

## **Aplicação de algoritmo computacional para correções de ruídos eletromagnéticos em dados de séries temporais contínuas dos campos magnéticos e telúricos coletados no Brasil**

### **RELATÓRIO FINAL DE PROJETO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA (PIBIC/CNPq/INPE)**

Edgar Bueno dos Santos (IF/USP, Bolsista PIBIC/CNPq)  
E-mail: [edgar.bueno.santos@usp.br](mailto:edgar.bueno.santos@usp.br)

Dr. Ícaro Vitorello (DGE/INPE, Orientador)  
E-mail: [icaro@dge.inpe.br](mailto:icaro@dge.inpe.br)

**COLABORADORES**  
Dr. Marcelo Banik de Pádua (DGE/INPE)

# SUMÁRIO

1. RESUMO .....	3
2. INTRODUÇÃO .....	4
2.1 Região de Estudo.....	5
3. CONCEITOS FUNDAMENTAIS .....	6
3.1 Método Magnetotelúrico.....	6
3.2 Fonte do Sinal.....	6
3.3 Princípios do Método MT.....	6
3.4 Aquisição de Dados MT .....	11
3.5 Processamento dos Dados MT .....	12
4. RESULTADOS E ANÁLISES .....	14
4.1 Curvas de Resistividade Aparente e Fase.....	14
5. CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	20
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	21

## 1. RESUMO

Este trabalho, iniciado em agosto de 2010 tem como objetivo melhorar os resultados do tensor de impedância, especialmente na faixa de frequência mais afetada pela rede elétrica (60 Hz), como na região da banda morta (1 Hz), e na banda morta de alta frequência (~10 kHz). A obtenção do tensor de impedância a partir das séries temporais dos campos elétricos e magnéticos horizontais torna-se difícil tanto pelos ruídos antropogênicos, fortes em alta frequência, como pelo sinal natural, fraco em baixas frequências. Os programas de análise robusta procuram minimizar esses problemas selecionando os dados com a melhor relação sinal/ruído excluindo assim os dados contaminados com ruídos. Normalmente, essa seleção é feita de modo automático, mas o melhor resultado depende da escolha cuidadosa de uma série de parâmetros, tais como o tamanho e o tipo de janelamento usado tanto no cálculo dos coeficientes da transformada de Fourier como na suavização do espectro, as frequências alvos e o uso de decimação. Assim é necessário realizar o processamento dos dados com diversas combinações diferentes dos parâmetros para que se possa identificar com quais combinações obtêm-se uma minimização dos ruídos eletromagnéticos, além de testar o programa de análise robusta disponível verificando os efeitos de sinal fracos em dados de baixa frequência. Na continuação desse projeto de Iniciação Científica será feito o processamento e a análise dos dados visando a sua interpretação geológica, e a participação em campanhas de coletas de dados a fim de se observar as dificuldades enfrentadas na utilização do método magnetotelúrico.

## 2. INTRODUÇÃO

A obtenção do tensor de impedância a partir das séries temporais dos campos elétricos e magnéticos horizontais torna-se difícil tanto pelos ruídos antropogênicos, fortes em alta frequência, como pelo sinal natural, fraco em baixas frequências.

Os programas de análise robusta procuram minimizar esses problemas selecionando os dados com a melhor relação sinal/ruído excluindo assim os dados contaminados com ruídos. Porém estes programas necessitam de alguns parâmetros para realizar essa seleção, assim, se os parâmetros não forem escolhidos cuidadosamente os ruídos podem afetar ainda mais os dados, prejudicando a sua análise posterior.

O objetivo é desenvolver um algoritmo para a minimização dos ruídos eletromagnéticos presentes em dados de séries temporais magnéticas e telúricas. Assim obtendo melhores resultados para o tensor de impedância.

Neste trabalho foram analisados os principais ruídos encontrados nessas séries, que são o 60 Hz, região afetada pelas redes elétricas, e a banda morta (1 Hz). Foi feita uma análise da banda morta de alta frequência (10 kHz), a fim de se determinar os melhores horários para a realização da coleta de dados.

É prevista a participação em campanhas MT efetuando o pré-processamento dos dados no campo, conhecendo assim, o processo de obtenção dos dados MT e as dificuldades enfrentadas em sua coleta.

## 2.1 Região de Estudo

Os dados utilizados neste trabalho foram coletados anteriormente em Araraquara (sobre a bacia do Paraná) e norte de Itapeva (borda da bacia do Paraná), ambos no estado de São Paulo. Abaixo está ilustrada a localização das estações de coleta.

