

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

INPE-7531-TDI/737

**ESTUDO EXPERIMENTAL DE DISTORÇÕES GERADAS POR
LINHAS FÉRREAS ELETRIFICADAS EM SONDAGENS
MAGNETOTELÚRICAS**

Marcelo Banik de Pádua

Dissertação de Mestrado em Ciência Espacial/Geofísica Espacial, orientada pelo Dr. Ícaro Vitorello e pelo Dr. Antonio Lopes Padilha, aprovada em 29 de fevereiro de 2000.

INPE
São José dos Campos
2000

550. 837. 2

PÁDUA, M. B.

Estudo experimental de distorções geradas por linhas
férreas eletrificadas em sondagens magnetotélúricas / M.B.

Pádua. – São José dos Campos: INPE, 2000.

78p. – (INPE-7531-TDI/737).

1.Perfil magnetotélúrico. 2.Ruído eletromagnético.
3.Funções de transferência. 4.Redução de ruído. 5.Propaga-
ção de ruído. I. Título.

Aprovado pela Banca Examinadora em cumprimento a requisito exigido para a obtenção do Título de **Mestre** em **Geofísica Espacial**.

Dr. Ênio Bueno Pereira


Presidente

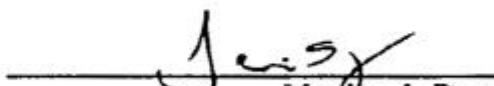
Dr. Ícaro Vitorello


Orientador

Dr. Antonio Lopes Padilha


Orientador

Dr. Lênio Soares Galvão


Membro da Banca

Dr. Sérgio Fontes


Membro da Banca
Convidado

Candidato (a): Marcelo Banik de Pádua

São José dos Campos, 29 de fevereiro de 2000.

“We shall not cease from exploration
And the end of all our exploring
Will be to arrive where we started
And know the place for the first time.”

T. S. Eliot

AGRADECIMENTOS

A meus orientadores, Ícaro Vitorello e Antonio Lopes Padilha, pela orientação, incentivo e paciência que tiveram comigo ao longo deste trabalho.

A meus colegas de curso que sempre se fizeram presentes, especialmente a Maurício de Souza Bologna, pelo auxílio nos trabalhos de campo e em discussões sobre o método magnetotelúrico.

Ao técnico Anísio Antônio Ferreira, pelo auxílio na preparação dos equipamentos e nos trabalhos de campo.

Ao Observatório Nacional, por ceder gentilmente seus equipamentos para serem utilizados nesse trabalho.

Ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais pelo apoio e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, pela bolsa concedida.

E, em especial, a meus pais, pelo apoio que me deram em todos os momentos.

RESUMO

Foram realizadas sondagens magnetotélúricas (MT) em perfis ortogonais à Estrada de Ferro Campos do Jordão (EFCJ) na faixa de períodos de 20 a 6000 s. Os perfis situam-se nos estados de São Paulo e Minas Gerais, em duas regiões de condutividade contrastantes: a Bacia de Taubaté, região sedimentar, e a Serra da Mantiqueira, região cristalina. A EFCJ opera com corrente elétrica DC produzindo um ruído eletromagnético (EM) intenso, mas apenas no período diurno, sendo desativada à noite. Objetiva-se com este trabalho caracterizar o ruído EM produzido pela EFCJ e verificar seu efeito sobre os parâmetros MT. Com este intuito, os dados diurnos e noturnos foram analisados separadamente, enfatizando assim os efeitos da presença ou ausência do ruído. Para a estimação do tensor de impedância (Z), foram utilizadas diversas técnicas disponíveis à comunidade científica e, dos resultados obtidos, foi calculada a resistividade aparente e fase. Fez-se a comparação entre os métodos procurando estabelecer a melhor abordagem para a obtenção de parâmetros MT confiáveis. Verificou-se, como esperado, que a presença do ruído torna as curvas de resistividade aparente e fase mais irregulares e com barras de erros maiores. No entanto, para os métodos que obtiveram resultados satisfatórios, nota-se que os valores obtidos entre os períodos com e sem ruídos são praticamente os mesmos. Conclui-se que, para estes métodos e na faixa de frequência trabalhada, os dados podem ser analisados como um todo, sem que com isto o período contaminado com o ruído venha a mascarar o resultado, e com a vantagem de obter-se um resultado estatístico melhor, por aumentar a série temporal analisada.

DISTURBANCES ON MAGNETOTELLURIC DATA DUE TO ELECTRIFIED RAILWAY

ABSTRACT

Magnetotelluric soundings (MT) were carried out on profiles orthogonal to the Campos do Jordão Railway (EFCJ) in the period range of 20 to 6000 s. The profiles were located at São Paulo and Minas Gerais States, on two adjacent regions with contrasting conductivity: the conductive sedimentary region of Taubaté Basin and the resistive crystalline region of Serra da Mantiqueira. The EFCJ operates with DC current that produces an intense electromagnetic (EM) noise, but only during diurnal periods, being turned off at night. The objective of this study is to characterize the EM noise made by the EFCJ and to verify its effects on MT parameters. Thus, the diurnal and nocturnal data were analyzed separately, and then compared in order to observe the effects of the noise. Some techniques presently available to the scientific community were used to estimate the impedance tensor (Z) and then the apparent resistivity and phase were calculated. The comparison between methods was used to establish the best way to obtain trustworthy MT parameters. As expected, the noise produced more irregular plots of apparent resistivity and phase and greater error bars. Nevertheless, for the methods that produced reliable results, the values obtained on the periods with and without the noise are practically the same. Then, for these methods, and in the studied frequency band, all data could be used in the analyzes, because the contaminated periods did not produce screening effects, with the advantage of providing a better statistical results with the increase in the analyzed time series.

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
LISTA DE FIGURAS	
LISTA DE TABELAS	
CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO	17
CAPÍTULO 2 – O MÉTODO MT	19
2.1 – Fonte do Sinal	19
2.2 – Princípios do Método MT	19
2.3 – Princípios Básicos do Processamento dos Dados	21
2.3.1 – Mínimos Quadrados	23
2.3.2 – Referência Remota	25
2.3.3 – Métodos Robustos	25
2.4 – Ruídos Eletromagnéticos	26
2.4.1 – Classificação dos Ruídos	26
2.4.2 – Ruído de uma Estrada de Ferro	29
2.4.3 – Estrada de Ferro de Campos do Jordão	30
CAPÍTULO 3 – COLETA DE DADOS	33
3.1 – Geologia da Área em Estudo	33
3.2 – Equipamento Utilizado	35
3.3 – Instalação do Equipamento	36
3.4 – Localização das Estações MT	38
CAPÍTULO 4 – ANÁLISE DOS DADOS	41
4.1 – Caracterização do Ruído	41
4.2 – Comparação Entre as Técnicas de Estimativa das Funções de Transferência MT	48
4.2.1 – Dados Utilizados	48
4.2.2 – Descrição dos Algoritmos Utilizados	50
4.2.3 – Resultados Obtidos	51

CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	63
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	67
APÊNDICE A – CÁLCULO DAS BARRAS DE ERRO PARA OS PARÂMETROS MT	71
A.1 – Erro da Resistividade Aparente	71
A.2 – Erro da Fase	75
A.3 – Comentários Finais	78

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
2.1 Representação do espectro do campo magnético horizontal e de componentes do ruído eletromagnético	28
2.2 Representação do circuito da EFE.	29
2.3 Localização da EFCJ e de suas principais estações.	31
3.1 Mapa geológico com a localização das estações MT e da EFCJ	34
3.2 Esquema da instalação do equipamento LRMT.	37
4.1 Série temporal dos canais magnéticos observados na estação EFC008 em 25/09/98	42
4.2 Série temporal dos canais elétricos observados na estação EFC008 em 25/09/98	43
4.3 Amplitude dos picos do ruído dos canais magnéticos em função da distância à EFCJ para as estações da Bacia	45
4.4 Amplitude dos picos do ruído dos canais magnéticos em função da distância à EFCJ para as estações do Cristalino	46
4.5 Amplitude dos picos do ruído do canal E_y em função da distância à EFCJ para as estações do Cristalino e da Bacia	47
4.6 Série temporal da componente E_x das estações do perfil nordeste cristalino . .	49
4.7 Série temporal da componente E_y das estações EFC013 e EFC014	50
4.8 Resistividade aparente e fase para os dados noturnos da estação EFC014 utilizando o algoritmo de Jones.	53
4.9 Resistividade aparente e fase para os dados diurnos da estação EFC014 utilizando o algoritmo de Jones.	54

4.10 Resistividade aparente e fase para todos os dados da estação EFC014 utilizando o algoritmo de Jones.	55
4.11 Resistividade aparente e fase para os dados noturnos da estação EFC014 utilizando o algoritmo de Chave.	56
4.12 Resistividade aparente e fase para os dados diurnos da estação EFC014 utilizando o algoritmo de Chave.	57
4.13 Resistividade aparente e fase para todos os dados da estação EFC014 utilizando o algoritmo de Chave.	58
4.14 Resistividade aparente e fase para os dados noturnos da estação EFC014 utilizando o algoritmo de Egbert.	60
4.15 Resistividade aparente e fase para os dados diurnos da estação EFC014 utilizando o algoritmo de Egbert.	61
4.16 Resistividade aparente e fase para todos os dados da estação EFC014 utilizando o algoritmo de Egbert.	62
A.1 Comparação entre os erros de resistividade aparente estimados pelo erro Gamble, Stodt e Jones em função de $\sigma_Z/ Z $	74
A.2 Representação em um plano complexo da impedância Z , do erro σ_Z e dos erros Bendat e Jones.	76
A.3 Comparação entre os erros da fase estimados pelo erro Gamble, Bendat e Jones em função de $\sigma_Z/ Z $	77

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
3.1 Profundidade do Embasamento sob as Estações da Bacia	33
3.2 Localização das estações MT	39

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Sondagens magnetotelúricas (MT) consistem na observação simultânea das flutuações dos sinais elétrico e magnético na superfície terrestre. São medidas duas componentes magnéticas horizontais perpendiculares, outras duas componentes elétricas paralelas àquelas e mais uma componente magnética vertical. Para frequências altas (acima de 1 Hz), a fonte do sinal são os relâmpagos das tempestades tropicais e para frequências baixas (abaixo de 1 Hz), a fonte do sinal é a ionosfera e a magnetosfera. A fonte é considerada suficientemente uniforme e distante para que o sinal medido possa ser tomado como uma onda plana, condição fundamental para a aplicação do método MT ([Cagniard, 1953](#)). Com o registro da interação destas ondas com a Terra, pode-se inferir a condutividade da crosta e do manto.

No entanto, as sondagens MT são muito perturbadas por ruídos eletromagnéticos de origem artificial, os quais vêm aumentando continuamente com a crescente dependência da humanidade à eletroeletrônica. Isto exige novas técnicas para eliminar estas interferências nas medidas geoeletricas e geomagnéticas para que os resultados obtidos sejam confiáveis e possam contribuir na compreensão dos processos geofísicos. Os ruídos eletromagnéticos devido a estradas de ferro eletrificadas com corrente contínua (EFE) vêm sendo estudados em relação às observações do campo geomagnético, e particularmente às interferências em observatórios magnéticos ([Yanagihara, 1977](#)) e em sondagens MT ([Fontes, 1988](#)). Isto se deve ao extenso alcance de dezenas de quilômetros de seus efeitos de mascaramento do sinal.

As técnicas usuais do método MT para eliminar ruídos, baseadas em análises de mínimos quadrados ([Sims et al., 1971](#)), são pouco eficazes neste caso por se tratar de um ruído coerente e irregular. Entre as técnicas alternativas propostas mais recentemente, um dos métodos mais usados é o da referência remota (RR). Esta técnica de correção consiste na medida simultânea de duas ou mais estações, e o uso do sinal (normalmente o magnético) de uma das estações para eliminar o ruído das outras através de análise espectral ([Gamble et al., 1979b](#)). Outra técnica de correção baseia-se em processamentos robustos de dados que são relativamente insensíveis à presença moderada de dados muito ruidosos ou à inadequação ao modelo estatístico e reagem gradualmente, ao invés de abruptamente, a estas perturbações ([Egbert e Booker, 1986](#); [Chave et al., 1987](#); [Larsen, 1989](#)). Normalmente estas duas técnicas são combinadas em algoritmos de processamento

dos dados.

Pretende-se com este trabalho descrever algumas das propriedades do ruído de uma EFE, como seu alcance de influência nas sondagens MT e sua atenuação em regiões de condutividades bastante distintas (bacia e cristalino). Pretende-se ainda verificar a eficácia dos algoritmos disponíveis à comunidade científica na obtenção de parâmetros geofísicos confiáveis no processamento de dados bastante contaminados com esse tipo de ruído. Para tanto, realizaram-se sondagens MT em perfis perpendiculares à Estrada de Ferro Campos do Jordão (EFCJ), cujo tráfego é pouco intenso, sendo utilizada principalmente para turismo. Ela situa-se no Vale do Paraíba (Estado de São Paulo) e liga as cidades de Campos do Jordão e Pindamonhangaba. Tem a vantagem de atravessar tanto terrenos resistivos (Complexo cristalino do Paraíba do Sul) como condutores (pacote sedimentar do Grupo Taubaté), além de operar apenas durante o dia, o que permite obter dados isentos de ruído à noite para comparar aos resultados obtidos. Estas características da EFCJ fazem dela um excelente laboratório para o estudo dos efeitos do ruído de uma EFE sobre métodos eletromagnéticos em geofísica, um problema especialmente importante em outras regiões, como na Europa, onde há uma complexa rede de EFE.

Quatro perfis perpendiculares à EFCJ foram conduzidos, dois sobre a área sedimentar da Bacia de Taubaté e outros dois sobre a área cristalina da Serra da Mantiqueira utilizando um conjunto de equipamentos MT para operarem simultaneamente na faixa de períodos de 20 a 6000 s. Os algoritmos para processamento dos dados foram aplicados a três conjuntos de dados: noturno, diurno e todos os dados. Os dados noturnos não são afetados pelo ruído da EFCJ, pois como já afirmado antes ela não opera neste período. Com isto espera-se obter parâmetros MT confiáveis para servir de padrão aos resultados obtidos dos outros conjuntos de dados. Os dados diurnos são bastante perturbados pelo ruído da EFCJ, e serão utilizados na análise do efeito deste ruído nas sondagens MT e para testar os algoritmos em situações extremas. O conjunto de todos os dados, como o nome já indica, refere-se a toda a série temporal adquirida, para verificar a capacidade dos algoritmos em eliminar as partes contaminadas pelo ruído. Também espera-se, com este conjunto, obter uma melhor estatística por aumentar o número de dados disponíveis.

CAPÍTULO 2

O MÉTODO MT

O método MT foi proposto por [Tikhonov \(1950\)](#) e [Cagniard \(1953\)](#). Consiste na medição simultânea do sinal elétrico e magnético na superfície terrestre para a obtenção de um modelo da estrutura geoeletrica do interior do planeta. O modelo baseia-se em parâmetros físicos como resistividade aparente e fase, que são obtidos das relações entre os campos eletromagnéticos (EM). Neste capítulo será feita uma breve exposição sobre a origem do sinal medido pelo método MT, seus princípios físicos, processamentos utilizados e os efeitos dos ruídos sobre as medidas.

2.1 Fonte do Sinal

O sinal EM medido pelo método MT é normalmente dividido em duas faixas de frequência, uma de 10^4 a 1 Hz e a outra de 1 a 10^{-4} Hz. A fonte do sinal das frequências maiores é atribuída às tempestades tropicais. A descarga elétrica de um relâmpago gera uma onda EM, conhecida como esféricas, que pode dar mais de uma volta ao redor da Terra devido ao guia de onda formado entre a ionosfera e a superfície do planeta. Deste modo, as cerca de 2000 tempestades que estão sempre ocorrendo ao redor do mundo fornecem o sinal EM para as sondagens MT nesta faixa de frequência.

Para a faixa de frequência de 1 a 10^{-4} Hz, o sinal EM medido é gerado pelas correntes da ionosfera e magnetosfera. As tempestades magnéticas causam um aumento significativo do sinal medido, melhorando a razão sinal-ruído; no entanto, elas podem violar a condição de onda plana (ver Seção [2.2](#)) levando a uma interpretação errônea dos dados.

A região do espectro ao redor de 1 Hz é conhecida como banda morta, pois, neste ponto, tanto o sinal gerado pelos esféricas como pelas correntes ionosféricas são fracos. Consequentemente, os parâmetros MT estimados nesta faixa de frequência são de baixa qualidade, dificultando a interpretação geológica. Um espectro do campo magnético horizontal é apresentado na Figura [2.1](#) (página [28](#)), juntamente com alguns dos ruídos normalmente presentes nas sondagens MT.

2.2 Princípios do Método MT

As variações dos campos magnéticos naturais induzem correntes elétricas na Terra, conhecidas por correntes telúricas. Pela lei de Ohm, o campo elétrico é proporcional à

corrente elétrica, podendo-se então relacionar o campo elétrico $\mathbf{E}$ medido na superfície da Terra com o campo magnético $\mathbf{H}$. Em seu artigo, [Cagniard \(1953\)](#) propôs que o sinal é uma onda plana, o que leva à seguinte relação linear entre os campos EM:

$$\mathbf{E} = \mathbf{Z}\mathbf{H} \quad (2.1)$$

onde $\mathbf{Z}$ é o tensor de impedância dado por:

$$\mathbf{Z} = \begin{bmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

A hipótese da onda plana impõe que o campo EM natural deva ser uniforme sobre distâncias da ordem de centenas de quilômetros, o que resultou em algumas críticas sobre a validade do método ([Wait, 1954](#); [Price, 1962](#)). No entanto, [Madden e Nelson \(1964\)](#) mostraram, a partir de dados experimentais, que a hipótese da onda plana é normalmente satisfeita pelo sinal natural. Posteriormente, [Dmitriev e Berdichevsky \(1979\)](#) mostraram que a hipótese da onda plana é mais restritiva do que o necessário para o método MT ser válido, sendo necessário apenas que as variações dos campos sejam lineares na região estudada. Atualmente é possível testar a validade das premissas sobre a fonte do sinal através de programas disponíveis à comunidade científica ([Egbert, 1998](#)), desde que se tenham medidas simultâneas do campo magnético em pelo menos dois locais diferentes.

O tensor de impedância (Equação 2.2) está associado às informações geológicas que se deseja conhecer. Considerando a Terra como um semi-espaço infinito e homogêneo, $\mathbf{Z}$ torna-se uma matriz anti-simétrica, e a resistividade ρ do meio é dada por:

$$\rho = \frac{|\mathbf{Z}|^2}{\mu_0 \omega} \quad (2.3)$$

onde μ_0 é a permeabilidade no vácuo e ω , a frequência angular.

A distância na qual a onda é atenuada em e^{-1} ($\sim 37\%$) é conhecida como espessura pelicular δ e é dada por:

$$\delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\mu_0 \omega}} \quad (2.4)$$

A espessura pelicular indica a capacidade da onda em penetrar um meio condutor. Vemos pela Equação (2.4) que esta penetração é tanto maior quanto maior a resistividade do meio

e menor a frequência da onda.

A exploração geofísica através do método MT baseia-se nas Equações (2.3) e (2.4). De maneira simplista, pode-se dizer que a primeira equação fornece a propriedade física pesquisada (resistividade das rochas), e a segunda, a localização em profundidade no interior da Terra.

Em um meio não homogêneo, a resistividade obtida pela Equação (2.3) deixa de ser a resistividade real do meio e passa a ser conhecida como resistividade aparente ρ_a . Esta resistividade depende da frequência e é, grosso modo, a média da resistividade do meio dentro da distância de algumas espessuras peliculares. Em um meio unidimensional, ou seja, quando a resistividade do meio depende apenas da profundidade, podemos inferir o perfil de resistividade a partir da dependência da resistividade aparente com a frequência. Quando há variações laterais de resistividade, o tensor de impedância fornece os parâmetros para se estimar estas variações. No caso em que há variação lateral apenas em uma direção, medem-se os campos eletromagnéticos paralelos e perpendiculares à esta direção. Assim, o tensor de impedância terá sua diagonal principal nula e as componentes Z_{xy} e Z_{yx} do tensor fornecem a variação da resistividade lateral com a profundidade. No entanto, esta direção não é conhecida quando as medidas são realizadas no campo. Por isso, após a estimativa do tensor de impedância, realiza-se uma rotação numérica deste até obter-se um valor mínimo da soma da sua diagonal principal. Este procedimento ainda deixa uma ambigüidade de 90° em relação à direção da estrutura resistiva. Esta ambigüidade pode ser eliminada com informações geológicas ou pela análise da razão da componente magnética vertical com as duas componentes horizontais (Gamble et al., 1982).

2.3 Princípios Básicos do Processamento dos Dados

A obtenção de informações geológicas através dos dados MT depende muito da estimativa dos elementos da matriz de impedância com a maior precisão e acurácia possíveis. Para isto desenvolveram-se várias técnicas de análise espectral baseadas no método dos mínimos quadrados, métodos robustos e de referência remota (RR). Nesta seção será feita uma breve descrição destes métodos, mas convém fazer primeiro alguns comentários sobre a preparação dos dados e uma exposição simplificada de como se obtém os elementos do Tensor de Impedância.

Na maioria das técnicas existentes de análise espectral, o primeiro estágio é passar as

séries temporais para o domínio de frequência. Inicialmente, faz-se uma inspeção visual das séries temporais dos campos elétricos e magnéticos para remoção de tendências e erros grosseiros dos dados. As séries temporais são então divididas em subgrupos, cujo número depende de um compromisso entre o maior período que se pretende obter e com quantos graus de liberdade pretende-se trabalhar. Aplica-se uma janela a cada subgrupo e realiza-se em seguida a transformada de Fourier, ou utiliza-se o *cascade decimation* (Wight e Bostick, 1980), uma técnica alternativa ao consagrado FFT. A janela serve para atenuar as distorções que surgem ao passar para o domínio da frequência por se trabalhar com séries temporais finitas. O espectro de frequência obtido é suavizado fazendo-se uma média das frequências calculadas em torno de valores alvos.

