

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

PATRICK ROGGER GARCIA

**DESENVOLVIMENTO DE SOFTWARE LIVRE PARA PROCESSAMENTOS DE
DADOS MAGNETOTELÚRICOS**

**Caçapava do Sul
2018**

PATRICK ROGER GARCIA

**DESENVOLVIMENTO DE SOFTWARE LIVRE PARA PROCESSAMENTOS DE
DADOS MAGNETOTELÚRICOS**

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação)
apresentado ao curso de Bacharelado em
geofísica da Universidade Federal do Pampa
como requisito parcial para obtenção do grau de
Bacharel em geofísica.

Orientador: Vinicius Abreu de Oliveira

Co-orientadora: Andréa Cristina Lima dos San-
tos Matos

**Caçapava do Sul
2018**

G216d Garcia, Patrick Rogger

Desenvolvimento de Software livre para processamentos de dados magnetotelúricos / Patrick Rogger Garcia. – 2018.

39p. : il.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Federal do Pampa, GEOFÍSICA, 2018.

“Orientação: Vinicius Abreu de Oliveira; Coorientação: Andréa Cristina Lima dos Santos Matos”.

1. Magnetotelúrico. 2. Python3. 3. Software Livre. 4. Processamento Robusto. I. Título.

PATRICK ROGGER GARCIA

**DESENVOLVIMENTO DE SOFTWARE LIVRE PARA PROCESSAMENTOS DE
DADOS MAGNETOTELÚRICOS**

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação)
apresentado ao curso de Bacharelado em
geofísica da Universidade Federal do Pampa
como requisito parcial para obtenção do grau de
Bacharel em geofísica.

Área de concentração: Geofísica Espacial,
Geofísica de *Software*

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: XX de novembro de 2018.
Banca Examinadora:

Prof. Dr. Vinicius Abreu de Oliveira
Orientador
UNIPAMPA

Prof. Dr. Éverton Frigo
UNIPAMPA

Dr. Marcelo Banik de Pádua
INPE

RESUMO

Este trabalho trata do desenvolvimento do *Software* PampaMT. Este programa foi desenvolvido para auxiliar e otimizar o pré-processamento de dados do método geofísico Magnetotelúrico (MT). O método MT utiliza fontes eletromagnéticas naturais do planeta Terra para investigar a subsuperfície do planeta. A faixa de frequência utilizada pelo MT compreende de $10^{-4}Hz$ a 10^4Hz , possibilitando a investigação geofísica de 100 a 200 quilômetros de profundidade. O programa foi desenvolvido utilizando a linguagem de programação Python sob a licença de software Livre, o programa une inúmeros programas e rotinas, de uso livre, consagrados no pré-processamento de dados magnetotelúrico. A utilização do programa será realizada através de uma interface gráfica amigável, facilitando assim, as etapas de pré-processamentos para os novos usuários. O que se contra põe aos programas e rotinas disponíveis atualmente para o processamento de dados que utilizam apenas linhas de comando e procedimentos excessivamente manuais. Tais fatores, muitas vezes, afastam novos pesquisadores o que restringe este processamento a pequenos núcleos de pesquisadores. A validação da eficiência do programa, em termos do tempo e usabilidade, foi realizada através do processamento simultâneo de dados reais, localizados na região nordeste do Brasil, tais dados, já foram processados por trabalhos anteriores, e permitem a comparação efetiva do processamento utilizando as técnicas já consolidadas e a nova forma de processamento através do PampaMT.

Palavras-chave: Magnetotelúrico. Python3. Software Livre. Processamento Robusto.

ABSTRACT

This work deals with the development of PampaMT software. This program was developed to aid and optimize the pre-processing of the Magnetotelluric (MT) geophysical method. The MT method uses natural electromagnetic sources from planet Earth to investigate the subsurface of the planet. The frequency range used by the MT comprises from $10^{-4}Hz$ to 10^4Hz , allowing the geophysical investigation of 100 to 200 km depth. The program was developed using the Python programming language under the Free software license, the program joins numerous programs and routines, free use, consecrated in the pre-processing of Magnetotelluric data. The use of the program will be done through a friendly graphical interface, thus facilitating the pre-processing steps for new users. What is against the programs and routines currently available for data processing that use only command lines and procedures excessively manual. Such factors often alienate new researchers which constrains this processing to small nuclei of researchers. The validation of the program's efficiency in terms of time and usability was performed through the simultaneous processing of real data, located in the northeastern region of Brazil. These data have already been processed by previous works and allow for the effective comparison of the processing using the techniques already consolidated and the new form of processing through PampaMT.

Keywords: Magnetotelluric. Python3. Free Software. Robust Processing.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Arranjo para obter experimentalmente a resistividade de um material geológico.	14
Figura 2 – Arranjo para obter experimentalmente a resistividade de um material geológico.	14
Figura 3 – Campo magnético natural e as contribuições das fontes do sinal MT.	15
Figura 4 – Gráfico do <i>skin-depth</i>	19
Figura 5 – Arranjo para Aquisição de dados MT.	21
Figura 6 – Aquisição de Dados Discretos.	22
Figura 7 – Fluxograma de Pré-processamento.	23
Figura 8 – Saída Gráfica Gerada pelo <i>script: plot-cmp-tf</i> , utilizando o GMT.	28
Figura 9 – Tela Inicial PampaMT	29
Figura 10 – Seleção das Estações	30
Figura 11 – Tela de Configuração para o EMTF	30
Figura 12 – Tela Principal PampaMT	31
Figura 13 – Integração com Outros Programas	32
Figura 14 – Seleção dos Períodos	33

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASCII – *American Standard Code for Information Interchange*

CNPq – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico

GEOMA – Grupo de Geomagnetismo

GUI – *Graphical User Interface*

INPE – Instituto Nacional de Pesquisa Espaciais

MT – Magnetotelúrico

PIBIC – Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica

TS – *Time Series*

LISTA DE SÍMBOLOS

σ	Condutividade Elétrica
ρ	Resistividade Elétrica
ρ_a	Resistividade Elétrica Aparente
ΔU	Diferença de Potencial
i	Corrente Elétrica
R	Resistência Elétrica
A	Área
Δl	Comprimento
$\nabla \times$	Rotacional
$\nabla \cdot$	Divergente
\vec{E}	Campo Elétrico
\vec{H}	Campo Magnetizante
\vec{B}	Campo Magnético
\vec{J}	Densidade de Corrente
\vec{D}	Campo de Deslocamento Elétrico
ϱ	Densidade de Carga
t	Tempo
μ	Permeabilidade Magnética
ε	Permissividade Elétrica
i	Unidade Imaginária