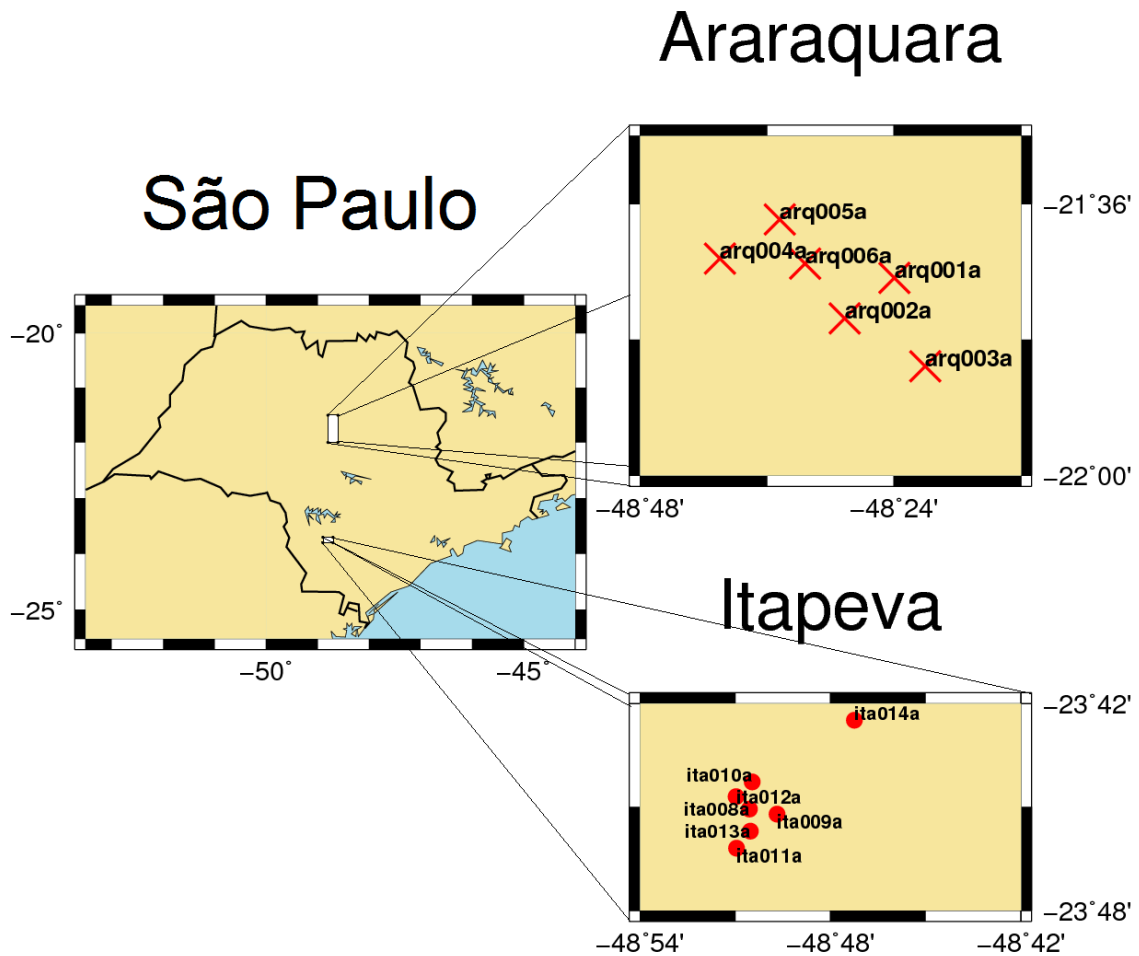


Figura 2.1 - Localização das estações de coleta de dados.

### **3. CONCEITOS FUNDAMENTAIS**

#### **3.1 Método Magnetotelúrico**

O método magnetotelúrico (MT), proposto por Tikhonov (1950) e Cagniard (1953), consiste na medição de variações no campo elétrico (E), e magnético (B) natural na superfície da Terra a fim de se obter um modelo da estrutura da condutividade elétrica no interior do planeta. As variações no campo eletromagnético natural induzem uma corrente elétrica na Terra, conhecidas por correntes telúricas.

#### **3.2 Fonte do Sinal**

A frequência do sinal eletromagnético utilizado nas medidas do método magnetotelúrico se encontra no intervalo de  $10^{-4}$  a  $10^4$  Hz. Este intervalo normalmente é subdividido em duas faixas, uma de  $10^{-4}$  a 1 Hz e a outra de 1 a  $10^4$  Hz. A fonte do sinal eletromagnético medido nas frequências menores é devido às correntes elétricas geradas na magnetosfera e na ionosfera causadas por interações entre o vento solar e o campo geomagnético.

Para a faixa de 1 a  $10^4$  Hz o sinal é proveniente de descargas elétricas na atmosfera. Descargas elétricas de relâmpagos geram ondas eletromagnéticas, conhecidas como esféricas, que se propagam ao redor do planeta devido ao guia de onda formado entre a ionosfera e a superfície da Terra.

Na região entre 0,1 e 10 Hz existe um mínimo no espectro do campo telúrico e um máximo no espectro dos ruídos naturais e culturais, o que produz medidas MT com baixas razões sinal/ruído. Por esse motivo este intervalo também é conhecido como “banda morta”.

#### **3.3 Princípios do Método MT**

A teoria clássica do eletromagnetismo é considerada a base do método magnetotelúrico. Através das equações de Maxwell é possível se compreender

como os campos eletromagnéticos naturais, observados na superfície terrestre, podem ser utilizados no estudo das propriedades de um meio condutor.

As equações de Maxwell no domínio do tempo são escritas como:

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (2.1)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} - \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (2.2)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (2.3)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \quad (2.4)$$

onde:

$\mathbf{E}$  (V/m) – campo elétrico;

$\mathbf{B}$  (T) – indução magnética;

$\mathbf{D}$  (C/m<sup>2</sup>) -deslocamento elétrico;

$\mathbf{H}$  (A/m) – campo magnético;

$\mathbf{J}$  (A/m<sup>2</sup>) – densidade de corrente;

$\rho$  (C/m<sup>3</sup>) – densidade de carga.

Assumindo o princípio de conservação da carga, verifica-se que há apenas duas relações independentes, as equações (2.1) e (2.2). Assim, para que o sistema possa ser resolvido necessita-se das chamadas relações constitutivas. Essas relações vinculam o comportamento do campo eletromagnético às características físicas do meio, dadas pela sua permissividade dielétrica ( $\epsilon$ ), sua permeabilidade magnética ( $\mu$ ) e pela sua condutividade elétrica ( $\sigma$ ).