Será usada a seguinte nomenclatura para representar estes subgrupos: para o campo elétrico na direção x do primeiro subgrupo, a transformada de Fourier é representada por E_{x1} , deixando implícito sua dependência a uma dada frequência. Para se obter os elementos do Tensor de Impedância, será considerado o caso mais simples em que há dois subgrupos independentes, o que equivale a dizer que os campos medidos são não-polarizados. Pode-se então escrever, a partir da Equação (2.1), um sistema da forma:

$$E_{x1} = Z_{xx}H_{x1} + Z_{xy}H_{y1} \quad (2.5)$$

$$E_{x2} = Z_{xx}H_{x2} + Z_{xy}H_{y2} \quad (2.6)$$

De onde se obtém o valor de Z_{xy} dado por:

$$Z_{xy} = \frac{\begin{vmatrix} H_{x1} & E_{x1} \\ H_{x2} & E_{x2} \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} H_{x1} & H_{y1} \\ H_{x2} & H_{y2} \end{vmatrix}} \quad (2.7)$$

com $H_{x1}H_{y2} - H_{x2}H_{y1} \neq 0$

Através de procedimentos análogos, obtém-se os demais componentes do tensor de impedância. A condição do denominador não ser nulo expressa a representação matemática da suposição de que os subgrupos são independentes.

No entanto, para alcançar um melhor resultado estatístico, convém utilizar todos os N dados independentes obtidos em uma dada frequência. Isto será feito nas próximas seções.

2.3.1 Mínimos Quadrados

O método dos mínimos quadrados é o procedimento clássico para obterem-se os elementos de uma função de transferência, que neste caso particular é o Tensor de Impedância. Ele consiste na minimização de uma função erro definida por:

$$\varepsilon = \sum_{i=1}^N |E_{xi} - (Z_{xx}H_{xi} + Z_{xy}H_{yi})|^2 \quad (2.8)$$

Isto é feito igualando-se a zero a derivada da função ε em relação à Z_{xx} , fazendo-se depois o mesmo para Z_{xy} . Obtem-se assim:

$$\sum_{i=1}^N E_{xi}H_{xi}^* = Z_{xx} \sum_{i=1}^N H_{xi}H_{xi}^* + Z_{xy} \sum_{i=1}^N H_{yi}H_{xi}^* \quad (2.9)$$

$$\sum_{i=1}^N E_{xi}H_{yi}^* = Z_{xx} \sum_{i=1}^N H_{xi}H_{yi}^* + Z_{xy} \sum_{i=1}^N H_{yi}H_{yi}^* \quad (2.10)$$

Nota-se que as somatórias representam os auto espectros e espectros cruzados do espectro de densidade. As Equações (2.9) e (2.10) são mais convenientemente representadas pela seguinte notação matricial:

$$(\mathbf{H}^\dagger \mathbf{E}_x) = (\mathbf{H}^\dagger \mathbf{H}) \hat{\mathbf{Z}}_x \quad (2.11)$$

onde,

$$\mathbf{E}_x = \begin{bmatrix} E_{x1} \\ \vdots \\ E_{xN} \end{bmatrix} \quad \mathbf{H} = \begin{bmatrix} H_{x1} & H_{y1} \\ \vdots & \vdots \\ H_{xN} & H_{yN} \end{bmatrix} \quad \hat{\mathbf{Z}}_x = \begin{bmatrix} \hat{Z}_{xx} \\ \hat{Z}_{xy} \end{bmatrix}$$

e o símbolo $\dagger$ representa a hermitiana da matriz e “ $\hat{}$ ” indica a estimativa mensurada de $\mathbf{Z}_x$.

$\hat{\mathbf{Z}}_x$ é facilmente obtido da Equação (2.11) e é dado por:

$$\hat{\mathbf{Z}}_x = (\mathbf{H}^\dagger \mathbf{H})^{-1} (\mathbf{H}^\dagger \mathbf{E}_x) \quad (2.12)$$

De modo análogo, obtém-se as demais componentes do tensor de impedância. [Sims et al. \(1971\)](#) mostraram que estas estimativas dos elementos do tensor têm um desvio para baixo

devido ao ruído aleatório em $\mathbf{H}$. Para ilustrar este fato, considere-se o caso unidimensional com uma fonte não-polarizada. Neste caso $\sum_{i=1}^N E_x H_x^*$ e $\sum_{i=1}^N H_y H_x^*$ tendem a zero. Com isso, Z_{xx} torna-se desprezível e Z_{xy} simplifica-se em:

$$Z_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^N E_x H_y^*}{\sum_{i=1}^N H_y H_y^*} \quad (2.13)$$

onde os canais eletromagnéticos medidos são considerados como sendo a soma do sinal eletromagnético que satisfaz a Equação (2.1) mais um ruído, na forma:

$$E_x = E_{xs} + E_{xr}, \quad (2.14)$$

e de modo análogo para E_y , H_x e H_y . Assume-se que os ruídos são aleatórios, independentes do sinal e uns dos outros. Neste caso, o valor esperado para Z_{xy} será da forma:

$$\begin{aligned} \hat{Z}_{xy} &= \frac{\sum_{i=1}^N E_{xs} H_{ys}^*}{\sum_{i=1}^N H_{ys} H_{ys}^* + \sum_{i=1}^N H_{yr} H_{yr}^*} \\ \hat{Z}_{xy} &= \frac{Z_{xy}}{(1 + \text{razão ruído-sinal de } H_y)} \end{aligned} \quad (2.15)$$

Portanto, quanto mais ruidoso for o sinal magnético, maior será o desvio para baixo do valor estimado de Z_{xy} e, conseqüentemente, da resistividade aparente calculada pela Equação (2.3). Sims et al. (1971) também mostraram que, refazendo os cálculos partindo do tensor de admitância, ao invés do de impedância, a resistividade aparente estimada terá um desvio para cima devido ao ruído nos canais elétricos. Deste modo, o método dos mínimos quadrados estima um limite máximo e mínimo para a resistividade aparente e, esperançosamente, a resistividade aparente “verdadeira” estará entre estes dois limites.

Infelizmente, o sinal eletromagnético raramente segue as premissas sobre o ruído e o sinal indicadas na Equação (2.14), ao menos em parte dos dados. Uma fonte de sinal mais complexa provavelmente não seguirá a relação linear dada pela Equação (2.1) e a condição de que o ruído siga uma distribuição gaussiana nem sempre é mantida. Os métodos baseados em mínimos quadrados normalmente reagem abruptamente a estas inadequações ao modelo, obtendo valores de baixa qualidade para a resistividade aparente. Este resultado aparece em diversos trabalhos sobre estimação da função de transferência, sendo revisado por Jones et al. (1989).

2.3.2 Referência Remota

O método de RR para sondagens MT foi proposto por [Gamble et al. \(1979b\)](#) e segue, em linhas gerais, o mesmo procedimento do método de mínimos quadrados. A diferença básica está em que ele usa o sinal magnético coletado em uma estação remota para o cálculo dos espectros cruzados do espectro de densidade. A preferência do uso do sinal magnético ao sinal elétrico deve-se principalmente a dois fatores. Primeiro, o sinal magnético normalmente é menos ruidoso que o sinal elétrico, notoriamente no caso de um ruído gerado por uma EFE. Segundo, ele é pouco afetado pela geologia da região, de modo que a geologia da região onde está a estação remota não precisa ser levada em conta. Denotando o campo magnético medido na estação remota por $\mathbf{H}_R$, a Equação (2.12) toma a forma:

$$\hat{\mathbf{Z}}_x = (\mathbf{H}_R^\dagger \mathbf{H})^{-1} (\mathbf{H}_R^\dagger \mathbf{E}_x) \quad (2.16)$$

Neste caso, como não há auto espectro e mantendo-se as hipóteses sobre a natureza dos ruídos, as resistividades estimadas não sofrem nenhum tipo de desvio, apenas a flutuação estatística da qual pode-se estimar os erros dos valores de resistividade. No entanto, o método de RR, como o de mínimos quadrados, não é robusto, produzindo também dados de baixa qualidade quando os ruídos ou a fonte do sinal não seguem as premissas do método MT.

2.3.3 Métodos Robustos

Por métodos robustos entende-se aqueles procedimentos estatísticos que são relativamente insensíveis à presença moderada de dados ruins ou a inadequações ao modelo, e que reagem gradualmente ao invés de abruptamente a estas perturbações. Nas sondagens de indução eletromagnética, estes métodos foram introduzidos como um processo iterativo de mínimos quadrados ponderados ([Egbert e Booker, 1986](#); [Chave et al., 1987](#)). Neste caso, a Equação (2.12) toma a forma:

$$\hat{\mathbf{Z}}_x = (\mathbf{H}^\dagger \mathbf{W} \mathbf{H})^{-1} (\mathbf{H}^\dagger \mathbf{W} \mathbf{E}_x) \quad (2.17)$$

onde $\mathbf{W}$ é uma matriz diagonal $N \times N$ cujos elementos são os pesos atribuídos a cada subgrupo. Normalmente estes pesos são escolhidos de modo que a parte central da distribuição seja gaussiana, enquanto as extremidades são laplacianas. [Egbert e Booker](#)

(1986) e Chave e Thomson (1989) usam os seguintes pesos:

$$W_i = \begin{cases} 1 & \text{se } |r_i| \leq r_0, \\ r_0/|r_i| & \text{se } |r_i| > r_0. \end{cases} \quad (2.18)$$

onde $r_0 = 1,5$ e r_i é dado por:

$$r_i = \frac{E_{xi} - (Z_{xx}H_{xi} + Z_{xy}H_{yi})}{\hat{\sigma}} \quad (2.19)$$

onde $\hat{\sigma}$ é uma estimativa da escala típica do erro.

Note que $\hat{\mathbf{Z}}$ estimado pela Equação (2.17) minimiza uma função erro ponderada dada por:

$$\varepsilon = \sum_{i=1}^N W_i |E_{xi} - (Z_{xx}H_{xi} + Z_{xy}H_{yi})|^2 \quad (2.20)$$

Os pesos da Equação (2.18) têm o ponto de transição em $r_0\hat{\sigma}$. Resíduos inferiores a este valor são tratados normalmente, como no método dos mínimos quadrados. Já para resíduos maiores, os dados são reduzidos pelo fator de escala $\hat{\sigma}$.

O processo iterativo para resolver a Equação (2.17) começa estimando os parâmetros por mínimos quadrados. Os resíduos obtidos são usados para calcular os pesos e faz-se uma nova estimativa de $\hat{\mathbf{Z}}$ pela Equação (2.17). O processo é repetido até obter-se a convergência, que é garantida por Huber (1981).

2.4 Ruídos Eletromagnéticos

Os sinais medidos nas sondagens MT normalmente estão contaminados por ruídos, que formam a parte dos dados que não podem ser abordados corretamente pela teoria do método MT. Será apresentada uma classificação geral dos ruídos e em seguida será discutido de modo mais particularizado o ruído gerado por estradas de ferro eletrificadas com corrente DC (EFE), com ênfase para a EFCJ.

2.4.1 Classificação dos Ruídos

Há uma vasta literatura sobre ruídos em métodos eletromagnéticos, recolhida em parte por dois trabalhos de revisão: Szarka (1988) e Junge (1996). Esta seção seguirá de perto estes dois trabalhos.

Os ruídos em sondagens MT podem ser produzidos pelo instrumental de medida, por fenômenos naturais ou pelo homem.

Falha no armazenamento dos dados, descargas de capacitores e saturamento do sinal são alguns exemplos de ruído instrumental. Os sensores são um ponto particularmente sensível. Os magnetômetros podem introduzir um ruído caso se movimentem durante a coleta de dados, devido ao sinal induzido pelo campo geomagnético. Os eletrodos são mais críticos ainda, pois são bastante sensíveis à temperatura, podendo apresentar grandes variações no registro do campo elétrico durante o dia ou após uma chuva. No Capítulo 3 será descrito com maiores detalhes alguns cuidados para evitar a introdução de ruídos devido a instalação do equipamento.

Como exemplo de ruídos naturais, tem-se as tempestades magnéticas e os relâmpagos, que podem gerar um sinal que viola a hipótese de onda plana pela proximidade da fonte do sinal à estação. A topografia pode produzir efeitos de distorção e os oceanos também, quando as sondagens são feitas próximas à costa, sendo que seu alcance depende da profundidade do oceano junto ao continente. Para sondagens em períodos longos, o sinal induzido pelas marés também pode introduzir ruídos.

Por fim, tem-se os ruídos produzidos pelo homem, que pode ser dividido em dois grupos: passivos e ativos. Os ruídos passivos são normalmente gerados por construções, por representarem um contraste muito grande de resistividade, introduzindo distorções nas medidas. Eles podem ser resistivos, como estradas e represas; ou condutivos, como canos metálicos e cercas de arame. Como estas distorções têm normalmente um curto alcance, elas podem ser facilmente evitadas, colocando-se os sensores suficientemente longe destas construções. Os ruídos ativos, por sua vez, têm um alcance muito maior e vêm aumentando com o passar dos anos devido ao crescimento da dependência do homem a equipamentos eletro-eletrônicos. A malha de distribuição de energia elétrica é particularmente importante por estar presente em quase todas as regiões habitadas do mundo.

A Figura 2.1 mostra o espectro da componente horizontal do campo magnético. Nela destacam-se as regiões do espectro gerada pela ionosfera-magnetosfera e pelos esféricos, as ressonâncias da cavidade Terra-Ionosfera e os harmônicos das linhas de transmissão.

Os ruídos gerados por centros urbanos são bastante complexos e têm um alcance de dezenas de quilômetros (Qian e Pedersen, 1991).

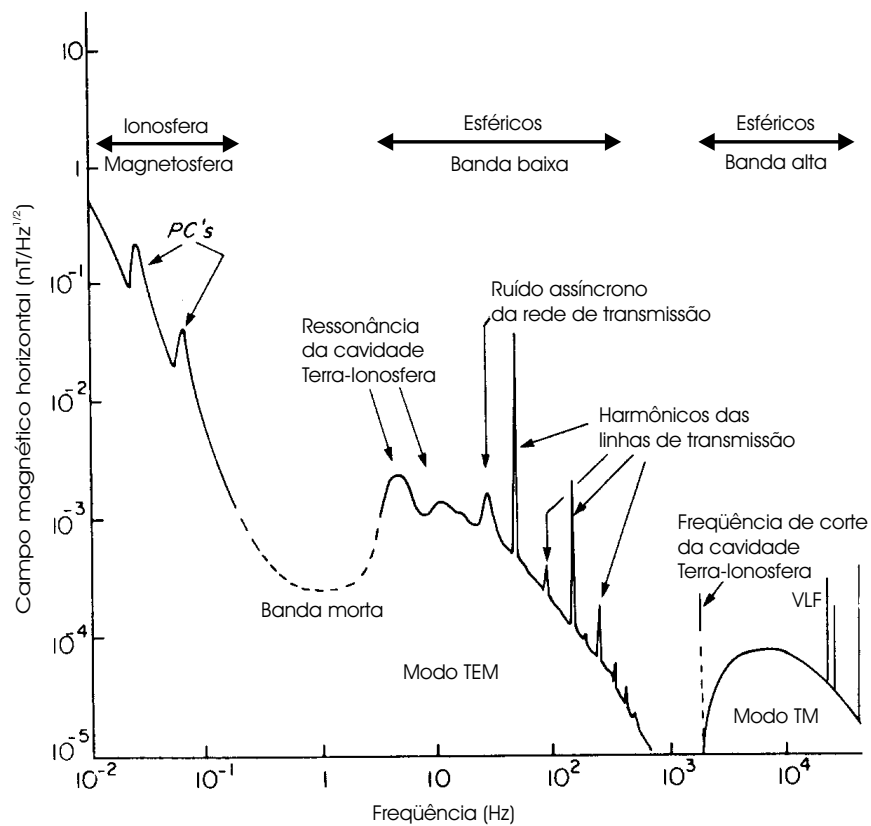


Fig. 2.1 – Representação do espectro do campo magnético horizontal e de componentes do ruído eletromagnético. Pc: micropulsões contínuas; TEM: transversal eletromagnético; TM: transversal magnético; VLF: *very low frequency*.
 FONTE: modificada de Macnae et al. (1984).

2.4.2 Ruído de uma Estrada de Ferro

O ruído gerado por uma EFE classifica-se como um ruído ativo irregular. O circuito elétrico de uma EFE consiste em uma subestação retificadora, um cabo aéreo para distribuir a corrente, o motor do trem e os trilhos mais o solo para retornar a corrente, como ilustra a Figura 2.2.

Se os trilhos fossem bem isolados, toda a corrente voltaria por ele, de modo que o campo eletromagnético gerado pelo cabo aéreo seria praticamente cancelado pelo campo gerado pelos trilhos, exceto para uma região muito próxima da EFE. Como os trilhos não são perfeitamente isolados, a corrente elétrica penetra na terra produzindo grandes perturbações eletromagnéticas.

Essas perturbações já foram apresentadas em vários artigos (Fraser e Ellyett, 1964; Jones e Kelly, 1966; Mikerina, 1962). Chaize e Lavergne (1970) apresentam a atenuação de $|\mathbf{H}|$ em função da distância da EFE. Kovalevskiy et al. (1961) apresentam a atenuação de $E_{\text{máx}}$ também em função da distância. Jones e Kelly (1966) concluem que as perturbações produzidas por uma EFE são muito mais facilmente identificadas observando-se o campo elétrico. Dupouy (1950) e Yanagihara (1977) apresentam um modelo bastante similar para estimar o campo magnético produzido por uma EFE. Fontes (1988) mostra a influência do ruído gerado por uma EFE em sondagens magnetotelúricas e propõe um modelo de fonte próxima (*modelling near-source fields*) para auxiliar na interpretação dos dados contaminados pelo ruído de uma EFE.

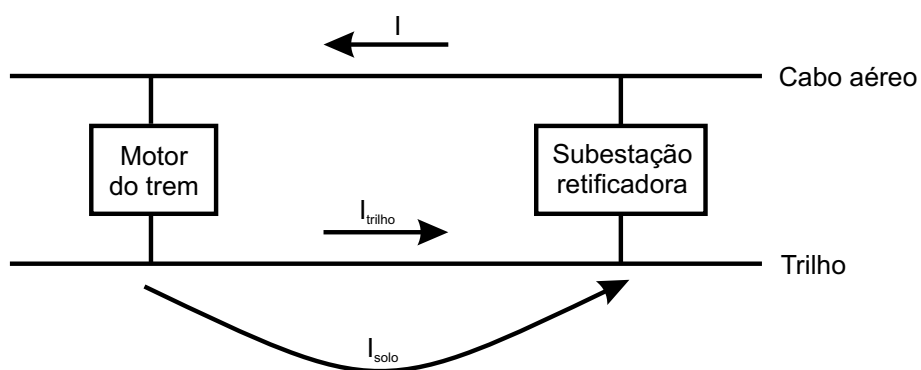


Fig. 2.2 – Representação do circuito da EFE.

2.4.3 Estrada de Ferro de Campos do Jordão

A EFCJ é uma estrada de ferro eletrificada que liga as cidades paulistas de Pindamonhangaba e Campos do Jordão, sendo utilizada principalmente para turismo. A Figura 2.3 mostra sua localização e as principais estações de parada, a saber: estação de Pindamonhangaba, estação de Piracuama, estação Eugênio Lefevre e Estação de Campos do Jordão. A EFCJ é alimentada por duas subestações retificadoras localizadas na estação Eugênio Lefevre, cada uma delas fornecendo 1500 V em corrente contínua para cada lado da EFCJ. Há três viagens principais: Pindamonhangaba-Piracuama (5 viagens de ida e volta), Pindamonhangaba-Campos do Jordão (1 viagem de ida e volta) e Campos do Jordão-Eugênio Lefevre (2 viagens de ida e volta). O número de viagens indicado são para os dias úteis. Nos finais de semana há mais uma viagem entre Pindamonhangaba e Piracuama e, em época de temporada, é comum haver viagens extras. Há ainda um bonde elétrico que circula dentro da cidade de Campos do Jordão utilizando-se da linha férrea da EFCJ, fazendo normalmente 10 viagens diárias. A EFCJ opera entre 6 h e 19 h 20 min (hora local) e nos horários de pico circulam 3 trens mais o bonde elétrico.

Os ruídos EM produzidos pela EFCJ afetando os dados MT foram detectados pela primeira vez em um trabalho de Mestrado recentemente concluído (Brito, 1998). Nesse trabalho, foram realizadas sondagens em um perfil transversal à Bacia de Taubaté utilizando um equipamento MT de banda larga (faixa de frequências de 0,0004 a 1000 Hz). Duas estações, localizadas sobre a Serra da Mantiqueira e bastante próximas à EFCJ (uma a 0,47 km e outra a 6,81 km) foram perturbadas de modo significativo pelo ruído gerado pela estrada de ferro. O fato de se ter conseguido analisar os dados noturnos de forma independente permitiu obter respostas MT de boa qualidade até períodos de 128 s naquele trabalho. Por outro lado, as características então observadas da EFCJ (cortando terrenos condutores e resistivos, além de operar apenas durante o dia) motivou a elaboração do presente estudo.

