.19	47.13
25 40.0	10.26	10.32	47.15	47.08
26 32.0	9.61	9.62	47.49	47.45
27 25.0	8.09	8.14	46.54	46.39
28 20.0	7.15	7.24	46.74	46.39
29 16.0	7.07	7.97	49.47	49.46

TABELLA 12

ESCALA MAX 20

O MINIMO GLOBAL OCORRE EM
 quei nos
 int paemts? { 1 40.635 [1.000 - 1000.000] 23.176 [1.000 - 100.000]
 2 1.465 [1.000 - 1000.000] 3.473 [1.000 - 100.000]
 3 .397 [1.000 - 1000.000]

E TEM VALOR 13.85969 %

INTERVALO INICIAL

1	40.635	[1.000 - 1000.000]
2	1.465	[1.000 - 1000.000]
3	.397	[1.000 - 1000.000]

PERÍODO	RHOS	DELTA-RHO	PHASE	DELTA-PHASE	RHO*	ZET*
5.620.0	2.034	-1.356	69.134	-12.244	• 51.6	35.957
4.220.0	2.415	-1.227	69.966	2.711	• 56.7	33.756
3.160.0	2.897	-1.273	70.541	-3.374	• 64.3	32.104
2.370.0	3.493	-1.480	70.736	• 162	• 757	30.574
1.780.0	4.225	-1.329	70.638	4.793	• 92.9	29.116
1.330.0	5.135	-1.512	70.009	4.779	1.201	27.639
1.000.0	6.209	-1.427	69.852	-2.840	1.614	26.134
6.600.0	7.148	-1.463	67.226	-7.740	2.089	24.867
6.300.0	8.249	-1.143	65.678	-1.403	2.799	23.379
5.000.0	9.354	-1.531	63.464	-1.968	3.734	21.773
4.000.0	10.385	-1.234	60.965	-1.491	4.693	20.054
3.200.0	11.294	-1.345	58.195	8.665	6.274	18.182
2.500.0	12.043	-1.013	54.975	• 407	7.938	15.994
2.000.0	12.430	-1.109	52.116	1.867	9.374	14.004
1.580.0	12.503	-1.446	49.379	1.900	10.604	12.008
1.260.0	12.316	-1.390	47.214	2.936	11.356	10.289
1.000.0	11.951	1.440	45.601	4.286	11.700	8.790
80.0	11.540	1.444	44.647	5.436	8.211	7.599
63.0	12.137	• 172	44.208	3.292	7.936	6.573
50.0	12.844	-1.172	44.204	2.984	7.777	5.778
40.0	16.673	-1.405	44.413	2.742	7.623	5.145
32.0	12.521	-1.984	44.675	2.819	7.532	4.606
25.0	12.589	-2.489	44.901	1.634	7.494	4.086
20.0	10.601	-3.452	45.006	1.739	10.599	3.655
16.0	10.623	-2.653	45.032	4.440	10.612	3.283

NUVENS, MAIS ALTAZAGA:

NO. HÁXIMO DE AVALIAÇÕES DA FUNÇÃO PERMITIDA PELA USUARIA: 2000

NO. DE OBSERVACOES: 50

FOI SOLICITADO QUE A FUNÇÃO FOSSE MENOR QUE 5.0000 %

NO. DE PONTOS DE PESQUISA NO ESPAÇO DÉ PARÂMETROS: 50

OS VALORES DA FUNÇÃO NOS PONTOS DE PESQUISA SÃO :

18.87874	18.07629	18.68097	18.07607	18.87395	18.87685	18.88035	18.87467	18.86442	18.87553
18.88031	18.07302	18.67740	18.97276	18.86968	18.87313	18.88111	18.87666	18.87436	18.86758
18.87434	18.37515	18.37219	18.86964	18.86914	18.87719	18.87245	18.88140	18.85960	18.87990
18.86710	18.30170	18.07243	18.88192	18.06543	18.88130	18.88195	18.87579	18.88162	18.87190
18.86226	18.87709	18.87160	18.87228	18.87272	18.88122	18.87125	18.86992	18.87970	18.87177