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	9
2	OBJETIVOS	11
2.1	Objetivo Geral	11
2.2	Objetivos Específicos	11
3	FUNDAMENTOS DO MÉTODO MAGNETOTELÚRICO	13
3.1	Resistividade Elétrica dos Materiais	13
3.2	Origem das Correntes Telúricas	15
3.3	Resposta do Método Magnetotelúrico	15
3.4	Impedância Eletromagnética	19
4	AQUISIÇÃO DE DADOS E DEPENDÊNCIAS	21
4.1	Aquisição de Dados MT	21
4.2	Processamento de Dados MT	23
4.3	Formatos de Arquivos de Dados MT	24
4.4	Processamento Robusto – EMTF	27
4.5	Pacotes de Processamento do Grupo Geoma – INPE	27
5	DESENVOLVIMENTO E RESULTADOS DO PAMPAMT	29
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	35
	REFERÊNCIAS	37
	APÊNDICE A – CÓDIGO FONTE PAMPAMT	39

1 INTRODUÇÃO

A interação do vento solar com a magnetosfera terrestre, e as altas ocorrências de tempestades equatoriais gera correntes elétricas, que penetram e propagam-se por todo o interior da Terra. A indução gerada pela propagação das correntes telúricas formam o sinal analítico do método geofísico magnetotelúrico – MT (PARKINSON, 1983). As aplicações do método giram em torno da prospecção de petróleo e estudos crustais. Essa aplicação justifica-se pela profundidade de investigação do método, que varia de 100 metros a 200 quilômetros.

No entanto, devido a complexidade do método, tem-se um desestímulo ao desenvolvimento de *softwares*, o que produz um ambiente onde programas proprietários agregam um alto valor comercial, muitas vezes inviabilizando o uso acadêmico. E ainda, os programas de uso livre não são amigáveis com o usuário. De fato, o seu uso se dá, unicamente, por linhas de comando que não é familiar para a maioria dos potenciais usuários do MT.

A comunidade MTnet (MTNET, 2018), mantém laços com diversos pesquisadores na área do MT, e reúne as aplicações destinadas aos processamentos dos dados, tais como: *softwares* de pré-processamento, inversão, tratamento estatísticos, dentre outros. Os programas alocados no MTnet são de uso livre e destinados a comunidade acadêmica.

A proposta deste trabalho visa unir os programas livres em uma única plataforma, construída para ser amigável, fazendo uso de uma GUI (*Graphical User Interface*) simples, agindo como intermediária entre o usuário e os programas disponíveis no MTnet.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Este trabalho se destina ao desenvolvimento de um *software* livre, com o objetivo de integrar e facilitar o processamento de dados MT.

2.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos compreendem os seguintes itens:

- Criar novos algoritmos escritos em *Python*, tanto para a GUI quanto para otimizar o tempo de processamento dos dados;
- Atualizar os algoritmos já existentes usando as novas tecnologias;
- Obter um perfil lito-geofísico utilizando apenas as ferramentas aqui desenvolvidas, permitindo a validação da eficiência no uso do programa.

3 FUNDAMENTOS DO MÉTODO MAGNETOTELÚRICO

Proposto com (TIKHONOV, 1950) e (CAGNIARD, 1953) o método magnetotelúrico usa as fontes passivas¹ eletromagnéticas do planeta Terra para estudar e mapear a subsuperfície.

Nesta secção será mostrado sucintamente a origem do sinal MT. Entretanto, antes de demonstrar as bases teóricas do método, será descrito brevemente sobre a resistividade elétrica, sendo esse o elemento fundamental para as interpretações lito-geofísicas com base no magnetotelúrico.

3.1 Resistividade Elétrica dos Materiais

O método MT usa a resistividade elétrica (ρ [Ωm]) ou o seu inverso, a condutividade elétrica (σ [S]), para distinguir e estudar a distribuição dos elementos geológicos em subsuperfície.

A resistividade elétrica é um parâmetro físico intrínseco a cada material. Ela pode ser definida pela oposição do fluxo de corrente elétrica em um material, ou seja, a resistividade elétrica é igual ao campo elétrico sobre a densidade de corrente (HAYT; BUCK, 2013):

$$\rho = \frac{E}{J} \quad (3.1)$$

Onde, E é a magnitude do campo elétrico em [V/m] e J é a densidade de corrente em [A/m^2].

Se o campo elétrico e a corrente elétrica forem constantes, eles podem assumir os seguintes valores:

$$E = \frac{\Delta U}{\Delta l} \quad (3.2)$$

$\Delta U \rightarrow$ Diferença de potencial [V]

$\Delta l \rightarrow$ Comprimento do condutor [m]

$$J = \frac{i}{A} \quad (3.3)$$

$i \rightarrow$ Corrente Elétrica [A]

$A \rightarrow$ Seção transversal do condutor [m^2]

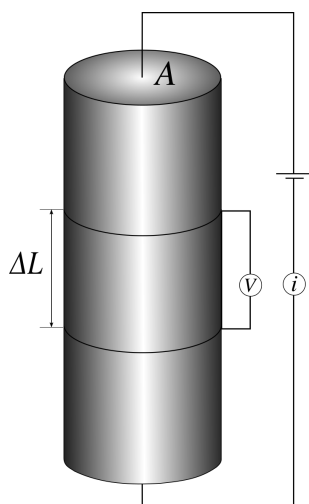
Substituindo as equações [3.2] e [3.3] na equação [3.1], obtém-se:

$$\rho = \frac{A \Delta U}{i \Delta l} \quad (3.4)$$

¹ São fontes de sinal que não dependem de instrumentos artificiais para gerá-la, ou seja, sinais naturais do planeta.

Utilizando a equação [3.4], pode-se estimar a resistividade elétrica de um material geológico experimentalmente, a partir do arranjo mostrado na Figura 1.