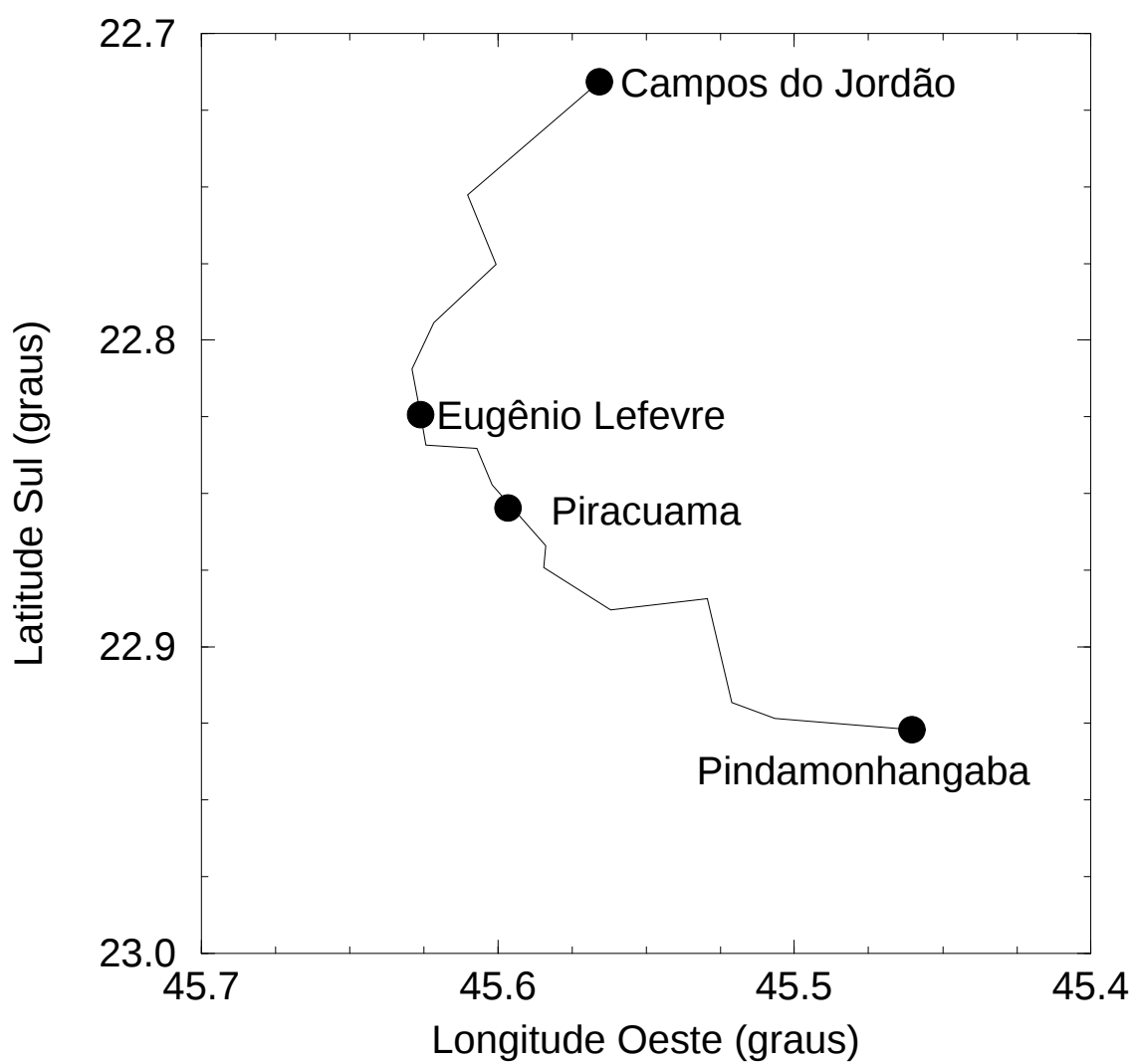


Fig. 2.3 – Localização da EFCJ e de suas principais estações.

CAPÍTULO 3

COLETA DE DADOS

3.1 Geologia da Área em Estudo

Os perfis estudados localizam-se em duas regiões geográficas com geologia bastante distinta: a Serra da Mantiqueira e o Vale do Paraíba. A Serra da Mantiqueira localiza-se no complexo cristalino Pré-Cambriano da região Sudeste do Brasil, caracterizando-se pela presença de intrusões alcalinas, extensas falhas transcorrentes e diversas depressões tectônicas. As falhas estão aproximadamente alinhadas à direção NE-SW e subdividem a região em diversos blocos isolados. O Vale do Paraíba localiza-se em uma das depressões tectônicas do cristalino preenchidas com sedimentos do Terciário, formando a bacia sedimentar de Taubaté. A bacia caracteriza-se pela assimetria entre suas bordas laterais, com seu limite NW sendo quase inteiramente marcado por contatos através de falhas entre rochas Pré-Cambrianas e sedimentares, enquanto no SE os sedimentos transgridem sobre o embasamento. Ela é parcialmente seccionada por quatro altos estruturais, formando cinco sub-bacias. A resistividade superficial do cristalino foi estimada em 10.000 $\Omega.m$ e na bacia, em 5 $\Omega.m$ por [Padilha et al. \(1991\)](#). A Figura 3.1 mostra a localização destas regiões e das estações MT.

A estação EFC012 situa-se no alto da capela Santa Luzia, onde a espessura do pacote sedimentar é de 150 m aproximadamente (baseado no mapa estrutural sísmico em profundidade de [Marques, 1990](#)). As estações EFC007, EFC008 e EFC009 estão na borda do alto da capela Nossa Senhora do Socorro. No entanto, a espessura do pacote sedimentar neste alto é maior, em torno de 350 m no centro da bacia, tornando-se gradualmente mais fina ao aproximar-se das bordas. As estações EFC010 e EFC011 estão na sub-bacia de Roseira, onde o pacote é bem mais espesso. Os valores da espessura do pacote sedimentar sob as estações da bacia são mostrados na Tabela 3.1.

TABELA 3.1 – PROFUNDIDADE DO EMBASAMENTO SOB AS ESTAÇÕES DA BACIA

Estação	Profundidade (m)
EFC007	300
EFC008	350
EFC009	350
EFC010	675
EFC011	600
EFC012	150

FONTE: adaptada de [Marques \(1990\)](#).

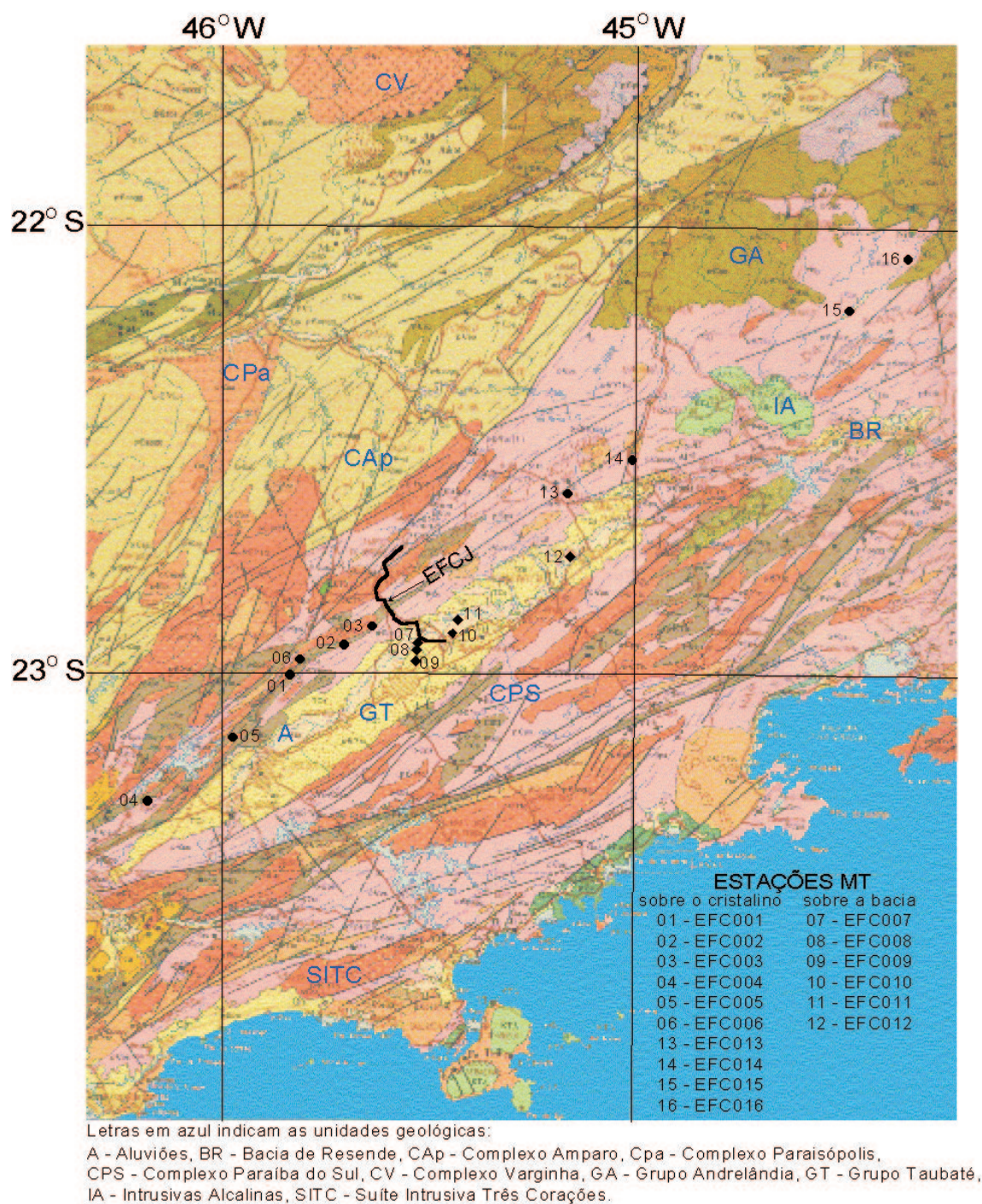


Fig. 3.1 – Mapa geológico com a localização das estações MT e da EFCJ.

FONTE: adaptada do [Projeto Radambrasil \(1983\)](#).

3.2 Equipamento Utilizado

O equipamento utilizado para a coleta de dados foi o *Long Period Magnetotelluric System* (LRMT) da PHOENIX GEOPHYSICS LTD. (PHOENIX). Cada equipamento faz a medida simultânea de cinco canais, dois elétricos e três magnéticos. As estações EFC001 a EFC012 foram medidas utilizando-se três destes equipamentos, pertencentes ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Para as estações EFC013 a EFC016 contou-se com mais um destes equipamentos, pertencente ao Observatório Nacional (ON/CNPq).

Genericamente, cada equipamento consiste em uma Central de processamento, um sistema de posicionamento global (GPS), microcomputador portátil, sensores e um jogo de baterias para alimentação do sistema. Na Central ficam os circuitos que controlam e armazenam a aquisição dos dados e é composta basicamente de 5 placas, enumeradas a seguir:

- a) placa para distribuição da energia elétrica;
- b) placa de memória;
- c) placa para os filtros telúricos;
- d) placa do magnetômetro FLUXGATE;
- e) placa da unidade central de processamento (CPU).

O GPS utilizado é o SVeeSix-CM3 produzido pela TRIMBLE NAVIGATION (TRIMBLE) e foi fornecido junto com o LRMT pela PHOENIX. O GPS é usado para sincronizar as medidas dos equipamentos, podendo também fornecer as coordenadas geográficas da estação MT. No entanto, sua interface não é amigável, tendo sido preferido a aquisição das coordenadas através do GPS ProMARK X da MAGELLAN SYSTEMS CORPORATION (MAGELLAN).

O microcomputador portátil é utilizado para programar a Central, fornecendo os dados relevantes da estação, como distância entre os eletrodos, taxa de amostragem, ganhos e o período para coleta de dados. Ele também é usado para recolher os dados coletados pela Central e para fazer uma primeira avaliação dos dados.

Para medir as variações do campo magnético, utilizou-se do magnetômetro *fluxgate* NGL STE, produzido pela NAROD GEOPHYSICS LTD. (NAROD). Ele mede as três

componentes ortogonais do campo magnético. Os campos elétricos são medidos através da diferença de potencial entre pares de eletrodos não-polarizados de chumbo-cloreto de chumbo (Pb-PbCl_2), separados por volta de 150 m.

São aplicados três filtros aos dados, enumerados a seguir:

- a) filtro analógico *anti-aliasing* passa-baixa Bessel de 6-pólos em cada canal com -3 dB, nominal em 5 Hz;
- b) filtro digital *anti-aliasing* múltiplos estágios Chebyshev FIR, sendo em cada canal a taxa de 2 vezes por amostragem;
- c) filtro analógico passa-alta Butterworth de pólo simples apenas nos canais elétricos com -3 dB, nominal em 30.000 s.

Por valor nominal entende-se o valor para o qual foi projetado o filtro, cujo valor real é estimado após a calibragem do equipamento.

3.3 Instalação do Equipamento

O equipamento MT deve ser instalado em uma região plana, preferencialmente em baixadas para evitar distorções devido à topografia. Deve-se instalar o equipamento o mais distante possível da rede de distribuição de energia elétrica, pelo menos centenas de metros, e das redes de alta tensão, pelo menos alguns quilômetros. A configuração da instalação do equipamento no campo é mostrada na Figura 3.2.

Para que os dados coletados sejam de boa qualidade é necessário ter muito cuidado na instalação dos sensores. Citam-se a seguir alguns destes cuidados que se mostraram úteis no trabalho de campo:

- A conexão dos eletrodos aos cabos foi feita utilizando-se conectores tipo banana; a solda do cabo ao conector deve ser muito bem feita, pois maus contatos podem gerar um ruído muito intenso nos canais elétricos. Para evitar a umidade, as conexões eram vedadas com fita isolante e saco plástico que era fechado novamente com fita isolante;
- os eletrodos são bastante sensíveis à temperatura, podendo introduzir grandes variações no campo elétrico. Para amenizar este problema, os

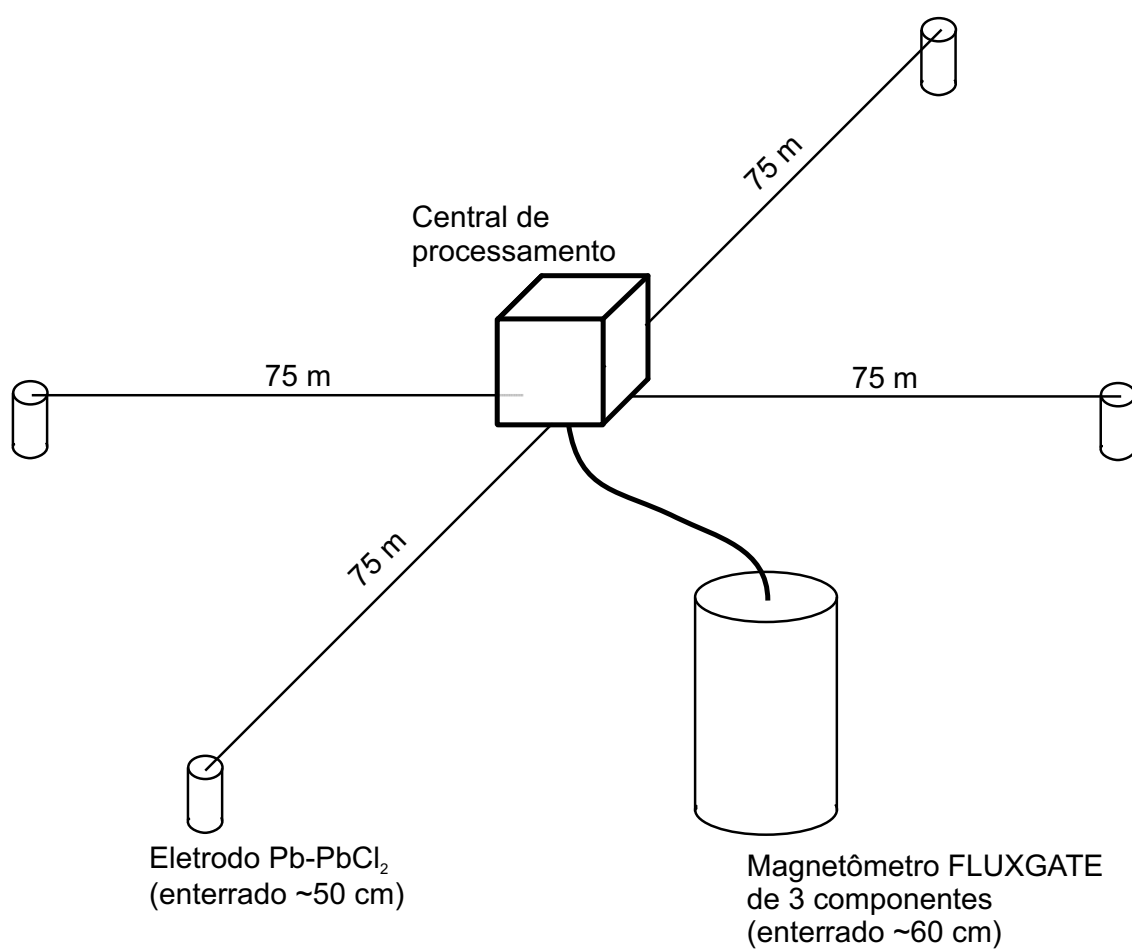


Fig. 3.2 – Esquema da instalação do equipamento LRMT.

eletrodos eram enterrados a uma profundidade de aproximadamente 50 cm e cobertos com folhas e galhos, tanto para não deixar o solo diretamente exposto ao Sol como para evitar que animais viessem a mexer neles;

- a experiência adquirida neste trabalho mostrou ser necessário enterrar os cabos dos eletrodos para evitar que o vento venha a induzir correntes elétricas movimentando o cabo no campo magnético da Terra e, principalmente, para que os animais domésticos ou selvagens não venham a danificá-lo (em todas as campanhas pelo menos um cabo foi partido por animais);
- o magnetômetro em geral apresentou menos problemas, sendo observados os seguintes cuidados para seu bom funcionamento: muito cuidado com o alinhamento ao campo magnético e nivelamento do magnetômetro, pois ele é bastante sensível a pequenas variações; o magnetômetro deve ser fixado com firmeza, comprimindo bem a terra ao seu redor para que não se mova. Como os eletrodos, ele foi coberto com folhas e galhos para amenizar a variação de temperatura e evitar que animais mexessem nele.

As direções Norte e Leste magnéticas, as quais os sensores foram alinhados, serão indicadas pelos índices x e y respectivamente. Para todas as estações, a declinação magnética é de aproximadamente N20W. Portanto a direção Leste magnética (N70E) é próxima da direção das falhas, que é em torno de N50E ([Projeto RadamBrasil, 1983](#)).

3.4 Localização das Estações MT

Foram realizadas 16 sondagens MT em 4 perfis. A localização das estações, da EFCJ e as principais unidades geológicas são apresentadas na Figura 3.1.

Procurou-se posicionar as estações de tal modo que a geologia não se alterasse muito ao longo de cada perfil. Com isto espera-se que as diferenças entre os resultados obtidos em cada estação sejam devidos à distância em relação a EFCJ, sem interferência de possíveis efeitos geológicos. Os perfis podem ser classificados de duas maneiras:

- a) quanto à geologia: levando-se em conta se as estações estão sobre a bacia sedimentar ou sobre o cristalino;
- b) quanto à EFCJ: levando-se em conta se as estações estão a Sudoeste ou a Nordeste da EFCJ.

As coordenadas das estações são apresentadas na Tabela 3.2, onde também são indicadas a distância da estação e sua posição relativa à EFCJ e se a estação está sobre o cristalino ou sobre a bacia.

Todas as estações dos perfis a Sudoeste da EFCJ estão contaminadas com o ruído da EFCJ. Estes perfis não puderam ser prolongados ainda mais para Sudoeste por aproximarem-se de regiões muito urbanizadas, com elevado nível de ruído artificial: a Grande São Paulo, no caso do perfil sobre o cristalino; das cidades de Taubaté e São José dos Campos, para o perfil sobre a bacia. Para o lado Nordeste, as estações MT sobre a bacia também estão contaminadas com o ruído da EFCJ, o que sugere que toda a região da Bacia de Taubaté é afetada pelo ruído. Finalmente para as estações sobre o cristalino situados a Nordeste da EFCJ, uma inspeção visual preliminar das séries temporais indicam que as estações EFC015 e EFC016 estariam isentas do ruído. O processamento dos dados, porém, demonstrou que apenas a estação EFC016 parece não ter sido contaminada pelo ruído, podendo ser usada como referência remota. Detalhes desses resultados, com uma discussão do alcance do ruído da EFCJ, serão apresentados no próximo capítulo.