TABELA 136

COORDENADAS DOS PONTOS SELECIONADOS SÃO :

H.	1	F=	18.8597 %	PT N.	2	F=	18.8644 %	PT N.	3	F=	18.8554 %	PT N.	4	F=	18.8747
10.63			23.18	10.66		23.24		10.63		23.43		10.63		22.58	
1.47			3.47	1.37		3.03		1.68		2.57		4.15		2.90	
•40				•41				•42				•43			
H.	25	F=	18.8752 %	PT N.	26	F=	18.8755 %	PT N.	47	F=	18.8817 %	PT N.	48	F=	18.8819
10.67			22.62	10.60		23.47		10.74		21.54		10.52		23.04	
1.74			3.64	1.32		2.67		2.70		4.71		2.46		2.88	
•42				•42				•42				•41			
H.	49	F=	18.8820 %	PT N.	50	F=	18.8823 %	PT N.							
10.61			22.69	10.55											
1.82			3.35	1.37											
•42				•41											

TABELA 14

	MITTE	STD ABW	MITTE	STD ABW
1	10.63	• 046	22.85	• 915
2	3.29	2.339	3.12	22.85 • 770
3	• 42	• 011		25.97

MATRIZ CORRELAÇÃO

	RES 1	RES 2	RES 3	ESP 1	ESP 2	ESP 3
RES 1	10.00339900E-01	48.2085931E-03	21.9565634E-02	-25.0375253E-02	33.0204525E-02	
RES 2	43.2095931E-03	10.0000000E-01	44.2486969E-02	-58.2546793E-02	32.1521290E-02	
RES 3	21.9565634E-02	44.2486969E-02	10.0000000E-01	-20.6410805E-02	-45.0939779E-03	
ESP 1	-25.0375253E-02	-58.2546783E-02	-20.6410805E-02	10.0000000E-01	-92.3015264E-02	
ESP 2	33.0204525E-02	32.1521290E-02	-45.0939797E-03	-92.0015264E-02	10.0000000E-01	

MATRIZ COVARIANCIA

	RES 1	RES 2	RES 3	ESP 1	ESP 2	ESP 3
RES 1	21.4187591E-04	51.8276635E-04	11.5568086E-05	-10.5314867E-03	11.6810473E-03	
RES 2	51.8276635E-04	34.7275171E-04	11.8561208E-03	-12.4737680E-01	57.8998011E-02	
RES 3	11.5568086E-05	11.8561208E-03	13.1183288E-05	-21.6389242E-04	-39.7577945E-05	
ESP 1	-16.5314867E-03	-12.4737680E-02	-21.6389242E-04	93.776092E-04	-64.8221567E-02	
ESP 2	11.6310473E-03	57.8998011E-02	59.7577945E-05	-64.8221567E-02	59.2555352E-02	

MODELO INICIAL

MARQUARDT

74

10.64	23.18
1.47	3.47
.40	26.65

10.65	23.13
1.58	3.40
.41	

EPSILON = 1.89E+01 %

23.13 *****
26.53 0**2 = .56296E-02

from w or parâmetros?