Supondo um meio linear, isotrópico e homogêneo, as relações constitutivas podem ser descritas da seguinte forma:

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} \quad (2.5)$$

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (2.6)$$

$$\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E} \quad (2.7)$$

Utilizando as relações (2.5) a (2.7) as equações de Maxwell (2.1) e (2.2), podem ser expressas em função apenas das intensidades dos campos elétrico ( $\mathbf{E}$ ) e magnético ( $\mathbf{H}$ ).

A partir das equações de Maxwell (2.1) e (2.2) e das relações constitutivas (2.5) a (2.7) podemos obter as equações de onda. Para isso podemos substituir as relações constitutivas, (2.5) a (2.7), nas equações (2.1) e (2.2), e em seguida tomar o operador rotacional, obtendo assim:

$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{E} + \mu \nabla \times \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} = 0 \quad (2.8)$$

$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{H} - \epsilon \nabla \times \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} - \sigma \nabla \times \mathbf{E} = 0 \quad (2.9)$$

As quantidades  $\nabla \times \mathbf{E}$  e  $\nabla \times \mathbf{H}$  são dadas pelas equações (2.1) e (2.2), respectivamente. O primeiro termo de cada uma dessas equações pode ser expandido através da identidade vetorial

$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{A} = \nabla \nabla \cdot \mathbf{A} - \nabla^2 \mathbf{A} \quad (2.10)$$

Como a densidade de carga total é nula, temos que  $\nabla \cdot \mathbf{E} = 0$ , e da equação (2.3) temos que  $\nabla \cdot \mathbf{H} = 0$ , assim obtemos a equação de onda:

$$\nabla^2 \mathbf{E} - \mu \epsilon \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} - \mu \sigma \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} = 0 \quad (2.11)$$

$$\nabla^2 \mathbf{H} - \mu \epsilon \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial t^2} - \mu \sigma \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} = 0 \quad (2.12)$$

Assumindo uma variação temporal harmônica ( $e^{i\omega t}$ ), onde  $\omega$  é a frequência angular, temos

$$\nabla^2 \mathbf{L} + \mu \epsilon \omega^2 \mathbf{L} - i \mu \sigma \omega \mathbf{L} = 0 \quad (2.13)$$



$$\nabla^2 \mathbf{L} + k^2 \mathbf{L} = 0 \quad (2.14)$$

onde  $\mathbf{L}$  é uma representação genérica das componentes elétrica e magnética, e

$$k^2 = \mu \epsilon \omega^2 - i \mu \sigma \omega \quad (2.15)$$

em que  $k$  é conhecida como o número de onda. Considerando-se a ordem de grandeza da condutividade elétrica dos minerais e rochas, e as frequências utilizadas no método MT, temos que  $\mu \epsilon \omega^2 \ll i \mu \sigma \omega$ , ou seja, as correntes de deslocamento podem ser desprezadas (aproximação quase-estática), e assim o número de onda pode ser aproximado por

$$k^2 = -i \mu \sigma \omega \quad (2.16)$$

Assim como o número de onda agora é independente da permissividade dielétrica, as equações se reduzem as equações de difusão.

Assumindo que o campo incide como uma onda plana na direção vertical (Cagniard, 1953). E admitindo a Terra como um semi-espaço finito e uniforme, obtemos a seguinte solução para a equação de difusão

$$\mathbf{L}_x = \mathbf{L}_0 e^{-z/\delta} e^{-i(z/\delta - \omega t)} \quad (2.17)$$

onde novamente  $\mathbf{L}$  e  $\mathbf{L}_0$  são representação genéricas das componentes elétrica e magnética, e  $\delta$  é a profundidade pelicular (“skin depth”), que é a profundidade no semi-espaço em que a amplitude do campo é reduzida a  $1/e$  do seu valor na superfície, e é dado por

$$\delta = \left( \frac{2}{\omega \mu_0 \sigma} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.18)$$

onde a permeabilidade magnética  $\mu$  foi considerada aproximadamente constante e igual a  $\mu_0$  (permeabilidade magnética no vácuo), já que a sua variação é desprezível em comparação com a condutividade elétrica. Da equação (2.18) vemos que quanto maior o período ou menor a condutividade no meio, maior será a profundidade de penetração do campo eletromagnético.

Podemos obter informações sobre a resistividade elétrica através do campo eletromagnético se levarmos em consideração as relações na superfície entre os vetores  $\mathbf{E}$  e  $\mathbf{H}$ , e a resistividade. Assim é necessário assumir que os campos são ondas planas. A impedância ( $Z$ ) do meio, para um semi-espaco infinito e homogêneo, é definida pela razão das componentes  $E_x$  e  $H_y$  na superfície:

$$\frac{E_x}{H_y} = \frac{\omega\mu}{k} = (1 + i) \left( \frac{\omega\mu\rho}{2} \right)^{\frac{1}{2}} = Z_{xy} \quad (2.19)$$

Onde a resistividade elétrica é:

$$\rho_{xy} = \frac{Z_{xy}Z_{xy}^*}{\omega\mu} = \frac{1}{\omega\mu} \left| \frac{E_x}{H_y} \right|^2 \quad (2.20)$$

Sendo  $Z_{xy}^*$  o complexo conjugado de  $Z_{xy}$ .