TABELA 3.2 – LOCALIZAÇÃO DAS ESTAÇÕES MT

Estação	Latitude Sul	Longitude Oeste	Altitude	Distância à EFCJ	Posição relativa à EFCJ	Superfície
EFC001	23,0029°	45,8358°	650 m	29,0 km	Sudoeste	Cristalino
EFC002	22,9355°	45,7038°	810 m	13,8 km		
EFC003	22,8936°	45,6365°	670 m	5,6 km		
EFC004	23,2848°	46,1819°	690 m	76,2 km		
EFC005	23,1435°	45,9740°	590 m	49,6 km		
EFC006	22,9681°	45,8106°	670 m	24,2 km		
EFC007	22,9307°	45,5269°	540 m	1,2 km	Sudoeste	Bacia
EFC008	22,9467°	45,5287°	550 m	2,8 km		
EFC009	22,9706°	45,5309°	560 m	5,4 km		
EFC010	22,9090°	45,4417°	540 m	3,0 km	Nordeste	
EFC011	22,8786°	45,4289°	530 m	6,5 km		
EFC012	22,7368°	45,1571°	530 m	38,0 km		
EFC013	22,5965°	45,1627°	610 m	43,5 km	Nordeste	Cristalino
EFC014	22,5198°	45,0064°	650 m	61,4 km		
EFC015	22,1835°	44,4835°	1.170 m	126,0 km		
EFC016	22,0669°	44,3433°	1.140 m	144,9 km		

CAPÍTULO 4

ANÁLISE DOS DADOS

4.1 Caracterização do Ruído

Uma simples inspeção visual dos dados coletados permite estabelecer algumas características do ruído produzido pela EFCJ. Convém começar identificando este ruído e certificando sua origem. Há 4 pontos principais que mostram que as grandes perturbações medidas neste trabalho provém da EFCJ e serão denominados de ruído da EFCJ:

- a) As perturbações aparecem apenas no período diurno, entre 6 e 20 h, hora local, coincidindo com o horário de funcionamento da EFCJ;
- b) as perturbações aparecem em grupos, cujos horários iniciais coincidem com o horário das viagens na EFCJ, especialmente as primeiras viagens;
- c) a amplitude das perturbações está correlacionada com a distância da estação à EFCJ;
- d) a forma das variações observadas são bastante similares às apresentadas na literatura ([Mikerina, 1962](#); [Jones e Kelly, 1966](#)).

As Figuras [4.1](#) e [4.2](#) apresentam o ruído da EFCJ para os canais magnéticos e elétricos respectivamente. A primeira hora da série temporal representa as variações típicas observadas no período noturno. As grandes perturbações iniciam a partir das 6 h e coincidem com o horário de partida da primeira viagem da EFCJ, indo de Pindamonhangaba para Piracuama (veja a localização destas estações na Figura [2.3](#)), e às 7 h tem-se a viagem de volta. Os picos do ruído são particularmente evidentes por haver apenas um trem circulando na EFCJ neste horário. Note-se a simetria dos dois blocos do ruído, indicando que os ruídos gerados pela mesma viagem são bastante similares. O pico que ocorre um pouco antes das 6 h é possivelmente produzido quando o trem manobra para posicionar-se na estação. Pode-se notar ainda que o ruído da EFCJ é mais forte nos canais elétricos e no canal magnético vertical, indicando que a melhor forma de avaliar se os dados estão contaminados pelo ruído de uma EFE, numa primeira inspeção visual, é observando esses canais e em particular os canais elétricos, como já fora sugerido por [Jones e Kelly \(1966\)](#).

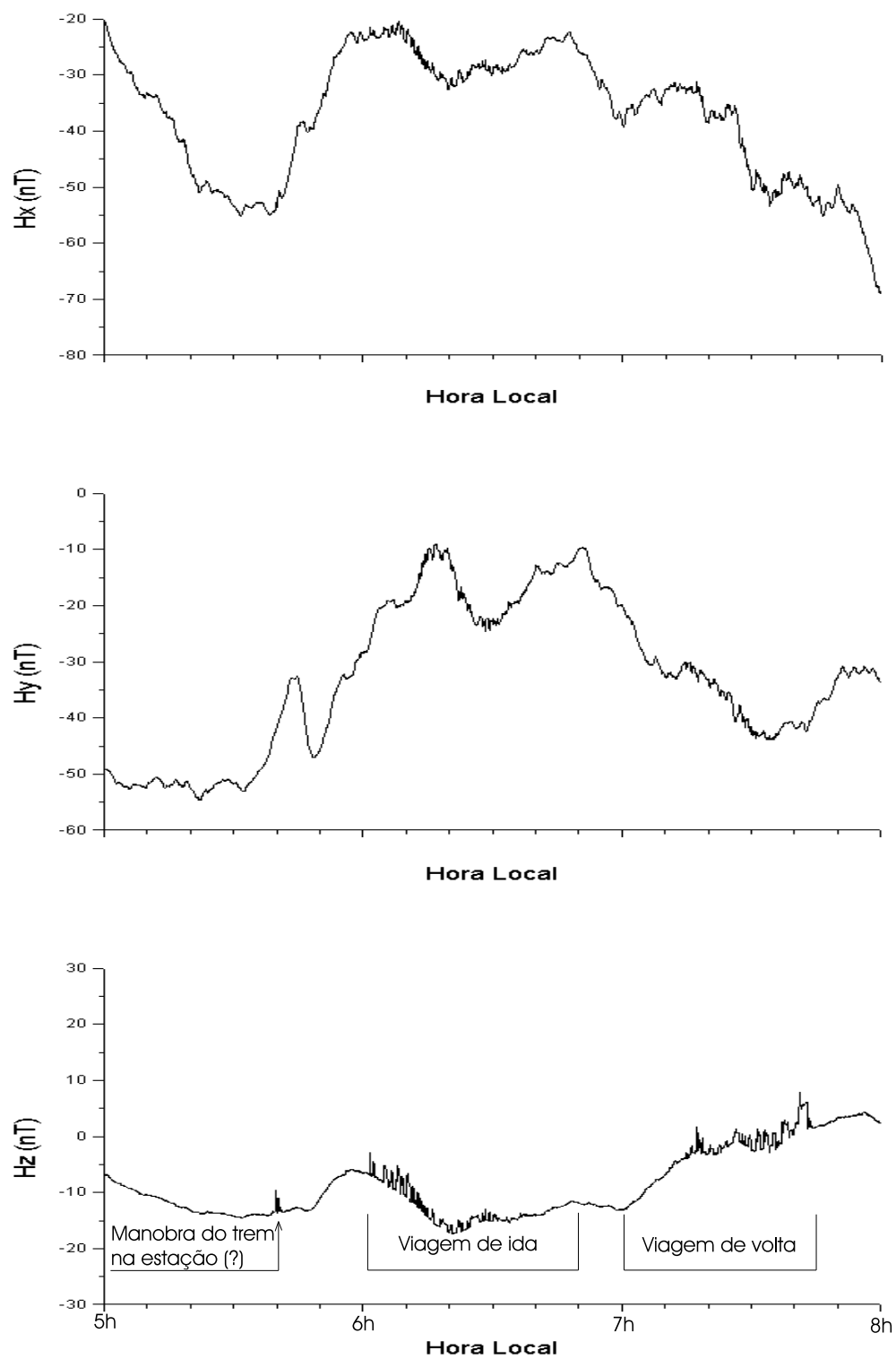


Fig. 4.1 – Série temporal dos canais magnéticos observados na estação EFC008 em 25/09/98

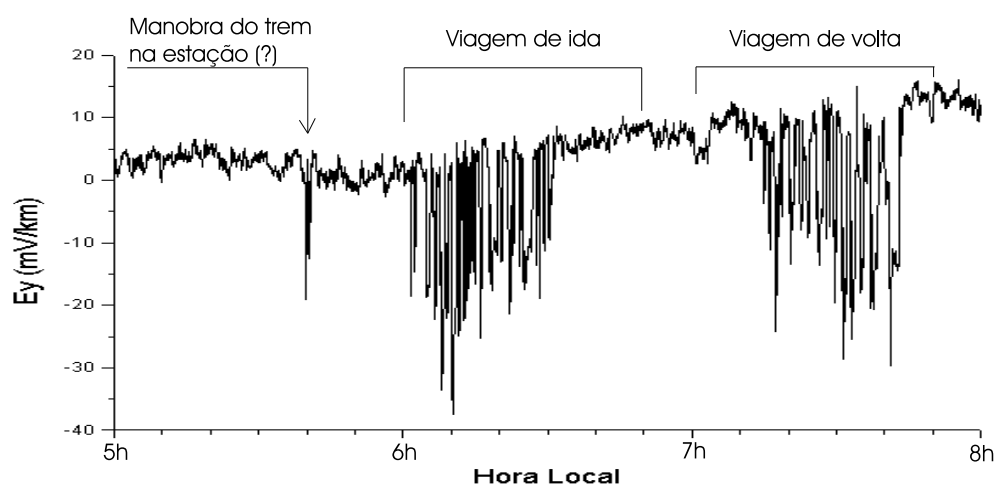
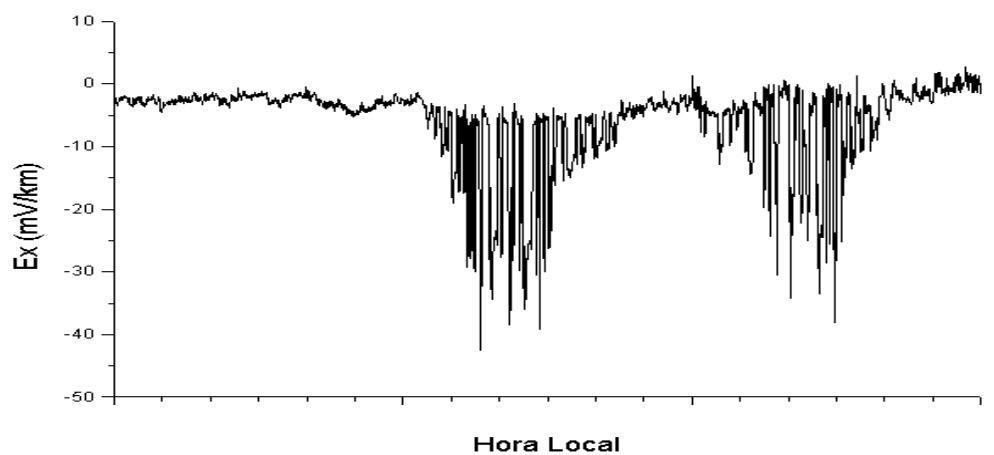


Fig. 4.2 – Série temporal dos canais elétricos observados na estação EFC008 em 25/09/98

Para se fazer uma avaliação qualitativa da atenuação do ruído da EFCJ, foram escolhidos alguns picos da primeira viagem entre Pindamonhangaba e Piracuama. A variação da amplitude destes picos com a distância à EFCJ é mostrada nas Figuras 4.3, 4.4 e 4.5. Não foi possível fazer a análise do canal E_x pois este canal sempre apresentou algum problema em pelo menos duas das três estações simultâneas de cada campanha (saturação do sinal, instabilidade dos eletrodos ou rompimento do cabo).

Pelas Figuras 4.3 e 4.4, vê-se, grosso modo, que a atenuação dos campos magnéticos em função da distância da EFCJ é similar tanto na bacia como no cristalino, e que as amplitudes observadas para a componente H_z são maiores que as observadas nas componentes horizontais. No entanto, nota-se que a atenuação é bastante distinta para o campo elétrico na bacia e no cristalino (Figura 4.5). Chama a atenção que a amplitude de E_y da estação EFC012 é maior que da EFC011, apesar daquela estar 31,5 km mais distante da EFCJ. Esta discrepância pode ser explicada levando-se em conta a variação da profundidade do embasamento da Bacia de Taubaté.

Na Tabela 3.1, apresentada na Seção 3.1, tem-se a profundidade do embasamento sob as estações da Bacia baseado no trabalho de Marques (1990). Essa tabela mostra que a Bacia de Taubaté é mais espessa sobre as estações EFC010 e EFC011. Já a estação EFC012 está numa porção fina do pacote sedimentar. Como os terrenos sedimentares são mais condutores e, por sua vez, quanto mais condutor for o material maior será a atenuação do sinal, isso pode explicar a razão do ruído em E_y ser mais intenso na estação EFC012 do que na EFC011 (considerando nesse caso como fonte principal do ruído aquele propagando-se através do embasamento cristalino sob a bacia). A abrupta mudança de amplitude da estação EFC008 para EFC010 e da estação EFC009 para EFC011 parece ser devido a não simultaneidade das medidas, pois esta mudança abrupta também é notada nos canais magnéticos (ver Figura 4.3).

A relação observada entre a componente elétrica do ruído da EFCJ com a geologia indica a possibilidade de utilizar este ruído como um sinal para exploração geofísica. Por outro lado, a componente magnética na bacia não é tão afetada justamente por ser mais insensível às variações geológicas. De fato, Kaufman e Keller (1981) mostram que a componente magnética medida na superfície de uma Terra horizontalmente estratificada não depende do perfil de condutividade quando a fonte é uma onda plana (o que é válido desde que se esteja a mais de 3 espessuras peliculares da fonte; Goldstein e Strangway, 1975). Certamente a Bacia de Taubaté não satisfaz a condição de Terra estratificada, pois a profundidade do embasamento varia bastante. Esta variação da profundidade e o contraste

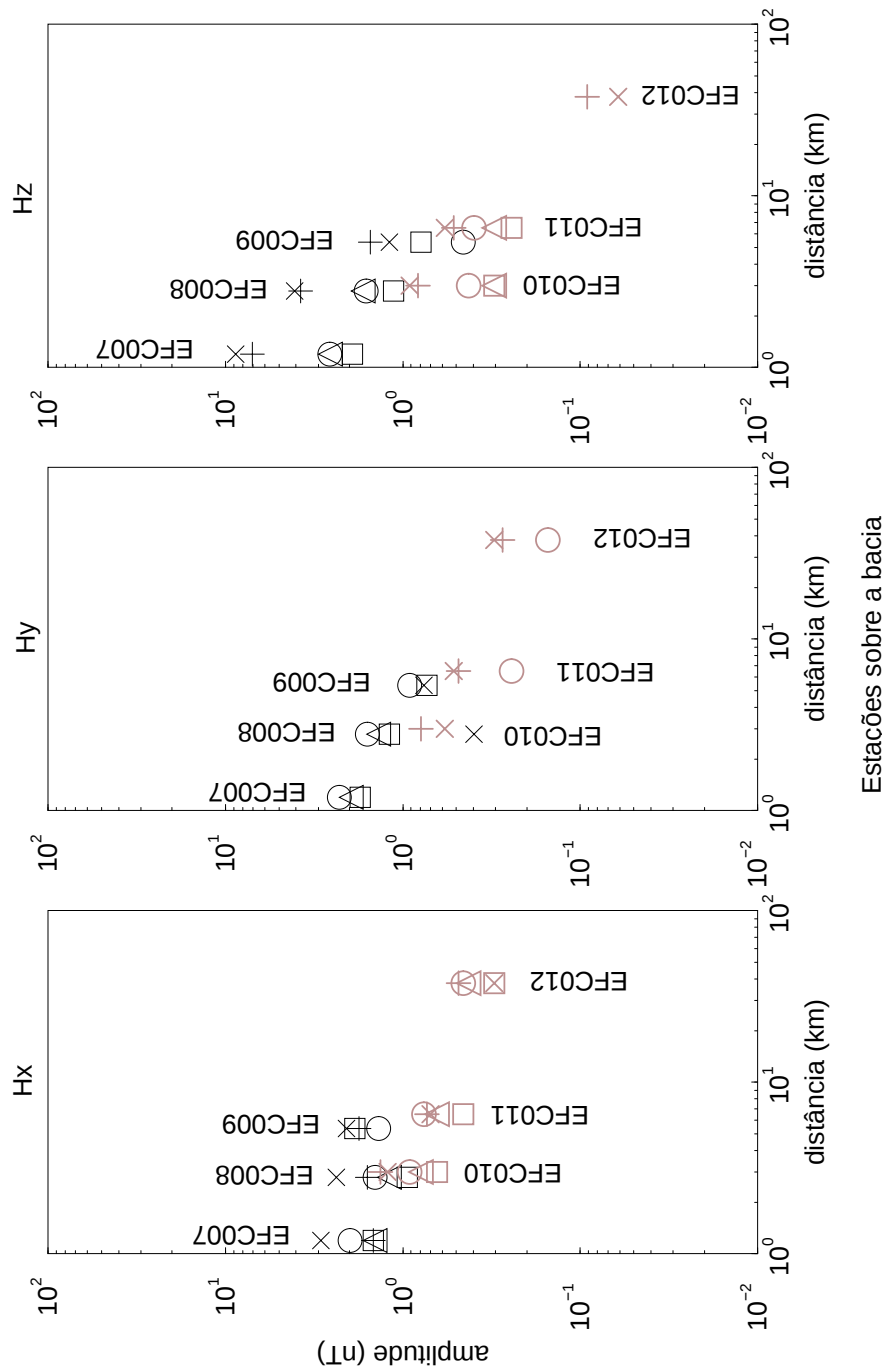


Fig. 4.3 – Amplitude dos picos do ruído dos canais magnéticos em função da distância à EFCJ para as estações da Bacia. Símbolos iguais indicam o mesmo pico ou similar. São dois conjuntos de medidas simultâneas: um são as estações EFC007, EFC008 e EFC009; e o outro são as estações EFC010, EFC011 e EFC012.

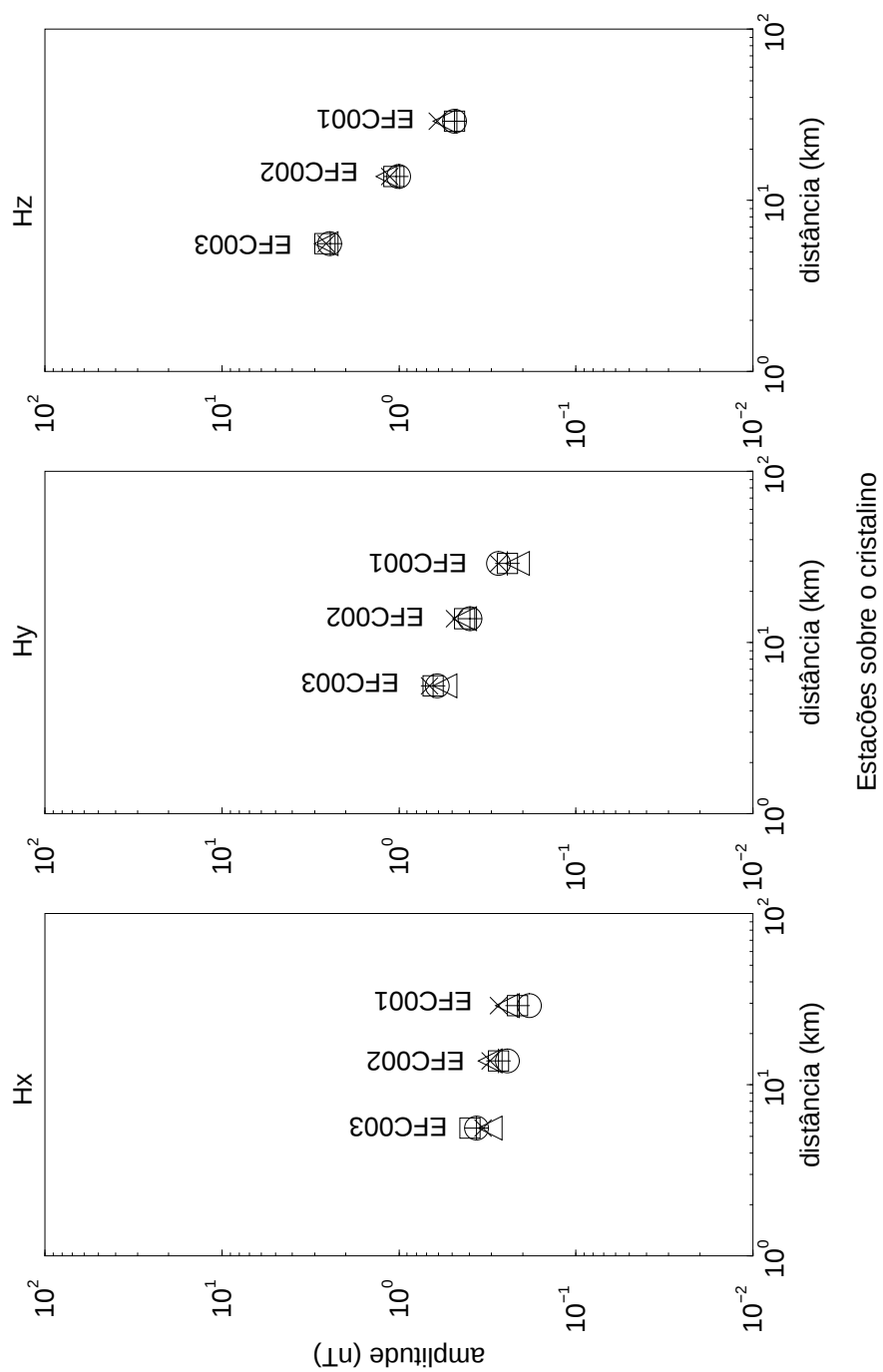


Fig. 4.4 – Amplitude dos picos do ruído dos canais magnéticos em função da distância à EFCJ para as estações do Cristalino. Símbolos iguais indicam o mesmo pico ou similar. As estações EFC001, EFC002 e EFC003 são simultâneas.