000	RHOS	DELTA-RHOS	PHASE	DELTA-PHASE	RHO*	Z*
20.0	2.046	-.307	63.990	-12.101	.526	35.622
20.0	2.427	-.231	69.872	2.845	.577	33.805
50.0	2.907	-.289	70.419	-3.251	.653	32.137
70.0	3.502	.470	70.677	.271	.767	30.596
80.0	4.234	-.333	70.544	4.087	.939	29.129
30.0	5.143	1.504	69.933	4.056	1.211	27.646
00.0	5.205	1.421	68.793	-2.731	1.624	26.137
00.0	7.153	1.457	67.483	-.695	2.098	24.869
30.0	8.255	1.137	65.647	-.369	2.808	23.381
00.0	9.360	1.524	63.445	-1.949	3.742	21.778
00.0	10.394	1.225	60.956	-1.481	4.900	20.061
20.0	11.306	-.357	58.191	8.670	6.282	18.191
50.0	12.064	.993	54.971	.410	7.949	16.004
30.0	12.443	1.091	52.110	1.873	9.390	14.013
50.0	12.526	.430	49.368	1.911	10.624	12.015
20.0	12.332	.873	47.199	2.951	11.387	10.293
30.0	11.963	1.428	45.585	4.303	14.720	8.792
30.0	11.550	1.434	44.634	5.449	8.220	7.600
50.0	11.145	.164	44.202	3.298	7.993	6.575
50.0	10.852	-.181	44.205	2.983	7.783	5.780
40.0	10.680	-.425	44.417	2.738	7.630	5.148
32.0	10.603	-.996	44.679	2.815	7.540	4.609
25.0	10.593	-2.501	44.902	1.633	7.503	4.086
20.0	10.613	-3.464	45.005	1.740	10.612	3.667
16.0	10.635	-2.667	45.030	4.441	10.624	3.284

TABELA 16

SINGULAR VALUE ANALYSIS OF THE LEAST SQUARES PROBLEM, A*X=R, SCALED AS (A*D)*Y=B

= 50, N = 5, MDATA = 50

CALING OPTION NO. 1. D IS THE IDENTITY MATRIX.

-MATRIX OF THE SINGULAR VALUE DECOMPOSITION OF A*D.
ELEMENTS OF V SCALED UP BY A FACTOR OF 10**4)

	COL 1	COL 2	COL 3	COL 4	COL 5
1	-344.	9994.	-59.	33.	8.
2	-436.	-13.	445.	-2192.	9737.
3	-1952.	-118.	-9766.	-1070.	121.
4	-9762.	-322.	1921.	-571.	-676.
5	-931.	-72.	-854.	9674.	2172.

INDEX SING. VALUE

0	32.5298
1	16.9901
2	3.8699
3	.4052
4	.0507

TABELA 17

PÓSTO ADOTADO = 4

*** MATRIZ CORRELAÇÃO ***

	RES 1	RES 2	RES 3	RES 2	RES 3	ESP 1	ESP 2
RES	10.0009000E-01						
RES	-12.7087310E-02	10.0000000E-01					
RES	-71.8717238E-03	68.4013278E-02	10.0000000E-01				
RES	-13.4241374E-02	94.3050345E-02	44.3609573E-02	10.0000000E-01			
ESP	12.6514046E-02	99.9908679E-02	69.3300471E-02	-69.3300471E-02	93.8630324E-02	10.0000000E-01	
ESP	2						

*** MATRIZ RESOLUÇÃO ***

	RES 1	RES 2	RES 3	ESP 1	ESP 2
RES	99.9937361E-02				
RES	-51.0938531E-04	51.9092134E-03			
RES	-24.0375643E-06	-43.8401394E-04	99.9854531E-02		
RES	85.4639153E-06	15.5870614E-03	51.7206782E-05	99.5427247E-02	
ESP	1	-81.9037134E-05	-14.9377457E-02	-49.5661317E-04	43.8226444E-03
ESP	2				2809648E-02

*** MATRIZ DE COVARIÂNCIA ***

	RES 1	RES 2	RES 3	ESP 1	ESP 2
RES	14.1435370E-11				
RES	-10.1938609E-10	45.4899018E-08			
RES	-15.1101906E-11	31.5558083E-09	31.2511303E-09		
RES	-83.3790399E-12	33.2187942E-09	40.9567287E-10	27.2761439E-10	
ESP	1	-31.6277626E-10	-14.1764845E-07	-25.7635122E-08	44.1677021E-07
ESP	2				