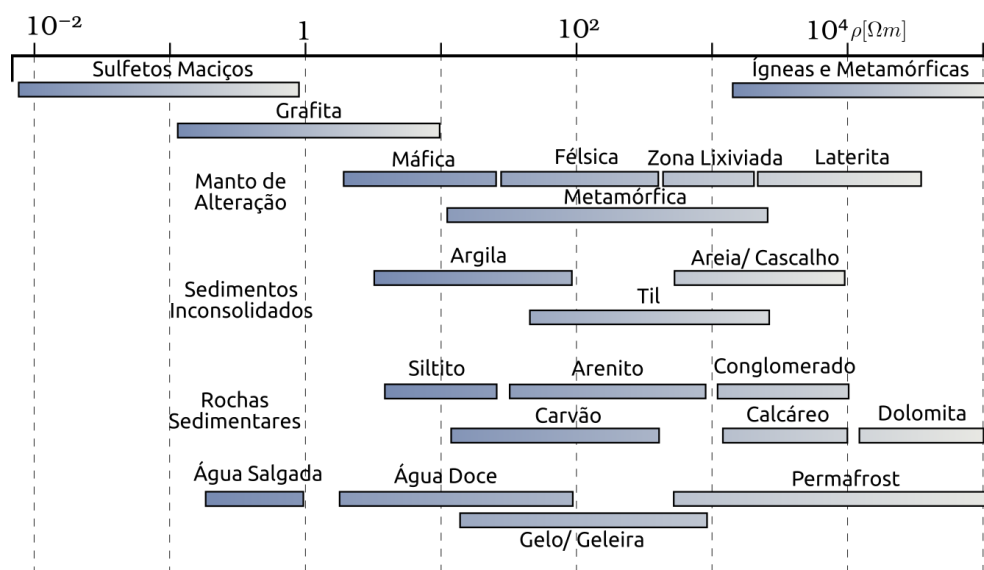
Figura 1 – Arranjo para obter experimentalmente a resistividade de um material geológico.



Fonte: Adaptado (TELFORD; GELDART; SHERIFF, 1990).

Devido a complexidade físico-químicas dos materiais geológicos, a resistividade elétrica é representada por um intervalo de valores. A Figura 2 mostra esses intervalos de valores para alguns tipos de rochas, vale ressaltar que os valores podem ser alterados dependendo do contexto geológico.

Figura 2 – Arranjo para obter experimentalmente a resistividade de um material geológico.



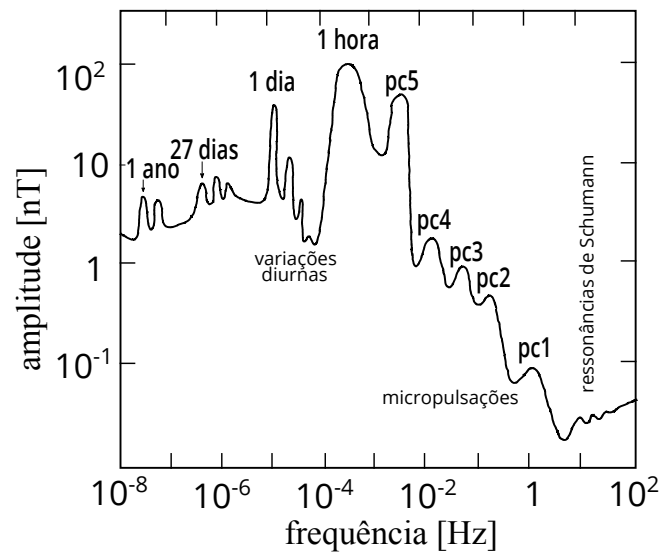
Fonte: Adaptado (PALACKY; WEST, 1991).

3.2 Origem das Correntes Telúricas

O método MT utiliza-se de um amplo espectro do campo eletromagnético natural terrestre (10^{-4} a 10^4 Hz) para as sondagens geofísicas. Essa característica permite que a sondagem magnetotelúrica alcance centenas de quilômetros.

O sinal MT tem sua origem nas ressonâncias de Schumann, nas micropulsações e nas variações diurnas (PÁDUA, 2004). A figura 3 mostra a contribuição de cada mecanismo no espectro MT.

Figura 3 – Campo magnético natural e as contribuições das fontes do sinal MT.



Fonte: (PÁDUA, 2004).

As ressonâncias de Schumann tem sua origem principalmente nas tempestades equatoriais contribuindo para a fonte do sinal MT acima de 1 Hz, as frequências a baixo desse valor, tem origem na interação do vento solar com a magnetosfera, que geram ressonâncias Terra-ionosfera. A contribuição de parte do espectro MT, também pode ser explicada pela distorção do formato do campo magnético terrestre causada pelo Sol durante o dia, esse processo é chamado de variação diurna e contribui com a faixa de frequência de 10^{-5} a 10^{-4} Hz.

3.3 Resposta do Método Magnetotelúrico

O magnetotelúrico assim como outros métodos geofísicos eletromagnéticos, fundamentam-se nas Leis de Maxwell [3.5 – 3.8], pode-se partir das equações estimar os parâmetros físicos para a investigação MT, assim:

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (3.5)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (3.6)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (3.7)$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho \quad (3.8)$$

Onde,

$\vec{E} \rightarrow$ Campo Elétrico [V/m]

$\vec{B} \rightarrow$ Campo Magnético [T]

$\vec{H} \rightarrow$ Campo Magnetizante [A/m]

$\vec{J} \rightarrow$ Densidade de Corrente [A/m^2]

$\vec{D} \rightarrow$ Campo de Deslocamento Elétrico [C/m^2]

$\rho \rightarrow$ Densidade de Carga [C/m^3]

$t \rightarrow$ Tempo [s]

Para os estudos magnetotelúricos são feitas as seguintes afirmações, que auxiliam e simplificam o desenvolvimento:

A Terra comportasse como um condutor ôhmico e um semi-espço isotrópico.

Podemos utilizar, partindo dessas característica e atrelado a um campo eletromagnético pouco intenso as seguintes relações constitutivas:

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (3.9)$$

$$\vec{D} = \varepsilon \vec{E} \quad (3.10)$$

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (3.11)$$

$\mu \rightarrow$ Permeabilidade Magnética [H/m]

$\varepsilon \rightarrow$ Permissividade Elétrica [F/m]

$\sigma \rightarrow$ Condutividade Elétrica [S/m]

Cada coeficiente das relações constitutivas funcionam como tensores, variantes no tempo, para meios anisotrópicos. Para o estudo abordado e seguindo a afirmação, onde a Terra tornasse um meio isotrópico, isso implica que os tensores, μ e ε são estáticos e assumem os seguintes valores:

$$\mu = 1,2566 \times 10^{-6} H/m$$

$$\varepsilon = 8,85 \times 10^{-12} F/m$$

Utilizando as equações constitutivas podemos reescrever as equações 3.5 e 3.6:

$$\begin{aligned}\nabla \times \vec{E} &= -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}; & \vec{B} &= \mu \vec{H} \\ \nabla \times \vec{E} &= -\mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t}\end{aligned}\quad (3.12)$$

$$\begin{aligned}\nabla \times \vec{H} &= \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}; & \vec{J} &= \sigma \vec{E} \quad \text{e} \quad \vec{D} = \varepsilon \vec{E} \\ \nabla \times \vec{H} &= \sigma \vec{E} + \varepsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}\end{aligned}\quad (3.13)$$

Na faixa da sondagem MT a Terra comporta-se como um condutor ôhmico, isso implica que o meio não possuem cargas livres, logo $\rho \simeq 0$.