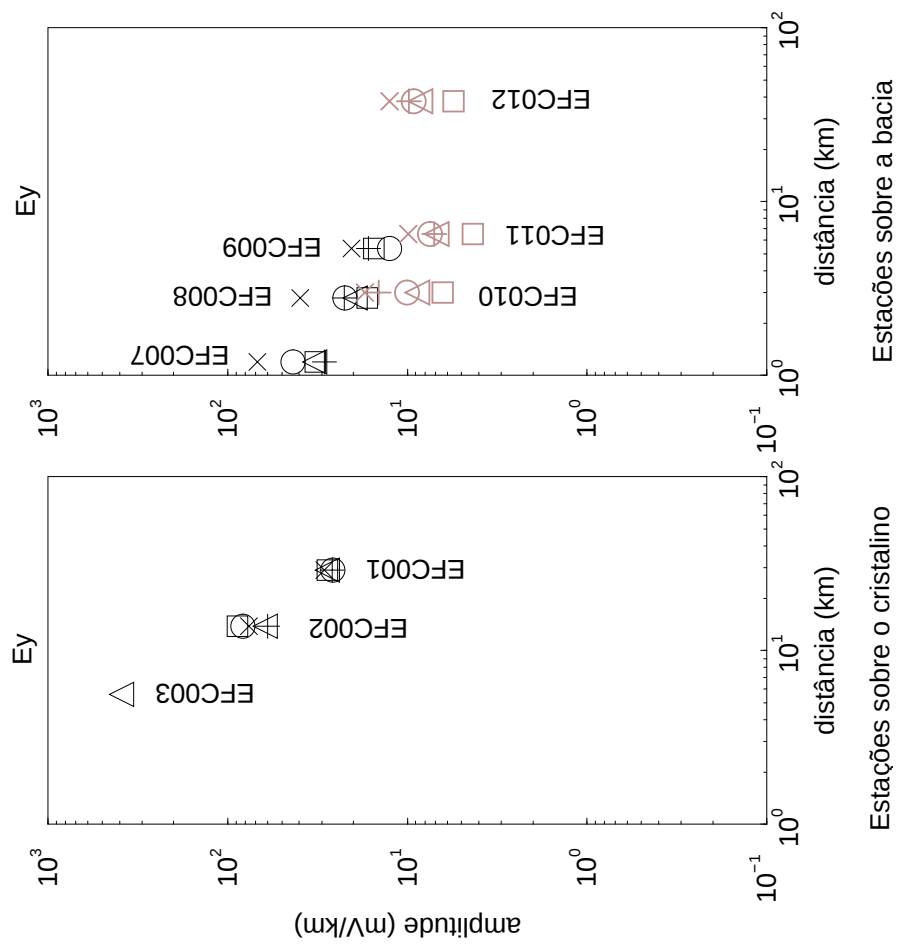


Fig. 4.5 – Amplitude dos picos do ruído do canal E_y em função da distância à EFCJ para as estações do Cristalino e da Bacia. Símbolos iguais indicam o mesmo pico ou similar. São três conjuntos de medidas simultâneas: um são as estações EFC001, EFC002 e EFC003; outro são as estações EFC007, EFC008 e EFC009; e o terceiro são as estações EFC010, EFC011 e EFC012.

de resistividade do embasamento pode ser a causa da maior flutuação das amplitudes do campo magnético na bacia do que no cristalino, indicando novamente a possibilidade de se utilizar o ruído para a exploração geofísica. Contudo, encontrar a técnica apropriada para usar o ruído da EFCJ para extrair informações geofísicas está além dos objetivos deste trabalho.

Uma última característica a ser analisada do ruído da EFCJ é o seu alcance. Sobre o cristalino, a estação mais distante na qual foi possível identificar visualmente o ruído foi a estação EFC004, a 76,2 km da EFCJ. No entanto, a análise dos dados (ver Seção 4.2.3) indica que o sinal coletado na estação EFC015, a 126 km da EFCJ, ainda é perturbada pelo ruído. Já os dados da estação EFC016 (a 144,9 km da EFCJ) não mostram indícios de contaminação pelo ruído da EFCJ. Portanto, o alcance do ruído no cristalino está entre 126 e 144,9 km. Sobre a bacia, como visto anteriormente, a intensidade do ruído é bastante influenciada pela espessura do pacote sedimentar, o que dificulta estabelecer seu alcance neste terreno. Contudo, é provável que a bacia inteira seja afetada pelo ruído da EFCJ pelos seguintes motivos:

- o ruído ainda é intenso na estação EFC012, a 38 km da EFCJ;
- a bacia não possui pacotes muito espessos para distâncias superiores a 38 km de ambos os lados da EFCJ;
- o alcance do ruído no cristalino ser superior à distância da EFCJ até a borda mais distante da bacia.

4.2 Comparação Entre as Técnicas de Estimativa das Funções de Transferência MT

4.2.1 Dados Utilizados

As técnicas de estimativa das funções de transferência MT (FTMT) só puderam ser aplicadas satisfatoriamente no perfil a nordeste sobre o cristalino por dois motivos:

- Foram registradas séries temporais contínuas longas o suficiente para obter-se uma estatística razoável para os dados diurnos e noturnos;
- conseguiu-se estações não afetadas pelo ruído da EFCJ, ao menos visualmente, possibilitando o uso da RR.

Como foi dito na Seção 2.4.2, é mais fácil verificar se uma estação está contaminada com o ruído de uma EFE inspecionando a série temporal dos canais elétricos. A Figura 4.6 mostra um trecho da série temporal da componente E_x do perfil nordeste cristalino. Como nas Figuras 4.2 e 4.1, a primeira hora da série temporal representa o registro típico do período noturno e a hora seguinte mostra o ruído gerado pela viagem de Pindamonhangaba para Piracuama. Por inspeção visual, as estações EFC015 e EFC016 parecem não estar contaminadas pelo ruído da EFCJ, sendo usadas como RR. Note-se também que mesmo o período em que não há movimentação de trens (das 5 h às 6 h) o sinal elétrico nas estações EFC013 e EFC014 é bem mais perturbado do que nas estações EFC015 e EFC016. Uma provável causa é a maior proximidade das estações EFC013 e EFC014 da região industrializada do Vale do Paraíba e a pouca atenuação do ruído EM ao se propagar pelas rochas cristalinas.

Outro aspecto interessante obtido neste perfil é que a componente E_y foi pouco afetada pelo ruído da EFCJ, não sendo possível identificá-la visualmente na série temporal das

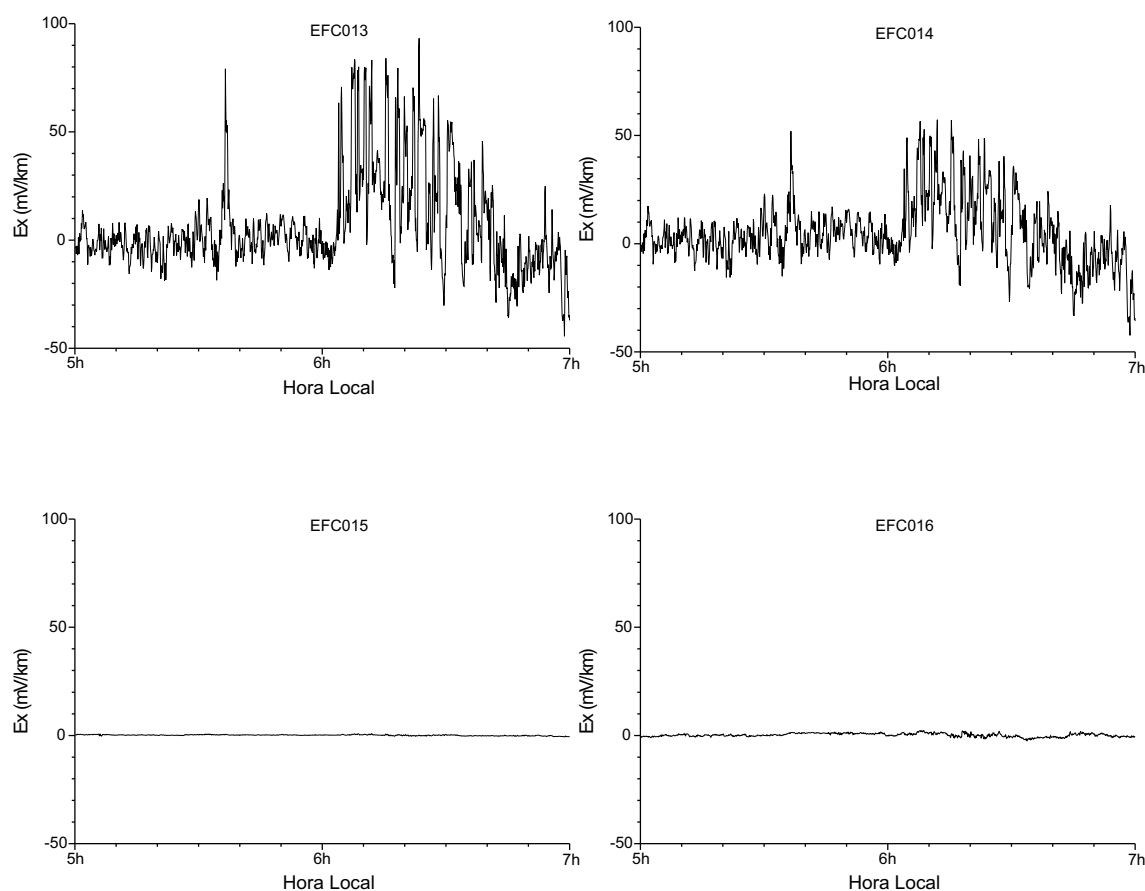


Fig. 4.6 – Série temporal da componente E_x das estações do perfil nordeste cristalino

estações EFC013 e EFC014 como mostra a Figura 4.7. Foi proposital a escolha de um perfil que fosse o mais próximo possível da linha de simetria da EFCJ (veja a Figura 3.1, página 34). Neste caso, fazendo uma aproximação grosseira na qual a EFCJ seria um dipólo elétrico aterrado na direção x , só haveria a componente E_x do campo elétrico sobre esta linha de simetria (Goldstein e Strangway, 1975). O que chama a atenção é ter-se obtido um resultado bastante próximo deste modelo simples. Nas estações a Sudoeste da EFCJ sobre o cristalino também foi observado esta diferença de intensidade entre as duas componentes, no entanto ainda era possível distinguir o ruído na componente E_y . Já nas estações sobre a bacia, o ruído da EFCJ aparece intenso em ambas as componentes, como mostra a Figura 4.2, por não estarem sobre a linha de simetria da EFCJ.

Sendo a componente E_y pouco afetada pelo ruído, espera-se que o elemento Z_{yx} da matriz de impedância, e consequentemente ρ_{yx} e ϕ_{yx} , varie pouco entre os períodos noturnos e diurnos, servindo como um parâmetro de controle da confiabilidade dos resultados obtidos.

A estação EFC013 não pode ser utilizada na análise espectral pois o cabo do canal E_x foi partido ao final do primeiro dia de coleta de dados.

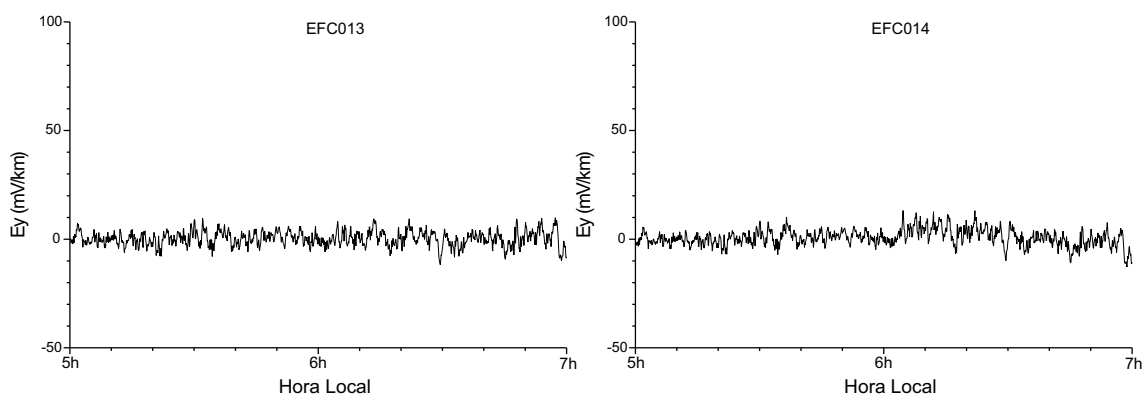


Fig. 4.7 – Série temporal da componente E_y das estações EFC013 e EFC014

4.2.2 Descrição dos Algoritmos Utilizados

Foram utilizados os algoritmos de Jones (1999), Chave (1998) e Egbert (1998) para a análise dos dados. Será feita aqui uma breve descrição destes algoritmos; maiores referências sobre estes e outros algoritmos podem ser encontradas em Jones et al. (1989).

O algoritmo de Jones utiliza o *cascade decimation* (Wight e Bostick, 1980) para calcular *ministacks* (somatória dos espectros obtidos a partir de diferentes conjuntos de dados) de 8 harmônicos discretos da transformada de Fourier (TF). Cada harmônico é removido e recolocado sucessivamente para determinar qual deles, quando removido, produz um mínimo nas variâncias da diagonal secundária da matriz de impedância, seguindo a abordagem do *jackknife* (um estimador para erro não paramétrico que é relativamente insensível a desvios da usual distribuição gaussiana implicitamente assumida nas abordagens paramétricas; Chave e Thomson, 1989). Este processo é repetido iterativamente para mais alguns harmônicos até que a variância não seja mais reduzida significativamente por rejeições adicionais. Estes *ministacks*, que possuem diferentes números de harmônicos, são novamente combinados usando a abordagem do *jackknife* para minimizar as variâncias da estimativa final dos elementos da diagonal secundária da matriz de impedância. Os erros são estimados usando uma abordagem estatística convencional assumindo que o ruído é gaussiano.

O algoritmo de Chave calcula a TF discreta e o espectro obtido é suavizado de modo a obter-se 8 estimativas por década, utilizando-se do método de mínimos quadrados para obter uma solução inicial. Estimam-se os resíduos que são comparados com o modelo gaussiano. Os resíduos que são maiores do que o esperado são ponderados para reduzir sua influência. O processo continua iterativamente até que a soma quadrática dos resíduos não mude significativamente. A abordagem do *jackknife* é utilizada para estimar os erros.

O algoritmo de Egbert calcula a TF usando uma abordagem semelhante ao *cascade decimation*. A função de transferência é estimada através de uma regressão *M-estimate* (Huber, 1981) de modo análogo ao algoritmo de Chave. Os erros são estimados usando uma abordagem assintótica padrão descrita em Egbert e Booker (1986).

Cada algoritmo tem uma abordagem diferente para estimar o erro dos elementos da matriz de impedância. No entanto, a estimativa do erro para resistividade aparente e fase a partir do erro da impedância foi padronizado neste trabalho, utilizando-se o cálculo sugerido por Stodt (1981) para a resistividade aparente e o sugerido por Gamble et al. (1979a) para a fase (maiores detalhes sobre estas estimativas podem ser vistos no Apêndice).

4.2.3 Resultados Obtidos

As Figuras 4.8 a 4.16 mostram as curvas de resistividade aparente e fase obtidas para a estação EFC014, visualmente contaminada pelo ruído da EFCJ. Cada figura é para

um conjunto de dados (dados noturnos, diurnos ou todos os dados) e para um tipo de processamento (Jones, Chave ou Egbert). Em cada figura há três conjuntos de gráficos de resistividade aparente e fase. O gráfico à esquerda é o processamento da estação local; ao centro, de RR com a estação EFC015 e à direita, de RR com a estação EFC016. Os dados noturnos (diurnos) são de 6 noites (dias) consecutivas totalizando 56 h de coleta de dados a uma taxa de amostragem de 5 s (40.320 amostragens). Note-se que os dados noturnos e diurnos foram escolhidos de modo que tivessem o mesmo número de amostragens, evitando assim que este parâmetro pudesse produzir diferenças entre um conjunto de dados e outro. Todos os dados referem-se a 140 h 30 min de coleta de dados contínua, também a uma taxa de 5 s (101.160 amostragens). A direção xy (yx) refere-se à resistividade aparente e fase calculadas a partir do elemento xy (yx) do tensor de impedância. Em um caso bidimensional ideal em que os campos elétrico e magnético foram medidos nas direções paralela e perpendicular à falha direcional, estes elementos dos tensores são dados por:

$$Z_{xy} = \frac{E_x}{H_y} \quad Z_{yx} = \frac{E_y}{H_x}$$

Os resultados obtidos dos dados noturnos com o algoritmo de Jones (Figura 4.8) são todos perturbados na direção xy , incluindo uma região em torno de 200 s na qual o processamento utilizado não produz dados. O melhor resultado nessa direção é fornecido pela técnica de RR usando a estação EFC016 como referência, mas mesmo ela apresenta grandes desvios em períodos próximos a 100 s e a ausência de dados anteriormente referida para os períodos próximos a 200 s. O resultado pode ser atribuído à fraca intensidade do sinal natural durante a noite na região de baixa latitude geomagnética do país. Haveria necessidade de uma maior estatística (maior tempo de aquisição de dados) ou uma amplitude maior na atividade geomagnética natural durante o período em que os dados foram coletados. Por outro lado, a direção yx fornece sempre o mesmo resultado, independentemente da técnica utilizada. Para os dados diurnos com o algoritmo de Jones (Figura 4.9) têm-se uma grande perturbação em todos os resultados. Nenhuma das técnicas utilizadas (estação local ou referência remota) consegue reproduzir os resultados noturnos (Figura 4.8). A análise de todos os dados com o algoritmo de Jones (Figura 4.10) obteve resultados mais próximos aos noturnos. O aumento da estatística faz com que se consiga inclusive obter dados em torno de 200 s. O melhor resultado é obtido usando a estação EFC016 como referência. O uso da EFC015 como referência fez aparecer perturbações em períodos abaixo de 100 s, uma possível indicação de que a EFC015 também possa estar contaminada por ruídos da EFCJ. Segundo Egbert et al. (2000), é por volta desses períodos que os ruídos de uma EFE são mais fortes.

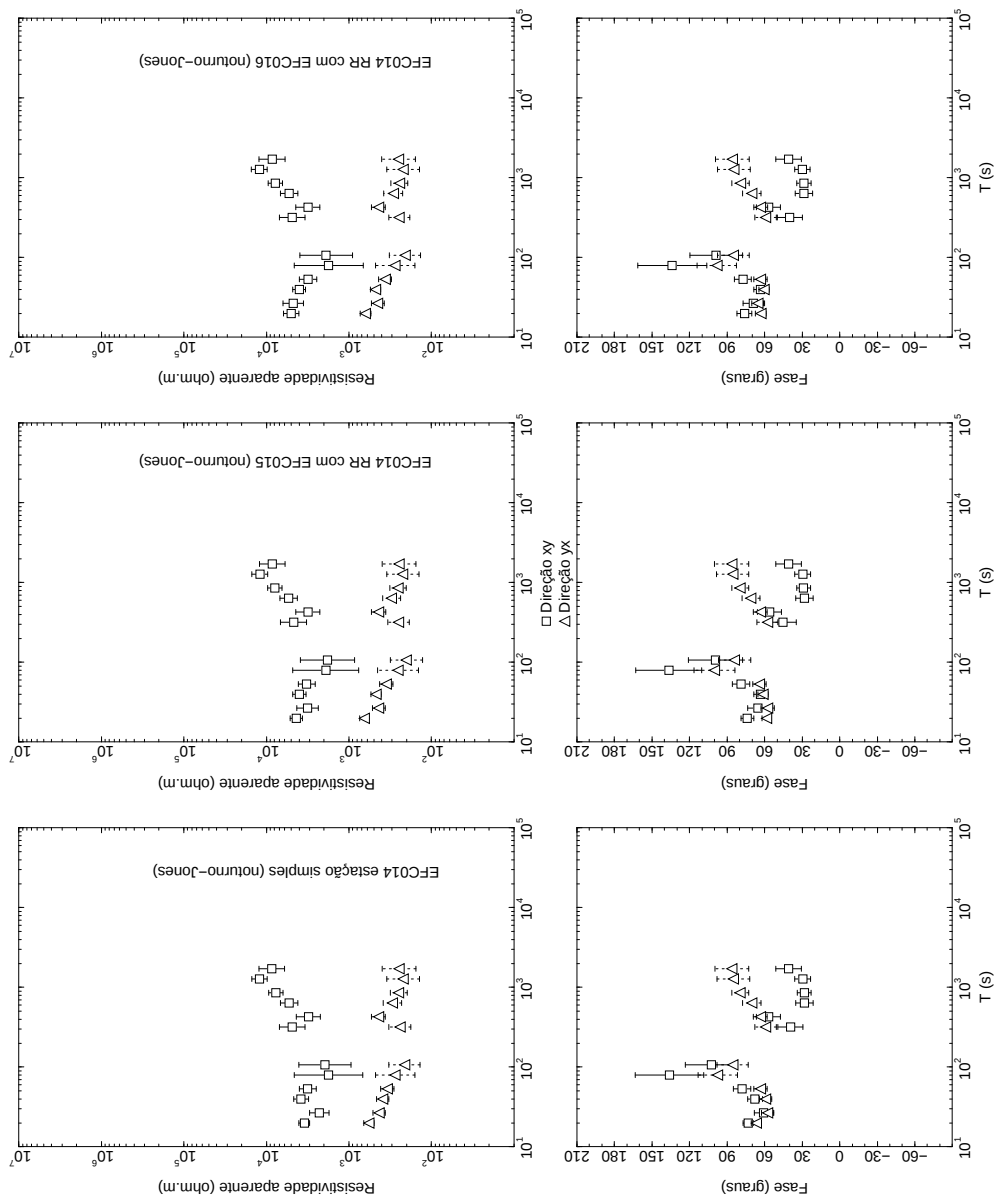


Fig. 4.8 — Resistividade aparente e fase para os dados noturnos da estação EFC014 utilizando o algoritmo de Jones.