A fase  $\phi$  da impedância é obtida pela diferença entre as fases de  $\mathbf{E}$  e  $\mathbf{H}$ , expressa como:

$$\Phi = \arctan \left( \frac{\mathcal{I}(Z)}{\mathcal{R}(Z)} \right) \quad (2.21)$$

No caso geral, em que a relação tensorial entre as componentes do campo eletromagnético é linear, a impedância pode ser escrita (na forma matricial), para cada frequência, como:

$$\begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} H_x \\ H_y \end{pmatrix} \quad (2.22)$$

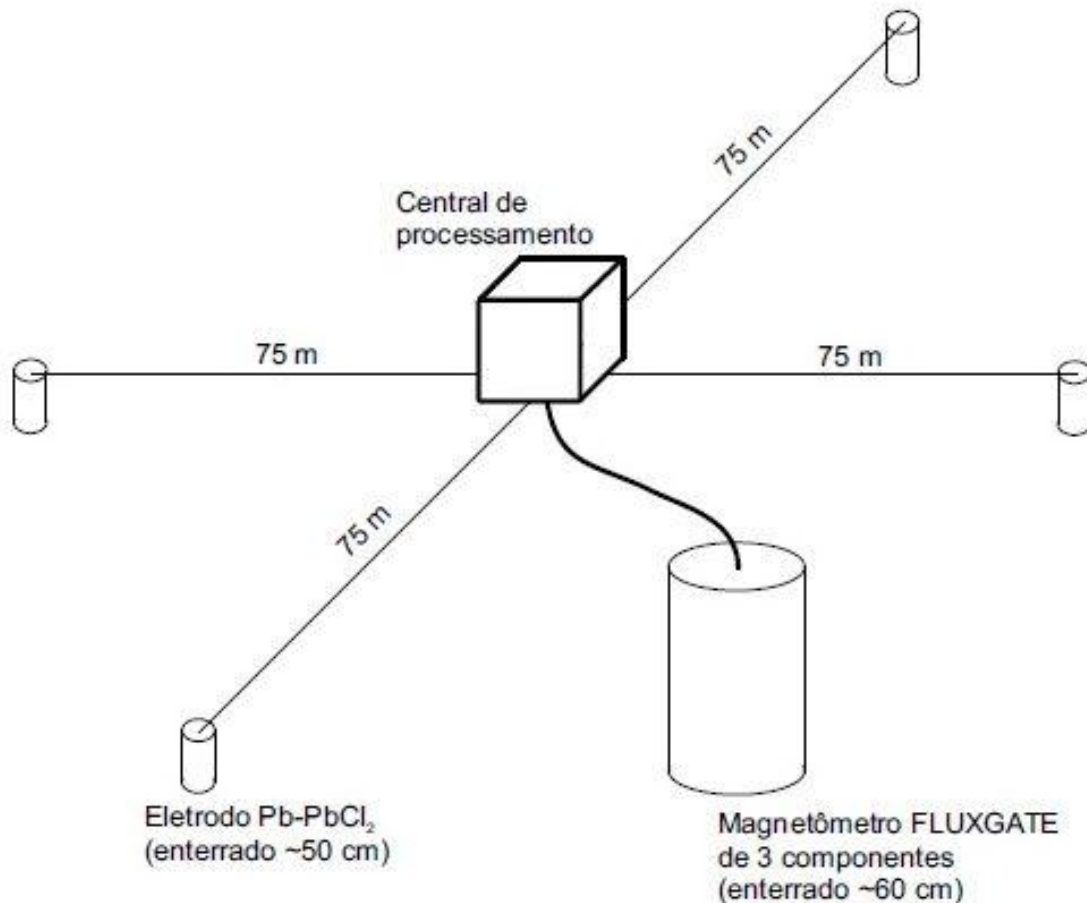
### 3.4 Aquisição de Dados MT

Uma sondagem MT consiste na medição das variações das componentes ortogonais do campo elétrico ( $E_x$  e  $E_y$ ) e do campo magnético ( $H_x$ ,  $H_y$  e  $H_z$ ) na superfície da Terra. O campo elétrico é medido a partir de pares de eletrodos porosos não polarizáveis separados tipicamente por 100-150 m. Estes consistem basicamente de potes com base cerâmica comumente preenchidos com solução de cloreto de potássio (KCl), cloreto de Cádmio ( $CdCl_2$ ) ou cloreto de chumbo ( $PbCl_2$ ). Por sua vez, o campo magnético é medido através de bobinas de indução ou, no caso de dados de longo período, magnetômetros do tipo fluxgate. A central de processamento é onde se encontram os circuitos que controlam e armazenam a aquisição de dados. Esta central é programada com o auxílio de um microcomputador portátil, que também é utilizado para realizar um pré-processamento dos dados adquiridos. A figura 3.1 ilustra esquematicamente o arranjo experimental

Na coleta dos dados utilizados neste trabalho foram utilizados os equipamentos GMS06 (Metronix GmbH) pertencentes ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Este equipamento coleta dados numa faixa espectral entre 0,0008 – 1024 s. Utilizou-se os eletrodos com a solução de cloreto de chumbo, separadas a uma distância de aproximadamente 150 m. Foram utilizadas três bobinas de indução para as medidas do campo magnético.

É necessário tomar certas providências na instalação dos equipamentos para seu bom funcionamento, como escolher lugares planos e longe da rede elétrica (algumas centenas de metros) e das linhas de transmissão de alta tensão

(alguns quilômetros), deixar os fios e bobinas enterradas para que não entre em contato com animais nem sofram variações de temperatura, e é necessário também que os eletrodos e sensores estejam perfeitamente alinhados.