Para os campos pode ser assumida uma dependência temporal harmônica dada por $e^{-i\omega t}$, que pode ser decomposta em vários harmônicos pela transformada de Fourier, onde t é o tempo e ω a frequência angular.

Portando as equações: 3.12, 3.13, 3.7 e 3.8, podem ser reescritas como:

$$\nabla \times \vec{E} = i\omega\mu\vec{H} \quad (3.14)$$

$$\nabla \times \vec{H} = (i\omega\varepsilon + \sigma)\vec{E} \quad (3.15)$$

$$\nabla \cdot \vec{H} = 0 \quad (3.16)$$

$$\nabla \cdot \vec{E} = 0 \quad (3.17)$$

Aplicando o rotacional na equação 3.15, obtemos:

$$\nabla \times \nabla \times \vec{H} = (i\omega\varepsilon + \sigma)\nabla \times \vec{E} \quad (3.18)$$

Comparando a equação 3.18 com a equação 3.14, pode-se reescreve-la como:

$$\begin{aligned}\nabla \times \nabla \times \vec{H} &= (i\omega\varepsilon + \sigma)\nabla \times \vec{E}; & \nabla \times \vec{E} &= i\omega\mu\vec{H} \\ \nabla \times \nabla \times \vec{H} &= i\omega\mu(i\omega\varepsilon + \sigma)\vec{H}\end{aligned}\quad (3.19)$$

Pode-se expressar a equação 3.19 usando a seguinte identidade vetorial:

$$\nabla \times \nabla \times \vec{A} = \nabla \nabla \cdot \vec{A} - \nabla^2 \vec{A} \quad (3.20)$$

Portanto:

$$\begin{aligned} \nabla \nabla \cdot \vec{H} - \nabla^2 \vec{H} &= i\omega\mu(i\omega\varepsilon + \sigma)\vec{H} \\ \nabla(\nabla \cdot \vec{H}) - \nabla^2 \vec{H} &= \vec{H}[i\omega\mu(i\omega\varepsilon + \sigma)] \xrightarrow{\kappa^2} \\ \nabla(\nabla \cdot \vec{H}) - \nabla^2 \vec{H} &\xrightarrow{0} \kappa^2 \vec{H} \\ \nabla^2 \vec{H} + \kappa^2 \vec{H} &= 0; \quad \kappa^2 = i\omega\mu(i\omega\varepsilon + \sigma) \end{aligned} \quad (3.21)$$

Considerando um condutor ôhmico ($\sigma \gg \omega\varepsilon$), assim:

$$\kappa^2 = i\omega\mu\sigma \quad (3.22)$$

Onde, κ^2 é o módulo do vetor de onda (\vec{k}).

A equação 3.22 pode ser expressa seguindo a definição, como:

$$\begin{aligned} \kappa &= \sqrt{i\omega\mu\sigma}; \quad i = e^{i\frac{\pi}{2}} \\ \kappa &= \sqrt{\omega\mu\sigma} \sqrt{e^{i\frac{\pi}{2}}} \\ \kappa &= \sqrt{\omega\mu\sigma} e^{i\frac{\pi}{4}}; \quad e^{i\frac{\pi}{4}} = \sqrt{1/2}(1 + i) \\ \kappa &= \sqrt{\frac{\omega\mu\sigma}{2}} (1 + i) \\ \kappa &= \frac{(1 + i)}{\delta} \end{aligned} \quad (3.23)$$

Onde,

$$\delta_\omega = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu}} \longrightarrow \delta_f \approx 500 \sqrt{\frac{\rho_a}{f}} \quad (3.24)$$

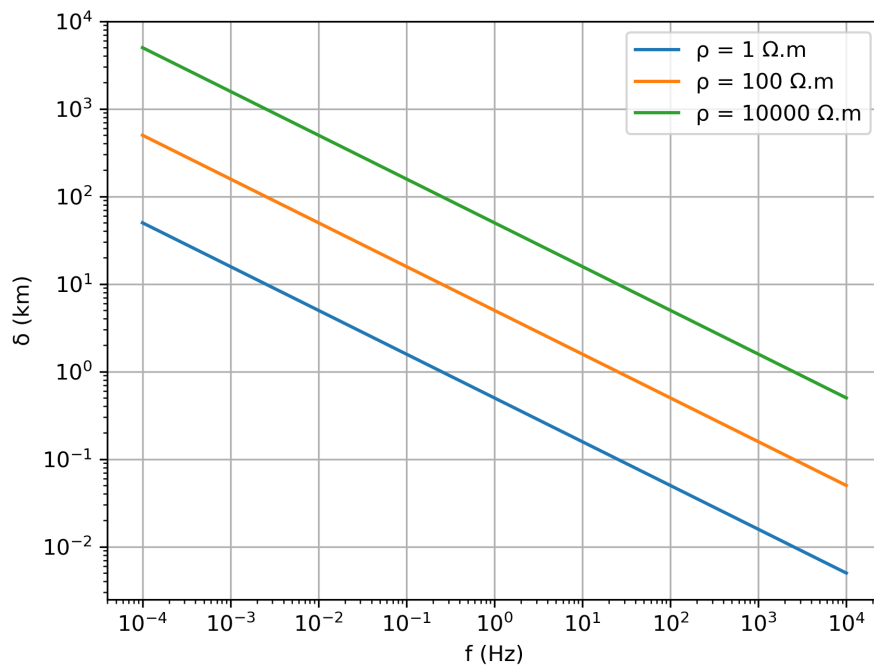
A equação 3.24 é chamada de *skin-depth*², ela representa a profundidade de penetração da onda eletromagnética em um meio condutor. A partir da equação são mapeadas as litologias em subsuperfície. Porém a resistividade (ρ) representa todo o pacote de rochas em subsuperfície, portanto, adota-se o termo resistividade aparente (ρ_a) para a mesma. A resistividade efetiva (ρ) pode ser obtida a partir do processo de inversão geofísica.