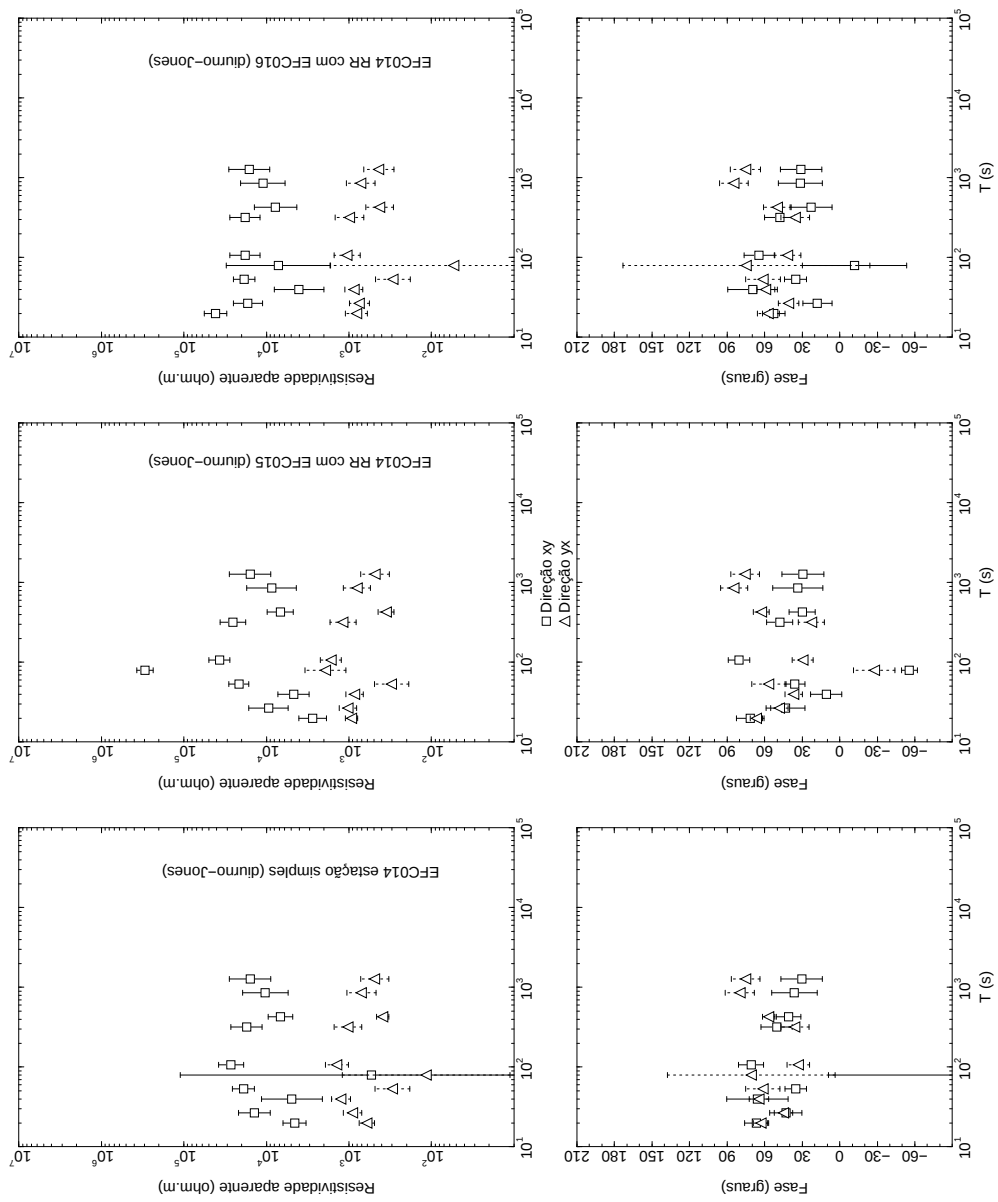


Fig. 4.9 – Resistividade aparente e fase para os dados diurnos da estação EFC014 utilizando o algoritmo de Jones.

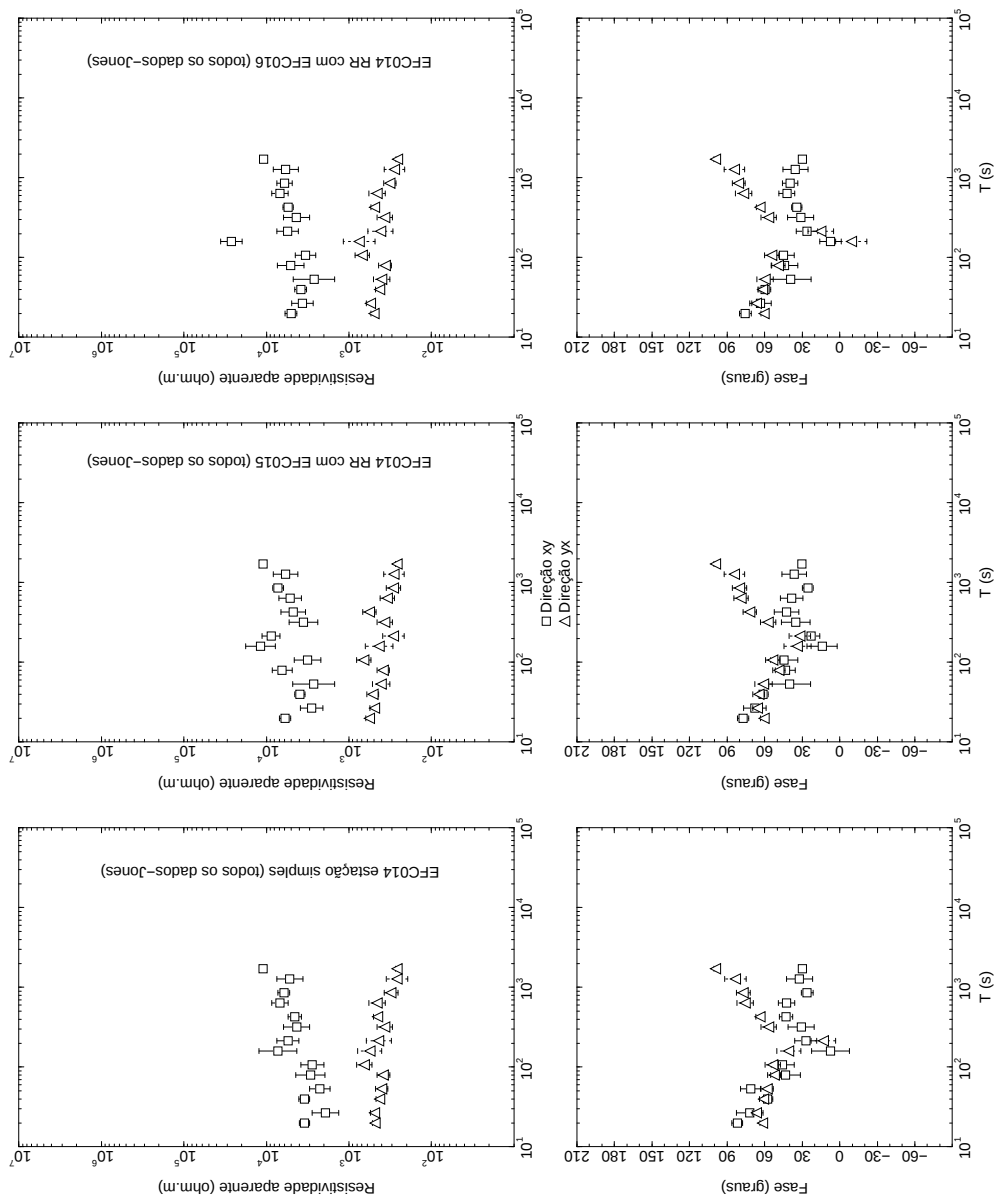


Fig. 4.10 — Resistividade aparente e fase para todos os dados da estação EFC014 utilizando o algoritmo de Jones.

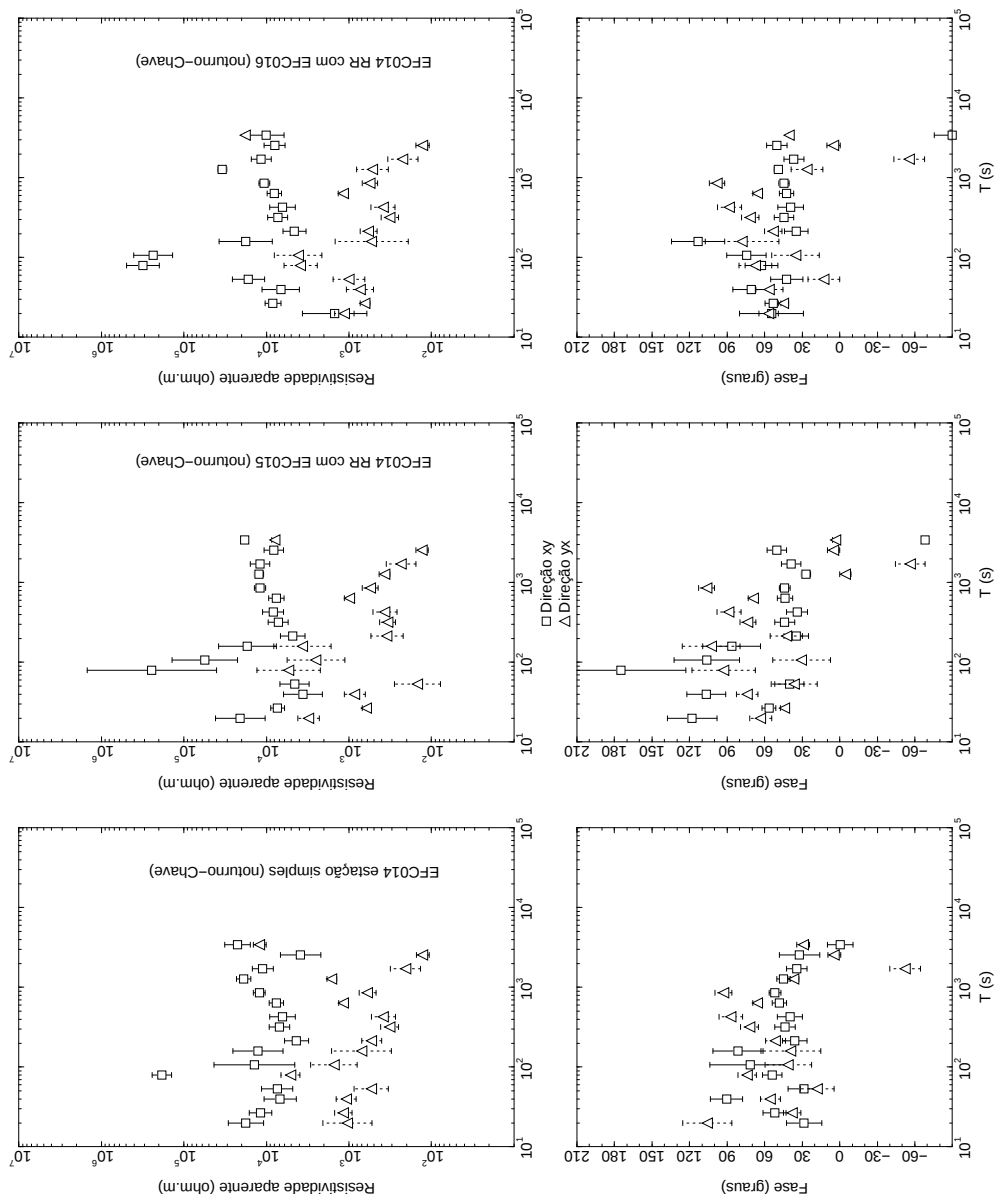


Fig. 4.11 — Resistividade aparente e fase para os dados noturnos da estação EFC014 utilizando o algoritmo de Chave.

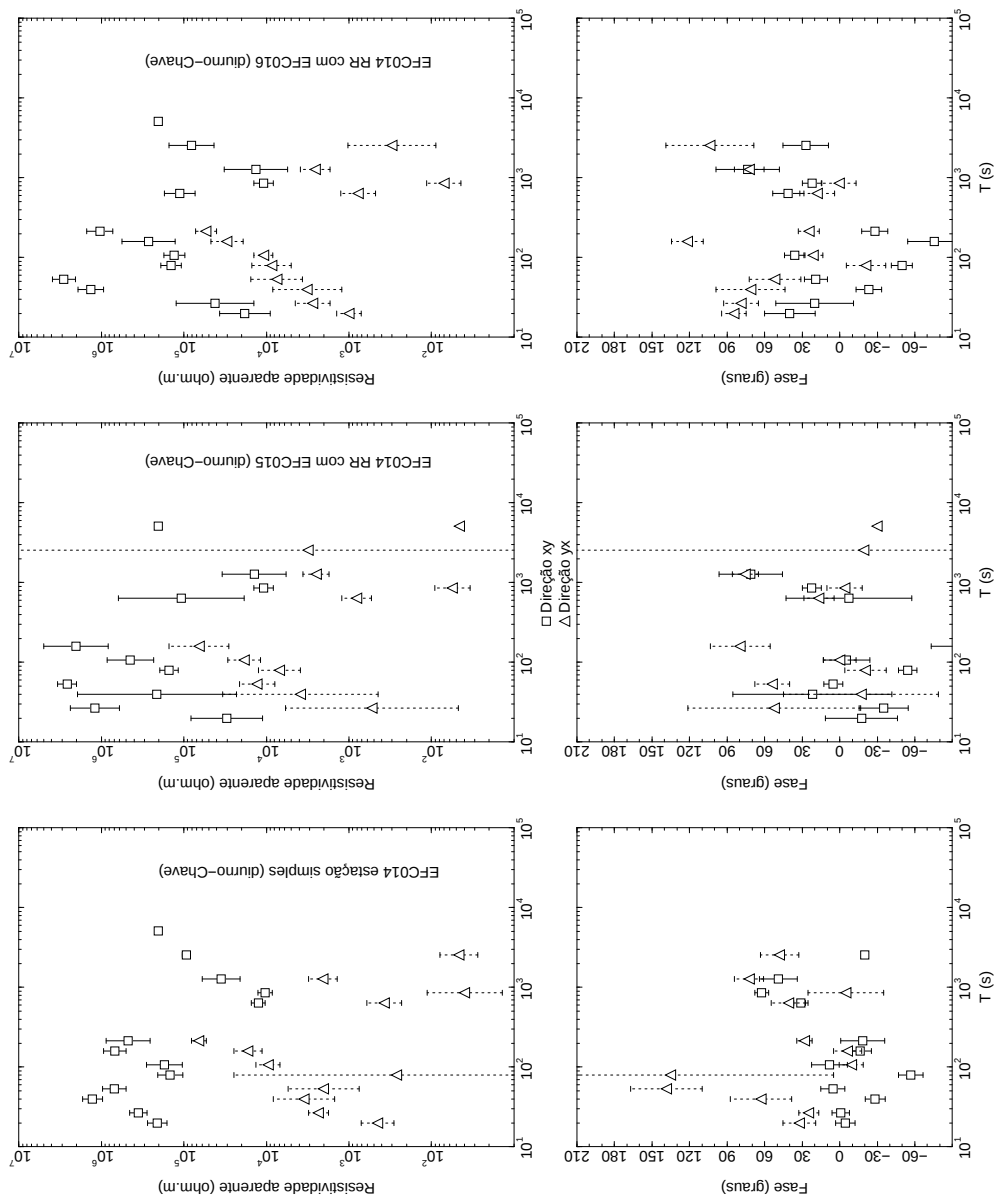


Fig. 4.12 – Resistividade aparente e fase para os dados diurnos da estação EFC014 utilizando o algoritmo de Chave.

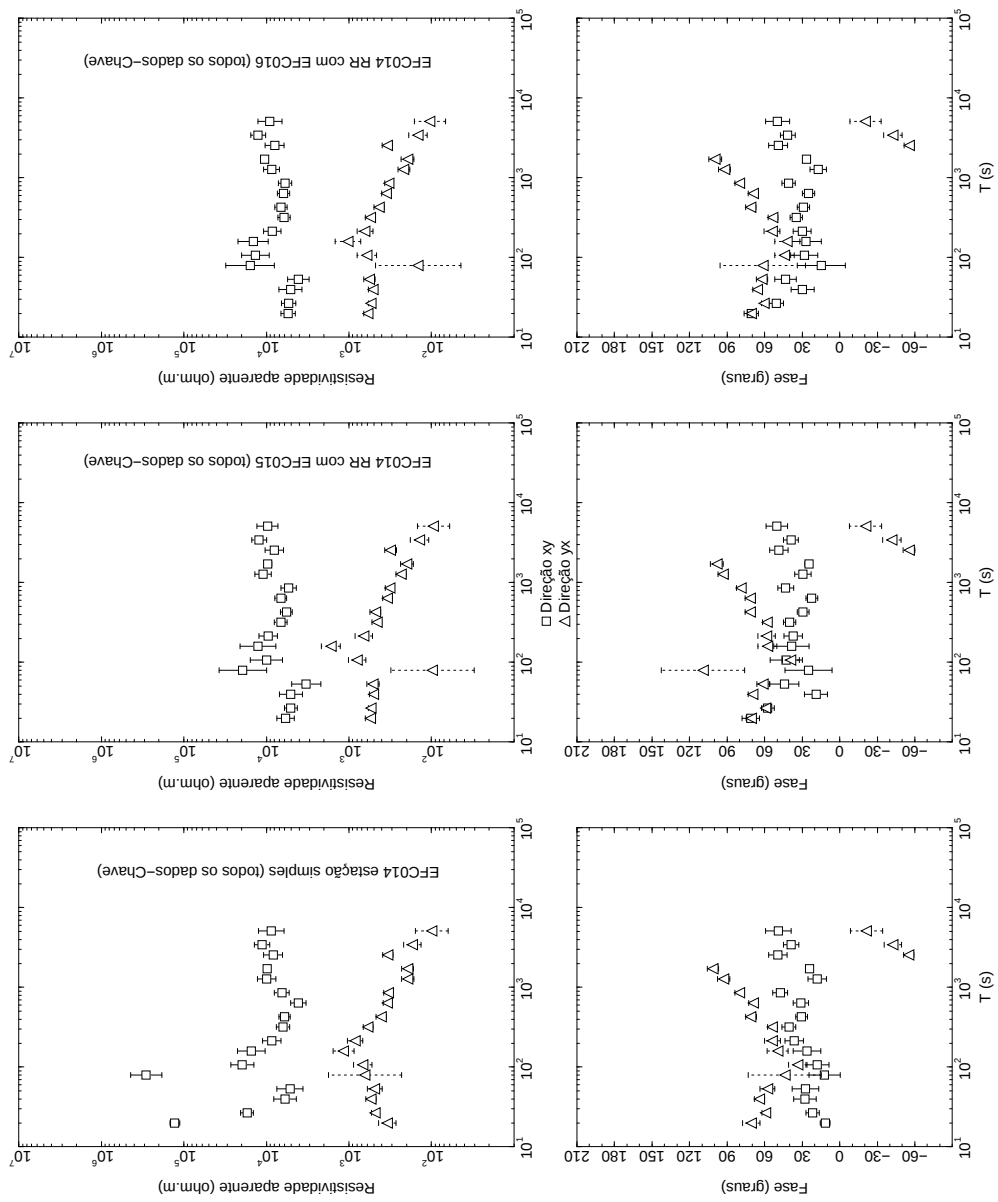


Fig. 4.13 – Resistividade aparente e fase para todos os dados da estação EFC014 utilizando o algoritmo de Chave.

Os resultados dos dados noturnos usando o algoritmo de Chave (Figura 4.11) são de pior qualidade que aqueles obtidos de Jones para dados similares. Há grandes barras de erros e os dados estão muito espalhados. O processamento efetuado com esse mesmo algoritmo para dados de melhor qualidade (estação EFC016) mostrou que ele fornece resultados adequados, tão bons quanto os obtidos dos outros algoritmos, o que em princípio descartaria qualquer problema na implementação do algoritmo. De qualquer forma, outros testes deveriam ser feitos para verificar se o problema é realmente do algoritmo ou de uma utilização incorreta do mesmo. A Figura 4.12 mostra os resultados da análise dos dados diurnos com o algoritmo de Chave e são os piores resultados obtidos nesta análise. Todos os dados parecem perturbados. Os melhores resultados obtidos com o algoritmo de Chave são da análise de todos os dados (Figura 4.13), mostrando que a quantidade de dados é extremamente importante nesse caso. O melhor resultado é aquele usando a estação EFC016 como referência, que nesse caso se aproxima daquele obtido do algoritmo de Jones.

Os dados noturnos com o algoritmo de Egbert (Figura 4.14) fornecem os melhores resultados de todas as técnicas utilizadas considerando esse subconjunto de dados. Os resultados mostram pouca dispersão e pequenas barras de erros. Observa-se apenas uma diferença importante entre a técnica de estação simples e as de referência remota nos períodos curtos, quando a técnica de referência remota tende a fornecer valores de resistividade aparente um pouco mais altos. Coincidentemente essa discrepância foi sempre observada entre os métodos de estação simples e referência remota para os diferentes algoritmos (comparar por exemplo os resultados de Jones na Figura 4.8). Mesmo para a situação extrema dos dados diurnos (Figura 4.15), o algoritmo de Egbert consegue recuperar o formato das curvas, comprovando sua eficiência. Novamente são observadas diferenças em períodos curtos entre as técnicas de estação simples e referência remota. Também o uso da estação EFC015 como referência remota fornece resultados piores nos menores períodos, novamente uma possível indicação de que a EFC015 deve estar contaminada com os ruídos da EFCJ. Os resultados de todos os dados com o algoritmo de Egbert (Figura 4.16), analogamente ao caso de Jones, aproximam-se bastante daqueles obtidos durante a noite. As mesmas observações sobre as diferenças entre os métodos de estação simples e de referência remota para os períodos curtos e a perturbação gerada pela estação EFC015 também em períodos curtos permanecem válidas.