**Figura 3.1** – Ilustração esquemática do arranjo para aquisição de dados MT.

**Fonte:** Pádua (Pádua, 2000)

### 3.5 Processamento dos Dados MT

O processamento dos dados MT consiste basicamente em extrair o tensor de impedância das séries temporais das componentes dos campos elétricos e magnéticos horizontais obtidos no campo. A obtenção desse tensor de impedância torna-se difícil tanto pelos ruídos antropogênicos, fortes em alta frequência, como pelo sinal natural, fraco em baixas frequências.

As séries temporais são divididas em subgrupos, cujo tamanho depende do intervalo de amostragem e do número de graus de liberdade que se deseja trabalhar. A seguir é calculada a média e a tendência linear de cada um dos segmentos, e por fim aplica-se uma janela nos dados, suavizando os extremos e atenuando as distorções geradas devido à manipulação de séries temporais finitas.

Como os dados são coletados no domínio do tempo, aplica-se a Transformada de Fourier a fim de passá-los para o domínio da frequência, e por fim, estima-se a impedância por técnicas robustas, ou pelo método dos mínimos quadrados.

Os programas de análise robusta procuram minimizar esses problemas selecionando os dados com a melhor relação sinal/ruído excluindo assim os dados contaminados com ruídos.

Utilizando o código robusto de Egbert (Egbert, 1998) foi feito o reprocessamento dos dados coletados anteriormente nas regiões de Araraquara e no norte de Itapeva. No processamento foram utilizadas duas sub-rotinas do código de Egbert que são a DNFF e o TRANMT. A DNFF realiza a análise espectral, calculando assim os coeficientes da transformada de Fourier das séries temporais. Feito isso é aplicado o TRANMT para que seja feita uma estimativa do tensor de impedância, essa estimativa é realizada a partir dos coeficientes gerados pela DNFF.

Com a estimativa do tensor de impedância, e com o auxílio do pacote gráfico Generic Mapping Tools (GMT), desenvolvido por Paul Wessel e Walter H. F. Smith e que recebe a contribuição de vários usuários de todo o mundo e está sendo mantido pela National Science Foundation é possível visualizar os resultados para a realização de uma primeira análise.

## 4. RESULTADOS E ANÁLISES

Toda a parte gráfica apresentada aqui foi gerada utilizando-se o programa GMT e com o auxílio da linguagem AWK, linguagem de programação criada por Alfred V. Aho, Peter J. Weinberger e Brian W. Kernighan, e de Shell Scripts do Linux. Todos os códigos MT e o pacote gráfico GMT são disponibilizados livremente.

### 4.1 Curvas de Resistividade Aparente e Fase

As curvas de resistividade aparente e fase são obtidas a partir das impedâncias após o processamento das séries temporais dos dados MT. Utilizando o código robusto de Gary Egbert (Egbert, 1998) foi feito o re-processamento dos dados coletados anteriormente nas regiões de Araraquara e no norte de Itapeva. No processamento foram utilizadas duas sub-rotinas do código de Egbert que são a DNFF e o TRANMT.

A DNFF realiza a análise espectral, calculando assim os coeficientes da transformada de Fourier das séries temporais. Na prática, as respostas MT são calculadas em bandas de frequência independentes e posteriormente agrupadas. Pode-se também segmentar as séries temporais em janelas de tamanhos distintos. Diferentes janelas são aplicadas para uma mesma banda de frequência, pois a qualidade do processamento pode variar de janela para janela. Cada banda possui uma ou duas janelas que são típicas para ela, mas eventualmente, dependendo das condições de ruído, outras janelas podem ser aplicadas na tentativa de se obter melhores resultados.

Feito isso é aplicado o TRANMT para que seja feita uma estimativa do tensor de impedância, essa estimativa é realizada a partir dos coeficientes gerados pela DNFF.

Com a estimativa do tensor de impedância, e com o auxílio do pacote gráfico (GMT) é possível visualizar os resultados para a realização de uma primeira análise.