O meio geológico influencia diretamente a profundidade de investigação, a figura 4 mostra que para uma mesma frequência, ela pode representar valores diferentes de profundidade, variando o meio em subsuperfície, isso é representado por ρ . Os meios mais resistivos

² Espessura pelicular

geram profundidade maiores, já meios condutivos diminuem a profundidade. Esse fenômeno é importante por que, ao interpretar as seções lito-geofísicas, é comum estudar contextos de bacias sedimentares (meio condutivo) em contato com contextos cristalinos (meio resistivo), a atenção deve-se voltar para o fato de que um mesmo período em função de ρ pode representar duas profundidades diferentes, estando a estação em cima do contexto sedimentar ou em cima do contexto cristalino.

Figura 4 – Gráfico do *skin-depth* em função da frequência [Hz], variando a resistividade do meio



Fonte: O autor, 2018.

3.4 Impedância Eletromagnética

Baseado na fundamentação teórica apresentada a seção anterior, o MT busca obter a resistividade aparente em função da profundidade.

A solução da equação 3.21 e da sua análoga para o campo \vec{E} são dadas por:

$$\vec{H}(\vec{r}) = \vec{H}e^{-\vec{k} \cdot \vec{r}} \quad (3.25)$$

$$\vec{E}(\vec{r}) = \vec{E}e^{-\vec{k} \cdot \vec{r}} \quad (3.26)$$

Substituindo a equação 3.25 e 3.26 em 3.15, temos:

$$\begin{aligned}
\nabla \times \vec{H} e^{-\vec{k} \cdot \vec{r}} &= (\omega \varepsilon + \sigma) \vec{E} e^{-\vec{k} \cdot \vec{r}}; \quad \sigma \gg \omega \varepsilon \\
\nabla \times \vec{H} e^{-\vec{k} \cdot \vec{r}} &= \sigma \vec{E} e^{-\vec{k} \cdot \vec{r}}; \quad \sigma = \frac{\kappa^2}{\omega \mu} \\
\nabla \times \vec{H} e^{-\vec{k} \cdot \vec{r}} &= \frac{\kappa^2}{\omega \mu} \vec{E} e^{-\vec{k} \cdot \vec{r}}
\end{aligned} \tag{3.27}$$

Usando as identidades:

$$\nabla(e^{-\vec{k} \cdot \vec{r}}) = -e^{-\vec{k} \cdot \vec{r}} \vec{k} \tag{3.28}$$

$$\nabla \times \vec{C}(f(\vec{r})) = -\vec{C} \times \nabla f(\vec{r}) \tag{3.29}$$

Pode-se reescrever a equação 3.27:

$$\begin{aligned}
-\vec{H} \times (-e^{-\vec{k} \cdot \vec{r}} \vec{k}) &= \frac{\kappa^2}{\omega \mu} \vec{E} e^{-\vec{k} \cdot \vec{r}} \\
e^{-\vec{k} \cdot \vec{r}} (\vec{H} \times \vec{k}) &= e^{-\vec{k} \cdot \vec{r}} \frac{\kappa^2}{\omega \mu} \vec{E} \\
\vec{E} &= \frac{\omega \mu}{\kappa^2} \vec{H} \times \vec{k} \\
\vec{E} &= \frac{\omega \mu}{\kappa} \vec{H} \times \frac{\vec{k}}{\kappa}
\end{aligned} \tag{3.30}$$

A relação \vec{k}/κ é o versor de \vec{k} ou \hat{k} , representando a ortogonalidade entre \vec{H} e \vec{E} .

A partir da equação anterior pode ser definido que $Z = \omega \mu / \kappa$, esta definição é conhecida como impedância intrínseca do meio ou impedância eletromagnética, também pode ser representada da seguinte forma:

$$Z = \frac{|\vec{E}|}{|\vec{H}|} = \frac{\omega \mu}{\kappa} = \sqrt{\omega \mu \rho} e^{\gamma \frac{\pi}{4}} \tag{3.31}$$

A impedância eletromagnética (Z) pode ser decomposta em função das componentes de \vec{E} e \vec{H} , representada na forma matricial:

$$\begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} H_x \\ H_y \end{pmatrix} \tag{3.32}$$

O método MT, então, obtém a resistividade aparente a partir da impedância eletromagnética, e atribui a ela uma profundidade, onde pode ser definida pela função de *skin-depth* (equação 3.24).

4 AQUISIÇÃO DE DADOS E DEPENDÊNCIAS

Neste capítulo será discutido como é realizada a aquisição de dados MT, e quais as técnicas atualmente utilizadas para o processamento dos dados. Também será mostrado quais as dependências que foram necessárias para a construção do *software*, dentre elas estão: Kivy, EMTF (Dnff e TranMT) e conversores de dados.

4.1 Aquisição de Dados MT

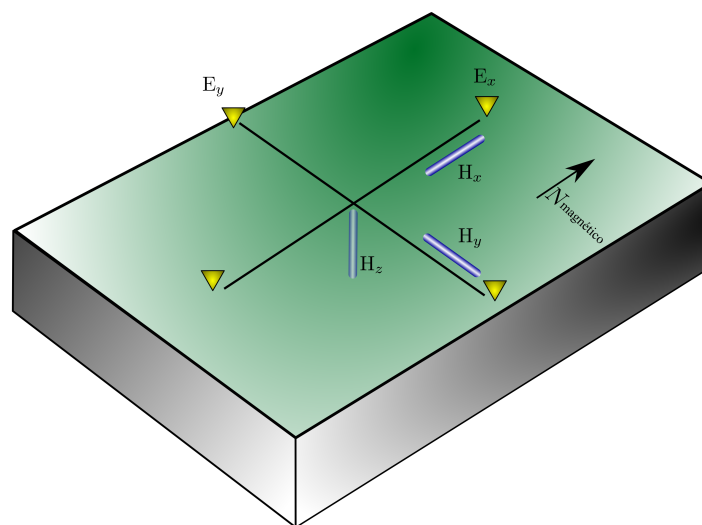
A aquisição de dados MT consiste na obtenção dos campos elétricos (E_x e E_y) e magnéticos (H_x , H_y e H_z), onde são os parâmetros essenciais para o cálculo da impedância (Z), equação 3.30 e 3.32.

Devido a sensibilidade do sinal das sondagens MT, os sensores devem proporcionar uma alta relação sinal/ruído e alta capacidade de ampliar o sinal medido.