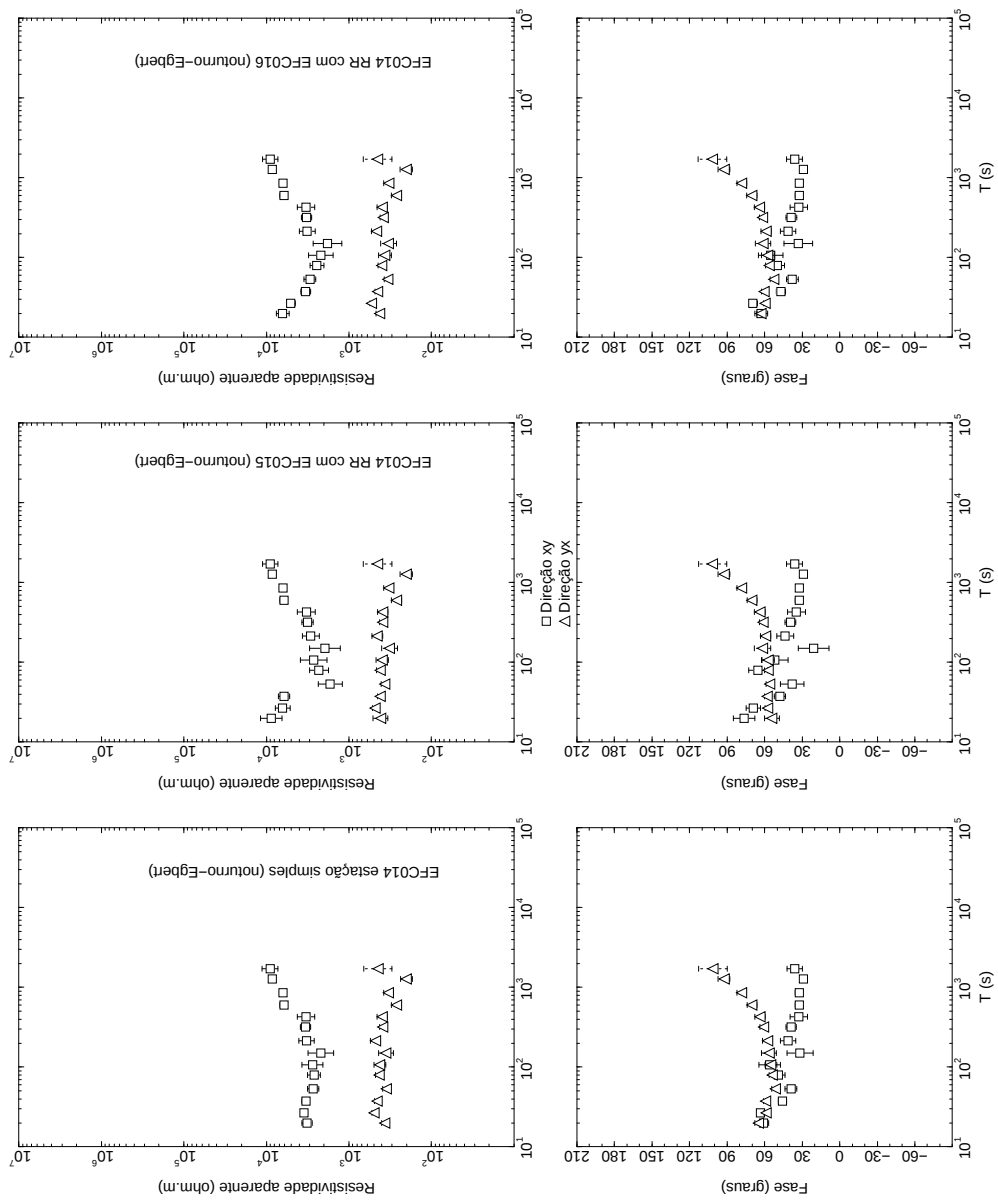


Fig. 4.14 — Resistividade aparente e fase para os dados noturnos da estação EFC014 utilizando o algoritmo de Egbert.

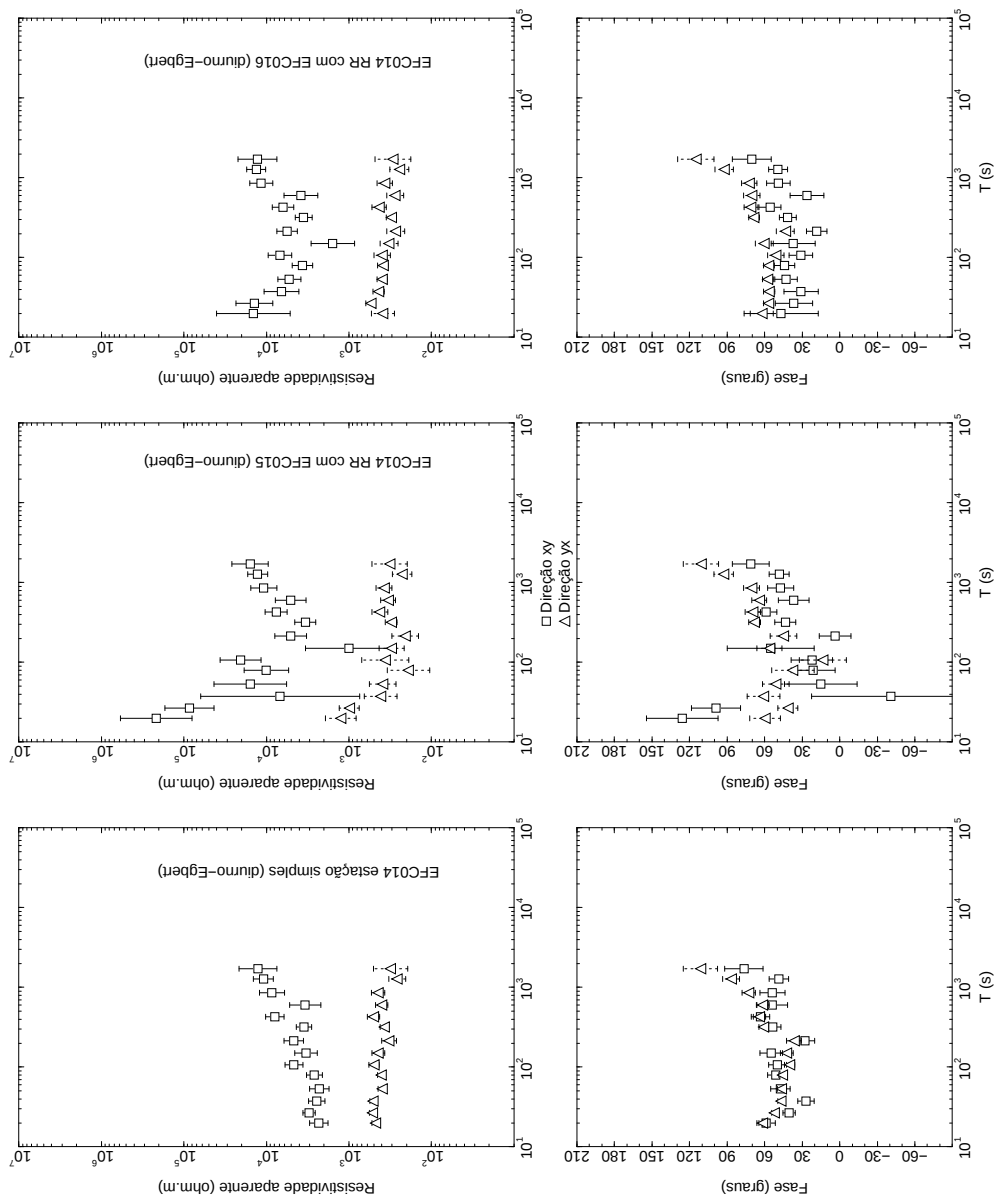


Fig. 4.15 – Resistividade aparente e fase para os dados diurnos da estação EFC014 utilizando o algoritmo de Egbert.

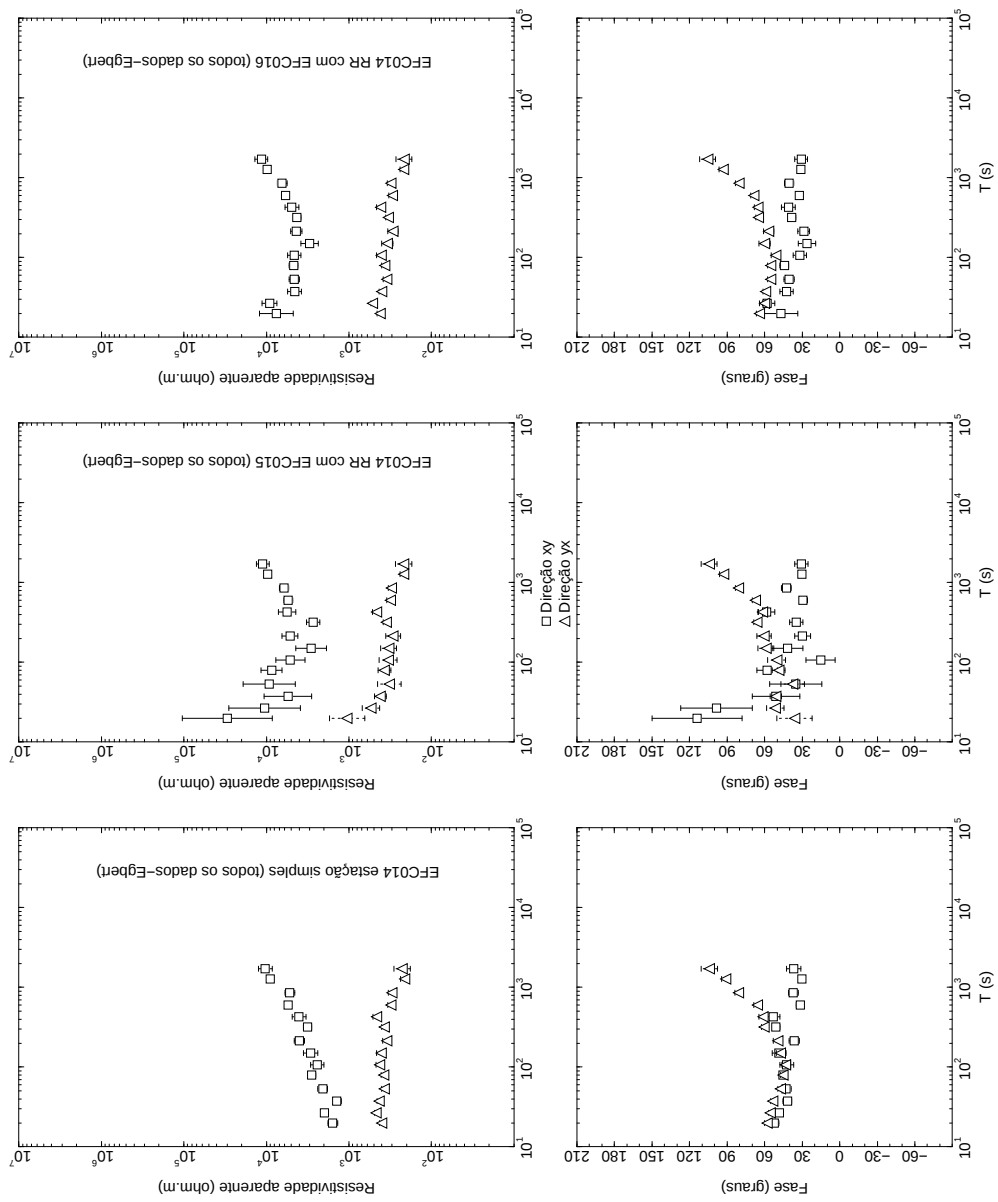


Fig. 4.16 — Resistividade aparente e fase para todos os dados da estação EFC014 utilizando o algoritmo de Egbert.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O ruído da EFCJ tem um alcance estimado entre 126,0 e 144,9 km no cristalino. Seu comportamento sobre a bacia está correlacionado com a espessura do pacote sedimentar, indicando a possibilidade de utilizá-lo como uma fonte de sinal para exploração geofísica. A análise dos dados diurnos mostra que o ruído perturba bastante os resultados. No entanto, esta perturbação não aparece como o esperado para uma fonte próxima (curva de resistividade aparente em escala logarítmica com 45° de elevação e fase em 0° ; [Qian e Pedersen, 1991](#)). Isso indica que a estação mais detalhadamente aqui analisada (EFC014) deve estar na faixa intermediária da fonte do ruído, entre 1/2 e 3 espessuras peliculares.

Uma avaliação qualitativa dos resultados obtidos mostra que o algoritmo de Egbert produz melhores resultados. Mesmo para os dados diurnos foi possível obter respostas razoavelmente suaves e próximas dos resultados obtidos dos dados noturnos, especialmente para a direção yx que foi pouco afetada pelo ruído. Ao contrário, os dados obtidos pelo algoritmo de Chave são bastante espalhados, exceto quando todos os dados são analisados e a estação EFC016 é usada como referência. As respostas obtidas pelo algoritmo de Jones para os dados noturnos e todos os dados são suaves e praticamente com os mesmos valores. Já para os dados diurnos, eles são muito dispersos, impossibilitando qualquer interpretação geofísica. Note-se ainda que os resultados obtidos pelo algoritmo de Jones e Chave são bastante irregulares em torno de 200 s.

Considerando os resultados gerados pelo algoritmo de Egbert, aquele que mostrou melhor desempenho na análise dos dados, tem-se:

- a) para a estação local, o melhor resultado foi obtido para os dados noturnos, o pior para os dados diurnos, e todos os dados são quase tão bons quanto aos noturnos. Era esperado que os dados noturnos fossem melhores que os diurnos, o que chama a atenção é que a resposta dos dados diurnos seja próxima da resposta dos dados noturnos, apesar de serem mais espalhadas e com barras de erro maiores. Com isto, vê-se que o algoritmo de Egbert consegue extrair parâmetros MT razoáveis destes dados, embora não elimine totalmente o ruído da EFCJ. O fato que o resultado obtido com todos os dados ser tão bom quanto o noturno reforça esta conclusão;
- b) para a RR com a estação EFC015, novamente o melhor resultado foi obtido

para os dados noturnos. No entanto, este resultado está mais espalhado do que o obtido para os mesmos dados para estação local. Isto indica que os dados da estação EFC015 provavelmente estão perturbados por algum outro tipo de ruído, mesmo no período noturno. Para os dados diurnos, o espalhamento e as barras de erro aumentam muito, sendo bem pior do que o resultado obtido pela estação local para os mesmos dados. Este resultado indica que a estação EFC015 ainda pode estar afetada pelo ruído da EFCJ. O resultado obtido de todos os dados confirma esta suspeita, pois mesmo com o aumento do número de dados, a resposta obtida é bastante perturbada. Como foi dito na Seção 2.3.2, a RR assume que os ruídos entre os canais das estações devem ser aleatórios e independentes. Portanto, a presença de um ruído bastante coerente (ruído da EFCJ) pode explicar a resposta de baixa qualidade obtida pelo algoritmo de Egbert usando a estação EFC015 como RR. Em um trabalho recentemente publicado, [Egbert et al. \(2000\)](#) mostraram que uma estação MT situada a 150 km de distância de uma EFE estava contaminada pelo ruído na faixa de períodos de 10 a 30 s. Os resultados aqui apresentados também estão fortemente perturbados em torno desta faixa, reforçando a hipótese da contaminação pela EFCJ;

- c) o comportamento da resposta obtida por RR com a estação EFC016 em relação aos dados analisados é de modo geral melhor que o obtido para a estação local, embora com características semelhantes: os dados diurnos são mais perturbados que os noturnos e a resposta de todos os dados é semelhante aos dados noturnos.

Comparando os resultados obtidos com o algoritmo de Egbert usando a estação EFC016 como referência, vê-se que em torno de 150 s a resistividade aparente na direção xy dos dados noturnos está deslocada para baixo em relação a todos os dados. Este comportamento também é observado para os resultados obtidos pelo algoritmo de Jones e pode estar relacionado com a fraca intensidade do sinal magnético noturno para baixas latitudes geomagnéticas (as micropulsações Pc4, com uma faixa de período entre 45 e 150 s, ocorrem principalmente em períodos diurnos; [Jacobs, 1970](#)). Com o aumento do número de dados analisados o algoritmo de Egbert conseguiu uma resposta suave para esta faixa de frequência.

Por fim, espera-se que este trabalho sirva de base para o desenvolvimento de outros estudos, especialmente em relação a utilização do ruído da EFCJ como fonte de sinal para

exploração geofísica. Essa possibilidade não foi aqui abordada por não estar diretamente ligada aos objetivos propostos. Para cumprir esse objetivo, será necessário primeiro estabelecer melhor as propriedades deste ruído. Os dados obtidos sobre a bacia e a nordeste da EFCJ sobre o cristalino parecem bastante adequados para isto, pois o primeiro é bastante afetado pela geologia da região e o segundo está próximo de uma linha de simetria da fonte. Possivelmente as melhores abordagens para modelar este ruído são as apresentadas por [Fontes \(1988\)](#) e [Qian e Boerner \(1994\)](#).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bendat, J. S.; Piersol, A. G. **Random data: analysis and measurement procedures**. New York: Wiley-Interscience, 1971. 407 p.
- Brito, P. M. A. **Sondagens magnetotélúricas transversais a Bacia de Taubaté**. São José dos Campos. 106 p. Dissertação (mestrado em geofísica espacial) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1998.
- Cagniard, L. Basic theory of the magneto-telluric method of geophysical prospecting. **Geophysics**, v. 18, n. 3, p. 605–635, 1953.
- Chaize, L.; Lavergne, M. Signal et bruit en magnétolellurique. **Geophysical Prospecting**, v. 18, p. 64–87, 1970.
- Chave, A. D. **MTIPS: Robust remote-reference MT (rrrmt): version 9**. [programa de computador on line]. <<http://www.whoiedu/julie/MTIPS>>, Nov. 1998.
- Chave, A. D.; Thomson, D. J. Some comments on magnetotelluric response function estimation. **Journal of Geophysical Research**, v. 94, n. B10, p. 14215–14225, Oct. 1989.
- Chave, A. D.; Thomson, D. J.; Ander, M. E. On the robust estimation of power spectra, coherences, and transfer functions. **Journal of Geophysical Research**, v. 92, n. B1, p. 633–648, Jan. 1987.
- Dmitriev, V. I.; Berdichevsky, M. N. The fundamental model of magnetotelluric sounding. **Proceedings of the IEEE**, v. 67, n. 7, p. 1034–1044, July 1979.
- Dupouy, G. Perturbation du champ magnétique terrestre et des courants telluriques par les chemins de fer électrifiés. **Annales de Geophysique**, v. 6, p. 18–50, 1950.
- Egbert, G. **Gary egbert's codes**. [programa de computador on line]. <<ftp://ftp.oce.orst.edu/dist/egbert/EMTF/EMTF.tar.Z>>, Nov. 1998.
- Egbert, G. D.; Booker, J. R. Robust estimation of geomagnetic transfer functions. **Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society**, v. 87, n. 1, p. 173–194, Oct. 1986.
- Egbert, G. D.; Eisel, M.; Boyd, O. S.; Morrison, H. F. DC trains and Pc3s: source effects in mid-latitude geomagnetic transfer functions. **Geophysical Research Letters**, v. 27, n. 1, p. 25, Jan. 2000.

- Fischer, G.; Schnegg, P. A.; Peguiron, M.; Le Quang, B. V. An analytic one-dimensional magnetotelluric inversion scheme. **Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society**, v. 67, n. 2, p. 257–278, Nov. 1981.
- Fontes, S. L. **Electromagnetic induction studies in the Italian Alps**. Edinburgh. 351 p. Thesis (Phd in Geophysics) – University of Edinburgh, 1988.
- Fournier, H. G.; Febrer, J. Gaussian character of the distribution of magnetotelluric results working in log-space. **Physics of the Earth and Planetary Interiors**, v. 12, p. 359–364, 1976.
- Fraser, B. J.; Ellyett, C. D. Man-made magnetic micropulsations. **Journal of Geophysical Research**, v. 69, n. 17, p. 3603–3606, Sep. 1964.
- Gamble, T. D.; Goubau, W. M.; Clarke, J. Error analysis for remote reference magnetotellurics. **Geophysics**, v. 44, p. 959–968, 1979a.
- Magnetotellurics with a remote magnetic reference. **Geophysics**, v. 44, n. 1, p. 53–68, Jan. 1979b.
- Gamble, T. D.; Goubau, W. M.; Miracky, R.; Clarke, J. Magnetotelluric regional strike. **Geophysics**, v. 47, n. 6, p. 932–937, June 1982.
- Goldstein, M. A.; Strangway, D. W. Audio-frequency magnetotellurics with a grounded electric dipole source. **Geophysics**, v. 40, n. 04, p. 669–683, Apr. 1975.
- Huber, P. J. **Robust statistics**. New York: John Wiley, 1981. 320 p.
- Jacobs, J. A. **Geomagnetic micropulsations**. Berlin: Springer-Verlag, 1970. 179 p.
- Jones, A. G. **LIMS codes**: Version 4.2. [programa de computador on line]. <http://www.cg.nrcan.gc.ca/staff/jones/progs/lims/lims_v42.tar.Z>, Mar. 1999.
- Jones, A. G.; Chave, A. D.; Egbert, G.; Auld, D.; Bahr, K. A comparison of techniques for magnetotelluric response function estimation. **Journal of Geophysical Research**, v. 94, n. B10, p. 14201–14213, Oct. 1989.
- Jones, F. W.; Kelly, A. M. Man-made telluric micropulsations. **Canadian Journal of Physics**, v. 44, n. 12, p. 3025–3031, Dec. 1966.
- Junge, A. Characterization of and correction for cultural noise. **Surveys in Geophysics**, v. 17, p. 361–391, 1996.