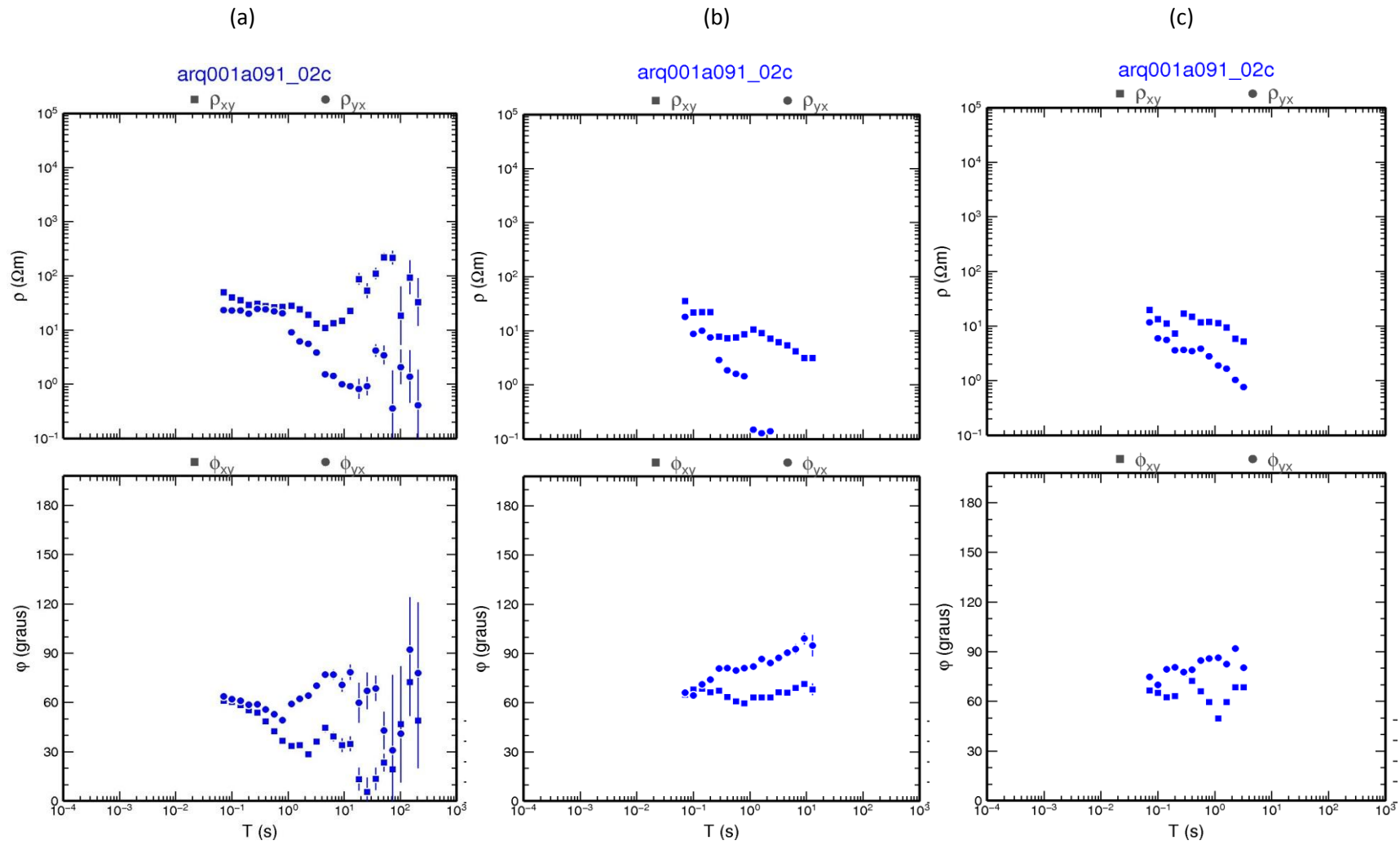
O código de Egbert depende de certos parâmetros como o tipo de janelamento, o uso de decimação e o intervalo onde serão calculados os coeficientes. A escolha desses parâmetros é importante para a minimização dos ruídos nos dados MT. Geralmente são adotadas algumas janelas específicas para cada banda, essas janelas estão mostradas na tabela 4.1, porém a escolha de outra janela pode alterar os resultados.

**Tabela .4.1** – Tamanho das janelas geralmente utilizadas para cada banda de frequência.

<b>Quantidade de amostras por janela</b>	<b>Bandas padrão</b>
00064	D
00128	C, D
00256	C
08192	B
65536	A, B

Onde cada banda é adquirida com uma taxa de amostragem específica, sendo a banda A adquirida com taxa de amostragem de 40.960 Hz, a B de 4.096 Hz, a C de 64 Hz e a D de 2 Hz.

Assim para a banda C foi feito o re-processamento com tamanhos maiores de janelas como a de 8192 e a 65536. Nas figuras 4.1 (a) a (c) apresentam-se os efeitos obtidos com essa mudança.