O arranjo amplamente adotado para aquisição, são três magnetômetros distribuídos cada um paralelo a um eixo cartesiano, responsáveis pelos campos magnéticos. Para os campos elétricos, são distribuídos dois arranjos de eletrodos não polarizados, onde são acoplados horizontalmente, no sentido x e y . A figura 5 mostra a disposição dos sensores na superfícies.

Vale ressaltar que o eixo x da composição cartesiana deve estar paralelo a direção do fluxo magnético terrestre, ou seja, direcionado ao polo geomagnético terrestre¹.

Figura 5 – Arranjo para Aquisição de dados MT.



Fonte: O autor, 2018.

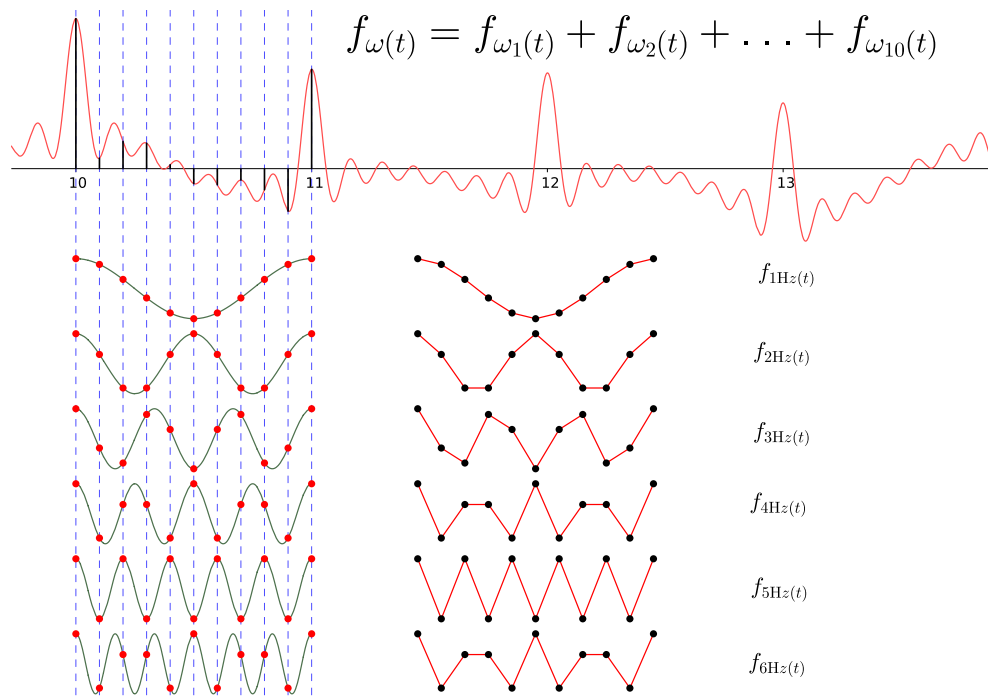
¹ Ponto na superfícies terrestre, onde, a inclinação magnética do modelo matemático para o campo magnético é $+90^\circ$

Os sensores registram a variação da amplitude do sinal em função do tempo, esses registros são chamados de series temporais e são considerados os dados brutos do método.

Devido ao grande intervalo do espectro eletromagnético que abrange as sondagens MT (10^{-4} Hz a 10^4 Hz), são configuradas varias taxas de aquisições diferentes. Para cada escolha de taxa de aquisição é considerada a representatividade do sinal respeitando a frequência de Nyquist (NYQUIST, 1928). A representatividade é muito importante, pois, o sinal medido pelos sensores é a composição de várias ondas com frequências angulares diferentes, se a taxa de aquisição for menor que duas vezes a frequência da onda, ela não pode ser representada fielmente.

A figura 6 exemplifica o conceito apresentado no paragrafo anterior, no exemplo é mostrado a composição de um onda com 10 frequências diferentes ($f_{\omega(t)}$), variando de 1 a 10 Hz , se atribuirmos à ela uma taxa de aquisição de 10 Hz pode-se perceber que a frequência de 6 Hz não é representada corretamente, já percebe-se que para a frequência de 1 Hz é super representada, isso acaba aumentando o tamanho dos arquivos de aquisição. A escolha da taxa de aquisição deve conciliar na melhor forma possível esses dois fatos.

Figura 6 – Aquisição de Dados Discretos.



Fonte: O autor, 2018.

As taxas de aquisições comumente utilizadas são valores estimados por potências de 2, isso facilita na decomposição das frequências pela transformada de Fourier. Cada taxa de aquisição é chamada de *Banda* e varia de nome para cada equipamento utilizado.

4.2 Processamento de Dados MT

Tradicionalmente o grande processamento de dados geofísicos é chamado de inversão, onde esse tenta ajustar um modelo físico que melhor represente o conjunto de dados. Porém para dados MT faz-se necessário antes das técnicas de inversão, o pré-processamento.

O pré-processamento consiste, sucintamente, em realizar processamentos de filtragem, tratamentos estatísticos, conversão de dados, mudança de domínios e mesclagem de arquivos.

A primeira etapa do pré-processamento é a conversão dos arquivos de binários para ASCII, esse processo é opcional, porém como boa prática é realizado para melhorar a legibilidade por parte dos usuários sobre os dados.

Após a conversão são realizadas técnicas de filtragem, a mudança do domínio dos dados de tempo para frequência angular, e cálculo do tensor impedância (Z). Esse processo será demonstrado mais detalhadamente na seção 4.4, cuja a técnica recebe o nome de processamento robusto, EMTF (EGBERT; BOOKER, 1986). Atualmente é a técnica mais confiável e amplamente utilizadas no meio acadêmico para tratamento dos dados.

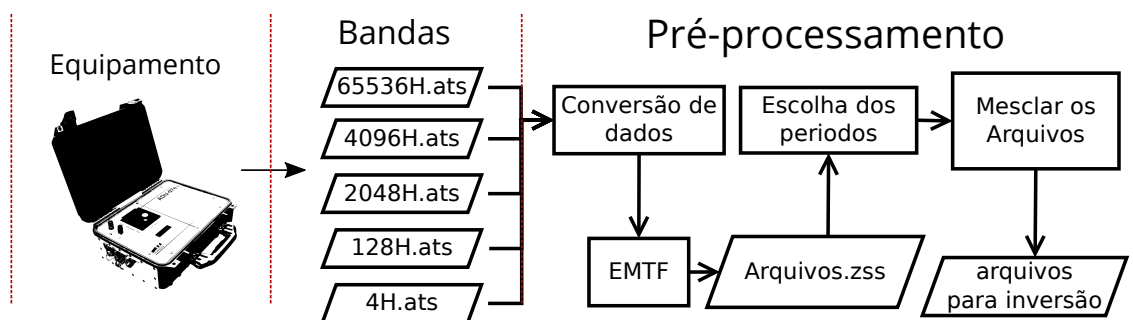
Como comentado na seção anterior, devido as limitações dos equipamentos, os dados são coletados separadamente para cada banda. Esta, após o processamento robusto, gera um arquivo com extensão .zss. Nesses arquivos estão armazenados os tensores de impedância, ou seja, cada componente da matriz Z , para cada período.