- Kaufman, A. A.; Keller, G. V. **The magnetotelluric sounding method.** Amsterdam: Elsevier Scientific, 1981. 595 p.
- Kovalevskiy, I. V.; Mikerina, N. V.; Novysh, V. V. Gorodnicheva, O. P. Distribution of the earth currents from an electrified railroad in the southern Urals. **Geomagnetism and Aeronomy**, v. 1, n. 5, p. 723–726, 1961.
- Larsen, J. C. Transfer functions: smooth robust estimates by least-squares and remote reference methods. **Geophysical Journal International**, v. 99, n. 3, p. 645–663, Dec. 1989.
- Macnae, J. C.; Lamontagne, Y.; West, G. F. Noise processing techniques for time-domain EM systems. **Geophysics**, v. 49, n. 7, p. 934–948, July 1984.
- Madden, T.; Nelson, P. **A defense of Cagniard's magnetotelluric method.** Geophysics Laboratory, Cambridge, 1964. (Project NR-371-401, M.I.T.).
- Marques, A. Evolução tectono-sedimentar e perspectivas exploratórias da Bacia de Taubaté, São Paulo, Brasil. **Boletim de Geociências da Petrobrás**, v. 4, n. 3, p. 253–262, jul.–set. 1990.
- Mikerina, N. V. The study of interference at the Voyeykovo magnetic observatory. **Geomagnetism and Aeronomy**, v. 2, n. 6, p. 941–944, 1962.
- Padilha, A. L.; Trivedi, N. B.; Vitorello, Í.; da Costa, J. M. Geophysical constraints on tectonic models of the Taubaté Basin, southeastern Brazil. **Tectonophysics**, v. 196, p. 157–172, Mar. 1991.
- Price, A. T. The theory of magnetotelluric methods when the source field is considered. **Journal of Geophysical Research**, v. 67, n. 5, p. 1907–1918, 1962.
- Projeto Radambrasil. **Rio de Janeiro/Vitória:SF-23/24.** Rio de Janeiro, 1983. Levantamento de Recursos Naturais, v. 32 (Mapa Geológico. Escala 1:1.000.000).
- Qian, W.; Boerner, D. E. Electromagnetic response of a discretely grounded circuit – an integral equation solution. **Geophysics**, v. 59, n. 11, p. 1680–1694, Nov. 1994.
- Qian, W.; Pedersen, L. B. Industrial interference magnetotellurics: an example from the Tangshan area, China. **Geophysics**, v. 56, n. 2, p. 265–273, Feb. 1991.

- Sims, W. E.; Bostick Jr., F. X.; Smith, H. W. The estimation of magnetotelluric impedance tensor elements from measured data. **Geophysics**, v. 36, p. 938–942, 1971.
- Stodt, J. **Algorithms for magnetotelluric calculations in the frequency domain**. Denver: Phoenix Geophysics, 1981. (GTH.R 159).
- Szarka, L. Geophysics aspects of man-made electromagnetic noise in the earth: a review. **Surveys in Geophysics**, v. 9, p. 287–318, 1988.
- Tikhonov, A. N. On determining electrical characteristics of the deep layers of the Earth's crust. **Doklady Akad. Nauk SSSR**, v. 73, n. 2, p. 295–297, 1950.
- Wait, J. R. On the relation between telluric currents and the Earth's magnetic field. **Geophysics**, v. 19, p. 281–289, 1954.
- Wight, D. E.; Bostick, F. X. Cascade decimation – a technique for real time estimation of power spectra. In: IEEE International Conference on Acoustic Speech and Signal Processing, Denver, 1980. **Proceedings**. Piscataway: IEEE, 1980. p. 626–629.
- Yanagihara, K. Magnetic field disturbance produced by electric railway. **Memoirs of the Kakioka Magnetic Observatory**, v. 38, n. 1, p. 17–34, Mar. 1977.

APÊNDICE A

CÁLCULO DAS BARRAS DE ERRO PARA OS PARÂMETROS MT

Como visto no Capítulo 2, há uma vasta literatura sobre a estimação das funções de transferência no método MT e de suas respectivas variâncias. No entanto, pouco se discute sobre o cálculo dos erros para os parâmetros MT, como resistividade aparente e fase. Para se fazer a comparação entre os algoritmos utilizados na estimativa das funções de transferência, deve-se padronizar o cálculo dos erros destes parâmetros. Para justificar o algoritmo selecionado, será feita uma revisão sobre os métodos encontrados e uma comparação entre eles.

A.1 Erro da Resistividade Aparente

A maneira mais usual de estimar o erro de uma grandeza, cujo valor depende de outras grandezas de variâncias conhecidas, é a propagação de erro. Ela pode ser enunciada da seguinte forma.

Dada uma função f de n variáveis:

$$f = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \quad (\text{A.1})$$

onde $x_i; i = 1, 2, 3, \dots, n$; são variáveis independentes entre si.

A variância da função f é dada por:

$$\sigma_f^2 = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 \sigma_{x_i}^2 \quad (\text{A.2})$$

onde $\sigma_{x_i}^2$ é a variância da i -ésima variável.

A função f de interesse é a resistividade aparente dada por:

$$\rho = 0.2T|Z|^2 \quad (\text{A.3})$$

onde,

ρ = resistividade aparente (Ω m);

T = período (s);

Z = impedância ($\text{mV km}^{-1} \text{ nT}^{-1}$);

O erro no período é desprezível comparado com o da impedância e portanto apenas o erro da impedância será levado em conta. As variâncias da parte real e imaginária de Z são iguais e dadas por (Gamble et al., 1979a):

$$\sigma_{\Re Z}^2 = \sigma_{\Im Z}^2 = \frac{\sigma_Z^2}{2} \quad (\text{A.4})$$

onde σ_Z^2 é a variância de Z .

Então, aplicando a Equação (A.2) na Equação (A.3) tem-se:

$$\sigma_\rho = 0.2\sqrt{2} \ T|Z|\sigma_Z \quad (\text{A.5})$$

Esta estimativa do erro da resistividade aparente é usada por Gamble et al. (1979a), Chave e Thomson (1989) e Egbert (1998). Esta estimativa de erro será doravante referenciada como erro Gamble por ser a mais antiga referência encontrada.

No entanto, o erro estimado pela Equação (A.5) assume que ρ segue uma distribuição gaussiana, o que normalmente não ocorre. Contudo, isto não invalida a equação, pois todas as distribuições de probabilidade aproximam-se da gaussiana para erros pequenos.

Por outro lado, Fournier e Febrer (1976) mostraram que a resistividade aparente segue uma distribuição gaussiana no espaço logarítmico e, neste caso, a propagação de erro pode ser usada sem restrições. Aplicando o $\log$ à Equação (A.3) tem-se:

$$\log \rho = \log(0.2T) + \log |Z|^2 \quad (\text{A.6})$$

Aplicando a propagação de erro, obtém-se:

$$\sigma_{\log \rho} = \sqrt{2} \ \log(e) \frac{\sigma_Z}{|Z|} \quad (\text{A.7})$$

Esta estimativa de erro na resistividade aparente é usada por Stodt (1981) e doravante será referenciada como erro Stodt.

Jones (1999) estima os valores da resistividade aparente máxima e mínima somando ou subtraindo à impedância um erro complexo dado por:

$$\tilde{\sigma}_Z = \sigma_Z e^{i\phi} \quad (\text{A.8})$$

onde ϕ é a fase de Z e $\tilde{\sigma}$ indica o erro complexo.

Aplicando $Z_{\text{máx}}^{\text{mín}} = (Z \pm \tilde{\sigma}_Z)$ na Equação (A.3) obtém-se a expressão a ser chamada de erro Jones:

$$\begin{aligned} \rho_{\text{máx}}^{\text{mín}} &= 0.2T \left| |Z| e^{i\phi} \pm \sigma_Z e^{i\phi} \right|^2 \\ &= 0.2T (|Z| \pm \sigma_Z)^2 \end{aligned} \quad (\text{A.9})$$

Pode-se ainda estimar o erro da resistividade aparente a partir do erro da fase, através de uma equiparação das escalas da resistividade e fase. Vai-se mostrar aqui que este método equivale ao erro estimado por Stodt (1981). Fischer et al. (1981), ao tratar do problema da inversão, mostraram que a escala do espaço da resistividade aparente está relacionada com a escala da fase por:

$$\log \rho \Rightarrow 2 \log(e) \phi \quad (\text{A.10})$$

onde ϕ é dado em radianos.

Então $\sigma_{\log \rho}$ equivale a $2 \log(e) \sigma_\phi$. Como será visto na próxima seção, σ_ϕ é igual a $\sigma_Z / \sqrt{2} |Z|$ quando calculado usando a propagação de erros, o que resulta em um erro na resistividade aparente igual ao calculado pela Equação (A.7).

Para comparar os três métodos, calculou-se $\rho_{\text{máx}}$ e $\rho_{\text{mín}}$ normalizados por ρ em função de $\sigma_Z / |Z|$, ou seja, do erro relativo da impedância. Considera-se o meio um semi-espaço infinito homogêneo de resistividade ρ . Os resultados obtidos são apresentados na Figura A.1.

Vê-se que $\rho_{\text{máx}}$ e $\rho_{\text{mín}}$ estimados pelo erro Stodt são simétricos; isto ocorre porque este método calcula $\sigma_{\log \rho}$ ao invés de σ_ρ . Para um erro relativo da impedância ($\sigma_Z / |Z|$) inferior a 20%, os três métodos são praticamente equivalentes. Para erros relativos maiores, $\rho_{\text{mín}}$ estimado por Gamble decai rapidamente até que $\sigma_Z / |Z|$ atinge 70%. A partir deste ponto $\rho_{\text{mín}}$ tem valores negativos, que não podem ser plotados em escala logarítmica nem possuem significado físico. Embora de modo menos acentuado, o $\rho_{\text{mín}}$ estimado por Jones

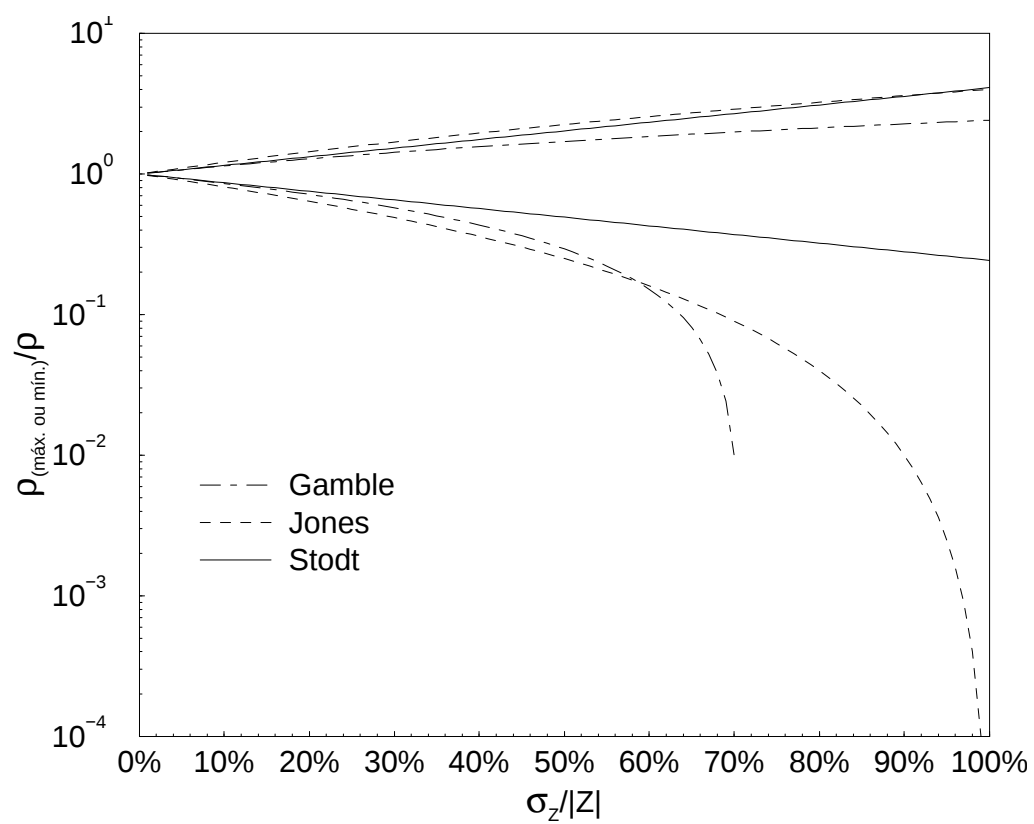


Fig. A.1 – Comparação entre os erros de resistividade aparente estimados pelo erro Gamble, Stodt e Jones em função de $\sigma_z/|Z|$.

também decai rapidamente. No entanto, esse erro possui um comportamento estranho para erros muito grandes. Pode-se mostrar que $\rho_{\min}$ começa a aumentar quando $\sigma_Z > \sqrt{2} |Z|$ e alcança valores superiores ao de ρ quando $\sigma_Z > 2\sqrt{2} |Z|$. É certo que dados com erros tão grandes devem ser eliminados antes de futuras análises. No entanto, na análise inicial, convém que mesmo estes erros enormes sejam tratados da mesma maneira dos outros, pois facilita a automatização desta análise.

A.2 Erro da Fase

A fase da impedância Z é dada por:

$$\phi = \arctan \left(\frac{\Im Z}{\Re Z} \right) \quad (\text{A.11})$$

Aplicando a propagação de erro, obtemos:

$$\sigma_\phi = \frac{\sigma_Z}{\sqrt{2} |Z|} \quad (\text{A.12})$$

Esta estimativa do erro da fase é usada por [Gamble et al. \(1979a\)](#), [Stodt \(1981\)](#) e [Egbert \(1998\)](#) sendo doravante referenciada como erro da fase Gamble, ou simplesmente erro Gamble, se não houver risco de ambigüidade com seu homônimo da resistividade aparente.

Pode-se estimar o erro da fase a partir de considerações geométricas, representando a impedância em um plano complexo na forma polar, como mostra a Figura A.2. O erro em Z é representado por um círculo de raio σ_Z e o erro da fase pelo ângulo formado entre Z e a reta tangente ao círculo do erro que passa pela origem, ou seja:

$$\sigma_\phi = \arcsen(\sigma_Z/|Z|) \quad (\text{A.13})$$

Este erro é usado por [Bendat e Piersol \(1971\)](#) e [Chave e Thomson \(1989\)](#) e doravante será referenciado como erro Bendat.

Em [Jones \(1999\)](#), o cálculo do erro da fase é feito usando outra geometria na qual se constrói um triângulo retângulo cujos catetos são Z e σ_Z , como mostra a Figura A.2. Neste caso, o erro da fase é dado por:

$$\sigma_\phi = \arctan(\sigma_Z/|Z|) \quad (\text{A.14})$$

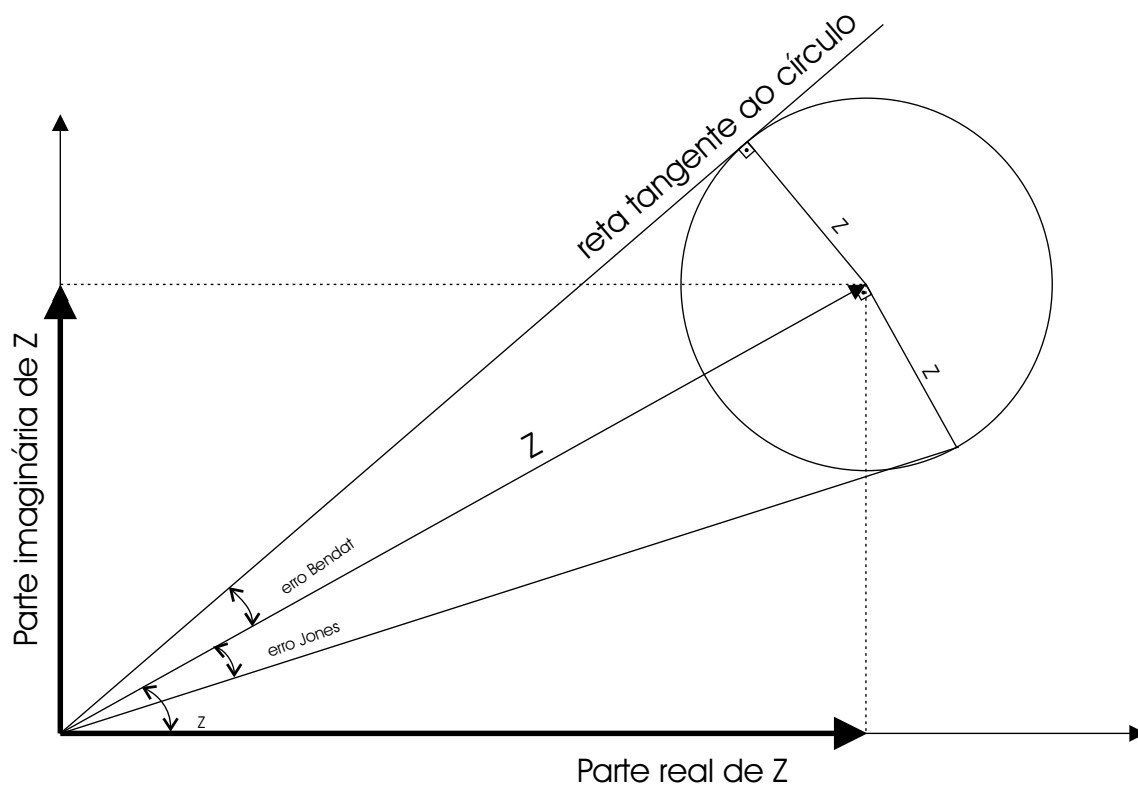


Fig. A.2 – Representação em um plano complexo da impedância Z , do erro σ_Z e dos erros Bendat e Jones.

O erro estimado pela Equação (A.14) será doravante referenciada como erro da fase Jones, ou simplesmente erro Jones, se não houver risco de ambigüidade com seu homônimo da resistividade aparente.

Os três modos para o cálculo do erro da fase são comparados na Figura A.3, novamente em função de $\sigma_Z/|Z|$.

Vê-se que os erros Bendat e Jones são praticamente equivalentes para $\sigma_Z/|Z|$ inferior a 30%. Para valores maiores, o erro Bendat aumenta rapidamente até $\sigma_Z/|Z| = 1$, a partir deste ponto não se pode estimar o erro Bendat, por se tratar de uma função arcsen. Já o erro Jones não apresenta este limite de domínio e possui um aumento mais linear, tendendo ao erro Gamble. Este último apresenta um aumento exatamente linear e também não possui limite de domínio.

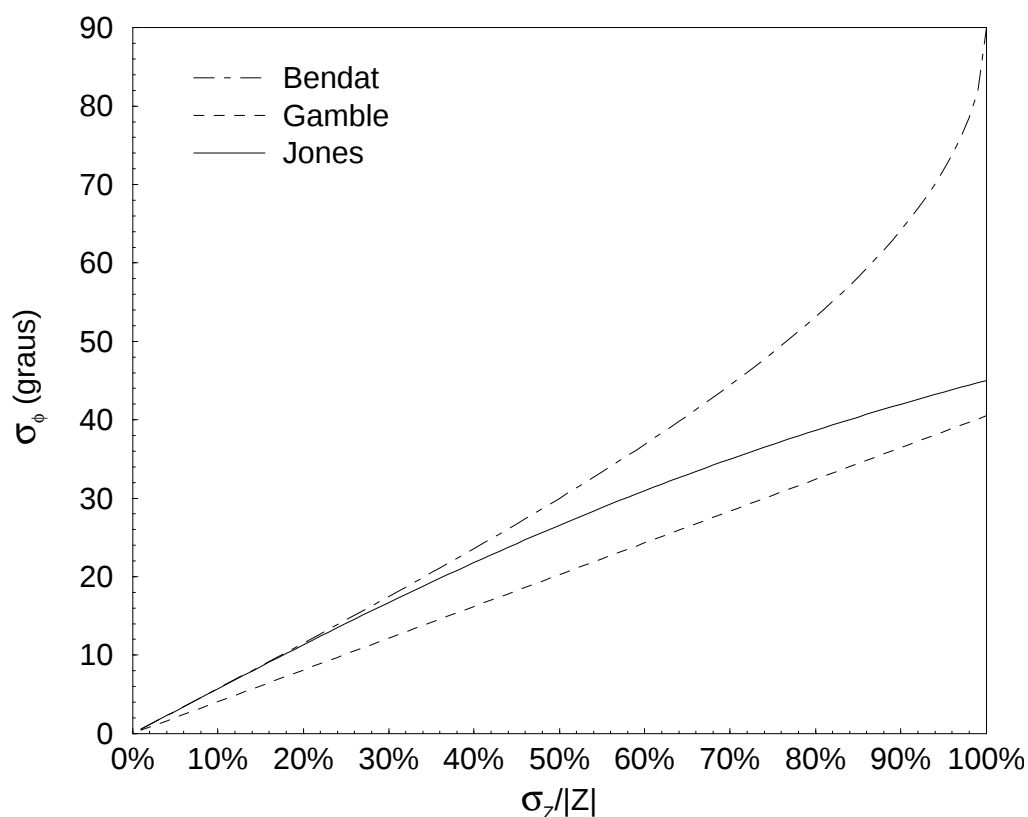


Fig. A.3 – Comparação entre os erros da fase estimados pelo erro Gamble, Bendat e Jones em função de $\sigma_Z/|Z|$.

A.3 Comentários Finais

O erro Jones da resistividade aparente e fase é bastante diferente do encontrado na literatura, não tendo sido localizado nenhum trabalho que justificasse o cálculo utilizado para estimar estes erros. De fato, a explicação aqui apresentada foi feita pelo autor baseado no código fonte de [Jones \(1999\)](#). O erro Jones para ρ_a foi preterido devido ao seu comportamento anômalo quando σ_Z é grande. O erro Stodt foi preferido ao erro Gamble por $\log \rho$ apresentar uma distribuição gaussiana no espaço logarítmico, o que torna a interpretação do erro simples.

O erro Gamble foi escolhido para estimar o erro da fase devido a sua relação com o erro Stodt e por apresentar uma justificativa algébrica simples (propagação de erros).