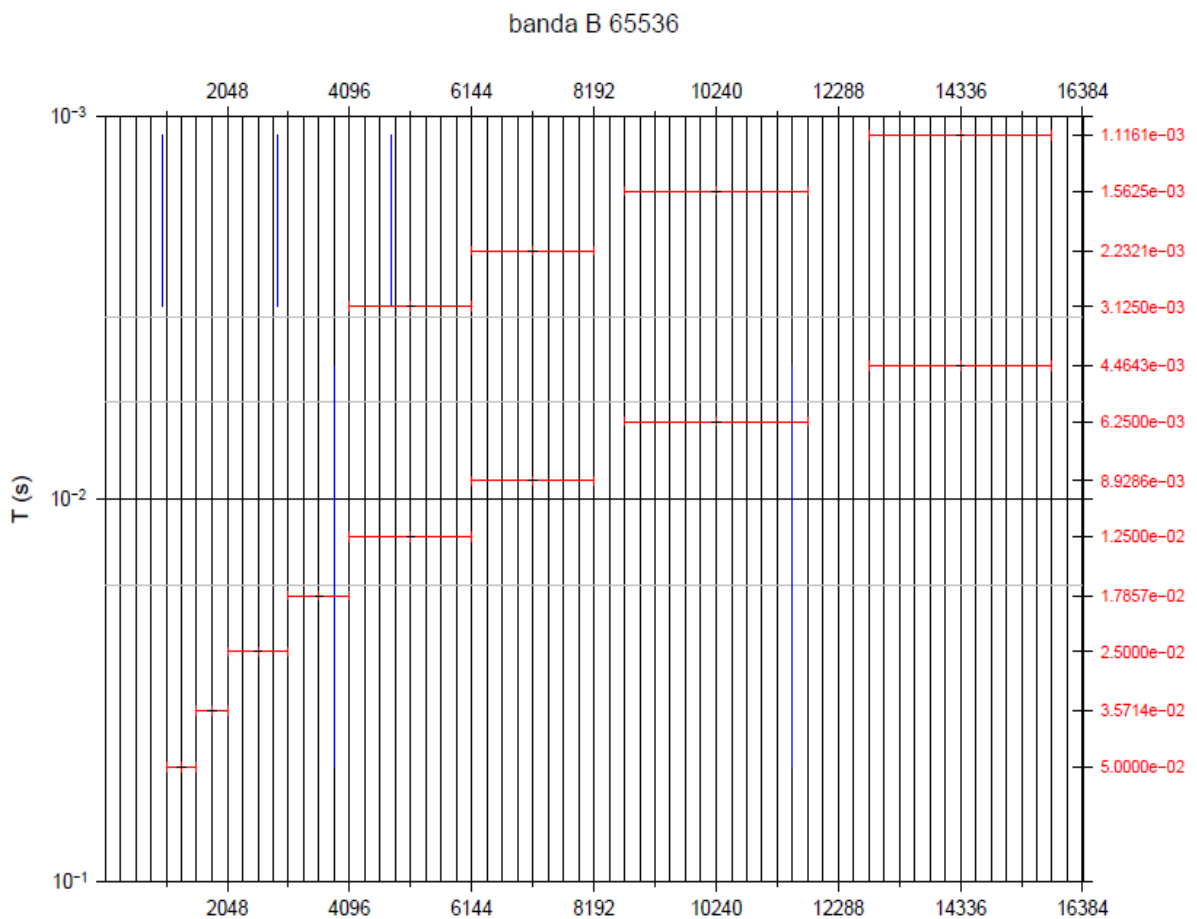


**Figura 4.1** – (a) Processamento da banda C com janela de 256. (b) Processamento da banda C com janela de 8192. (c) Processamento da banda C com janela de 65536.

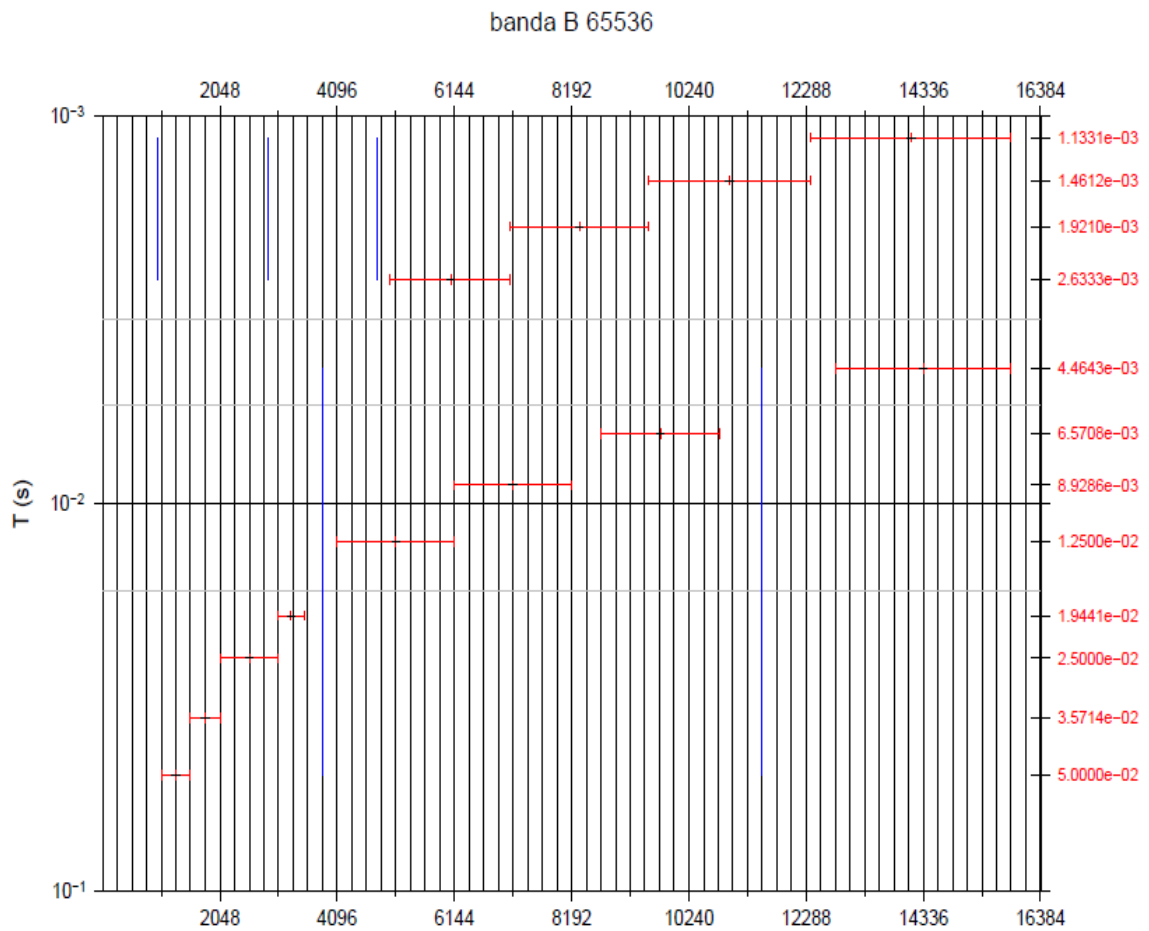


Vemos que, na banda C, a escolha de maiores janelas para o processamento dos dados fez com que diminuíssem o número de pontos, já que se utilizaram mais dados para o cálculo de cada um deles, o que acabou contaminando mais pontos com os ruídos.