A etapa seguinte do processamento consiste em escolher, dentro de todos arquivos, a melhor composição dos períodos para todo o espectro de estudo, esse processo é minucioso e depende da experiência do usuário. Nessa etapa deve-se plotar cada arquivo e verificar a sua coerência dentro do conjunto total dos dados.

A última etapa do pré-processamento é mesclar os períodos escolhidos em um único arquivo, esses arquivos contem todas as informações necessárias para realizar os processos de inversão.

A figura 7 ilustra as etapas de pré-processamento.

Figura 7 – Fluxograma de Pré-processamento.



4.3 Formatos de Arquivos de Dados MT

Parte das funções do *software* desenvolvido será a simplificação no processo de conversão de dados, atualmente os formatos mais utilizados, são:

TS-format → *Time Series Format (.ats)*
Z-file → *Z (Impedance Tensor) File (.zss)*
J-format → *Jones Format (.dat)*

Os arquivos *TS* são utilizados para registrar as series temporais, onde são armazenadas as amplitudes registradas pelos sensores em função do tempo. A grande parte dos equipamentos tem como saída padrão a forma binária dos arquivos *TS*. Os arquivos binários podem posteriormente serem convertidos para o formato ASCII, usando uma rotina específica (**ats2asc**).

O arquivo *TS* é composto por dois blocos, o primeiro é destinado a comentários e configurações da aquisição, já o segundo compõe o bloco de dados, distribuídos em cinco colunas, cada uma registra a amplitude do sinal dos sensores H_x , H_y , H_z , E_x e E_y . O tempo associado a cada registro pode ser estimado pela hora de inicio e a taxa de aquisição da rodada.

Exemplo de arquivo *TS* (ASCII):

```
# time series file from mp2ts
# date: Mon May 12 10:15:57 1997
# input file: sno101/sno101as.1mp
# site description: KM 222.5
# Latitude      :062:39:47 N
# Longitude     :116:12:32 W
# LiMS          number :          52
# Magnetometer number :          52
# Ex line length (m):    100.0000000
# Ey line length (m):    100.0000000
# Azimuths relative to: MAGNETIC NORTH
# Ex azimuth;         -17
# Ey azimuth;          73
# Hx azimuth;         -17
# Hy azimuth;          73
1.98250  0.878400  3.64780  1.10889  2.02644
1.93980  0.976000  3.65390  1.15682  2.01610
```

(JONES, 1999)

Após realizar a transformada de Fourier e o calculo do tensor impedância, não são mais necessários carregar todas as informações das series temporais, pois a partir do tensor impedância é possível estimar todos os parâmetros associados a cada período, tais como: ρ_a , ϕ e as componentes do próprio tensor: Z_{xx} , Z_{xy} , Z_{yx} e Z_{yy} , as componentes do tensor são importantes para a interpretação da adimensionalidade dos dados.

Como discutido na seção anterior a saída padrão do TranMT (programa adotado para os cálculos do tensor impedância), são os arquivos .zss, esses arquivos são estruturados na forma de blocos, onde, cada bloco representa um período e nele contem o próprio tensor impedância, a matriz de covariância inversa e a matriz de covariância residual.

Exemplo de arquivo Z:

```

**** IMPEDANCE IN MEASUREMENT COORDINATES ****
***** WITH FULL ERROR COVARINCE*****
Robust Single station
station      :ufb104a091_03B
coordinate  -10.47560  -38.43750  declination  -23.00
number of channels  5    number of frequencies  16
orientations and tilts of each channel
    1      0.00      0.00 ufb104a  Hx
    2     90.00      0.00 ufb104a  Hy
    3      0.00      0.00 ufb104a  Hz
    4      0.00      0.00 ufb104a  Ex
    5     90.00      0.00 ufb104a  Ey
period : 1.116071E-03    decimation level  1    freq. band from
1600 to  1984
number of data point  29853 sampling freq. 4.096000E+03 Hz
Transfer Functions
  3.7279E-03  5.5604E-03 -1.2527E-03 -4.9609E-03
  5.7064E+01  1.7047E+01  3.1437E+02  2.1458E+02
 -2.6267E+02 -1.9591E+02 -3.2340E+01 -1.3460E+00
Inverse Coherent Signal Power Matrix
  1.3513E+05  0.0000E+00
 -1.3265E+04  1.9036E+03  1.5955E+04  0.0000E+00
Residual Covariance
  3.2219E-11  0.0000E+00
  6.8311E-10 -1.4571E-10  1.4028E-04  0.0000E+00
  1.2952E-10  2.3198E-10 -7.8350E-07 -1.5203E-07  1.3332E-04  0.0000E+00

```

A partir dos arquivos Z (.zss), pode-se calcular a resitividade aparente (ρ_a) a partir da seguinte equação (EGBERT, 1998):

$$\rho_a = \frac{T|Z_{ij}|^2}{5} \quad (4.1)$$

$T \rightarrow$ Período [s]

$Z_{ij} \rightarrow$ Componente do tensor Z [Ω]

e para se obter a fase (ϕ) pode-se calcular, a partir:

$$\phi = \frac{180}{\pi} \arctan \left[\frac{\Im(Z_{ij})}{\Re(Z_{ij})} \right] \quad (4.2)$$

$\Im(Z_{ij}) \rightarrow$ Componente imaginária de $Z [\Omega]$

$\Re(Z_{ij}) \rightarrow$ Componente real de $Z [\Omega]$

Os erros associados a cada componente podem ser obtidos a partir das matrizes de covariância, assim como os erros para ρ_a e ϕ .

Os arquivos J , análogo aos arquivos Z , armazenam as informações do tensor, porém, a estrutura é mais sintetizada. Os arquivos são estruturados em dois blocos, um destinado a configurações, tais como: localização, elevação, nome da estação e azimuth. O segundo bloco é destinado aos dados (JONES, 1994).