Para a banda B, banda em que se encontra o ruído de 60 Hz, tentou-se alterar os parâmetros do intervalo onde seriam calculados os coeficientes de modo a retirar a frequência alvo desse cálculo. As figuras 4.2 e 4.3 ilustram a disposição desses intervalos e as barras azuis representam as frequências alvo (60 Hz, e seus harmônicos).

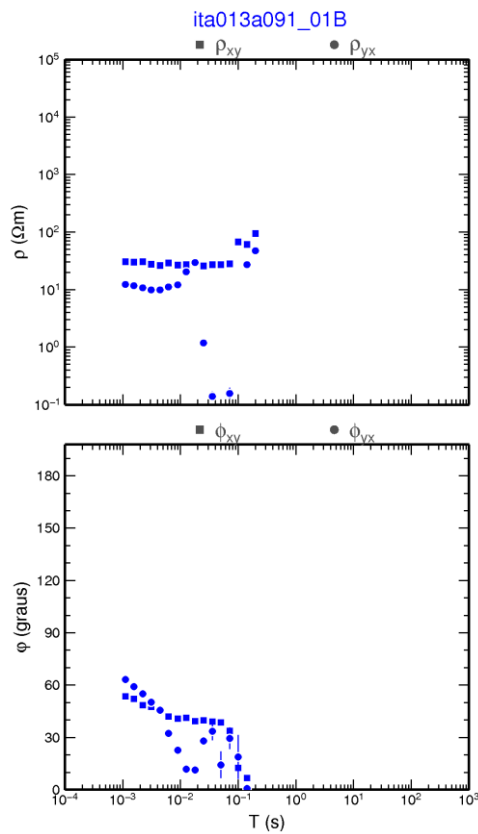


**Figura 4.2** – Intervalos que passam pelas frequências alvo.

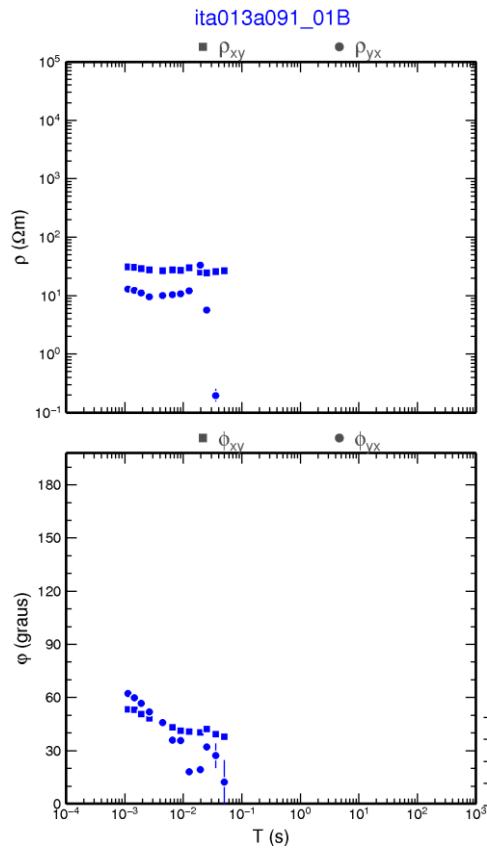


**Figura 4.3** – Intervalos fora das frequências alvo.

Os valores presentes no canto dos gráficos correspondem à média de cada um dos intervalos de frequências. As figuras 4.4 e 4.5 correspondem as curvas de resistividade do processamento obtido com os parâmetros acima, respectivamente.



**Figura 4.4** – Curva de resistividade para a primeira configuração.



**Figura 4.5** – Curva de resistividade para a segunda configuração (retirando as frequências alvo).

Observou-se uma pequena variação em alguns pontos, porém a curva de resistividade não apresentou melhoras significantes, uma vez que, mesmo retirando as frequências alvo da região onde é efetuado o cálculo dos coeficientes, é possível identificar os ruídos causados por essa faixa de frequência da rede elétrica (60 Hz).

## 5. CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Para as bandas de frequências mais baixas, C e D, a utilização de janelas maiores no processamento fará com que mais pontos sejam contaminados com os ruídos e assim prejudicará ainda mais a análise dos dados. Porém não se deve diminuir excessivamente o tamanho do janelamento, para não afetar a precisão das medidas.

A retirada de frequências alvo, como o 60 Hz e seus harmônicos, do intervalo onde são calculados os coeficientes resulta numa pequena melhora, porém em apenas alguns pontos, o que não acaba com o problema dos resíduos. Mas para tirar essas frequências alvo do intervalo, deve se tomar alguns cuidados, pois se o intervalo se tornar muito pequeno, o programa acabará apresentando resultados aleatórios.

Não foi possível a participação em campanhas MT, devido à incompatibilidade entre o calendário escolar e as campanhas realizadas.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Simpson, F.; Bahr, K. Practical Magnetotellurics. Cambridge University Press, Cambridge, 2005. 270p.

Vozoff, K; The Magnetotellurics Method. In: NABIGHIAN. **EM** methods in applied geophysics. 1990. Capítulo 8, p.641-689.

Cagniard, L. Basic Theory of the Magneto-telluric Method of Geophysical Prospecting. Geophysics, v. 18, n. 3, p. 605–635, 1953.

Pádua, M. Banik, 2000, Estudo experimental de distorções geradas por linhas férreas eletrificadas em sondagens magnetoteluricas, Dissertação de mestrado, INPE, Brasil, 64p.

X

---

Edgar Bueno dos Santos  
Bolsista

X

---

Dr. Ícaro Vitorello  
Orientador