A estrutura base utilizada para os dados é composta por quatro sub-blocos, cada um representando uma componente do tensor. O sub-bloco é dividido em cinco colunas, onde assumem respectivamente a seguinte ordem:

Zij SI units (ohms)	< componente
n	< numero de periodos
periodo(n) Real Imaginario	Erro Peso

Os arquivos J recebem a extensão *.dat*, e são os arquivos necessários para as etapas de inversão, a adoção desse formato para essa etapa, se dá pela fácil leitura dos períodos e por armazenar toda a sondagem em um único arquivo, ele armazena a mesclagem de todas as diferentes janelas resultantes do processamento EMTF.

Exemplo de arquivo J :

```
>STATION    =bor608b
>AZIMUTH    =    -23.0000
>LATITUDE   =    -8.72768
>LONGITUDE  =   -37.84493
>ELEVATION  =    664.0000
bor608b -23.0
ZXX SI units (ohms)
2
    1.1161e-04    -6.6462e-02    -1.0728e-01    1.7715e-03    1
    1.5625e-04     7.7005e-04    -1.0442e-01    2.9007e-03    1
ZXY SI units (ohms)
2
    1.1161e-04     2.5648e+00     1.2953e+00     2.5613e-03    1
    1.5625e-04     2.4467e+00     1.4059e+00     5.9294e-03    1
ZYY SI units (ohms)
2
    1.1161e-04    -2.3499e+00    -1.1104e+00     1.6657e-03    1
    1.5625e-04    -2.3904e+00    -1.2251e+00     3.0355e-03    1
ZXX SI units (ohms)
2
    1.1161e-04     7.1532e-02     3.1711e-02     2.4082e-03    1
    1.5625e-04     5.9528e-02     3.7107e-02     6.2053e-03    1
```

4.4 Processamento Robusto – EMTF

O processamento dos dados parte primeiramente da análise espectral, onde primeiro faz-se necessário a mudança do domínio do tempo para a frequência angular e em seguida a filtragem, remoção de tendências e de dados ruins.

O pacote EMTF (EGBERT, 1997) desenvolvido por Gary D. Egbert, é um conjunto de programas escrito em *Fortran 77* que realizam processamento tais como: mudança de domínio, cálculo do tensor impedância, plotagem e alguns tipos de conversores de dados.

A mudança do domínio do tempo para frequência angular é realizado pelo programa *Dnff*, contido no pacote, esse programa realiza a troca do domínio através da *cascade decimation* (WIGHT; BOSTICK, 1980 apud PÁDUA, 2004) uma alternativa ao FFT (*Fast Fourier Transform*²). Antes de efetuar a transformada de Fourier, as séries temporais são re-amostradas, essas re-amostragem são chamadas de janelas e tem o objetivo de minimizar as distorções causadas pelas reverberações da transformada de Fourier.

4.5 Pacotes de Processamento do Grupo Geoma – INPE

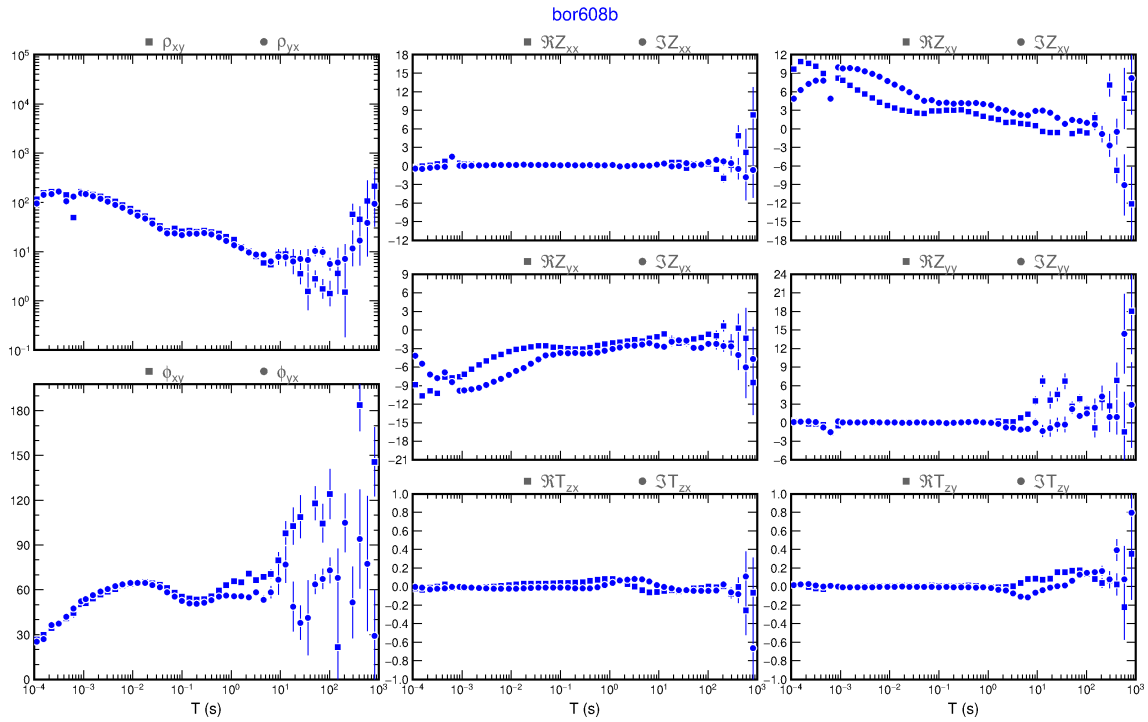
O grupo GEOMA do INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) oferece treinamentos para alunos e colaboradores. O grupo dispõe de um série de *scripts* e programas para auxiliar na manipulação do processamento MT.

Os *scripts* oferecidos para o processamento MT foram desenvolvidos, em grande parte, pelo Dr. Marcelo Banik de Pádua e pelo Me. Marcos Banik de Pádua. O programa desenvolvido faz uso dos *scripts* como “ponte” entre a interface e o os programas EMTF, como também para conversores de dados. Um exemplo é o programa *processamentoZ* que prepara os dados e extraí os parâmetros necessários para as rotinas *Dnff* e *TranMT*.

Para as plotagens dos gráficos é utilizado o programa GMT (NATIONAL SCIENCE FOUNDATION, 2018), figura 8. Embora o programa desenvolvido tenha a sua própria saída gráfica, foi desenvolvida uma extensão que exporta as imagens utilizando o *Kernel* do GMT, essa extensão visa não causar estranheza em usuários já acostumados com as imagens geradas pelo GMT.

² Transformada Rápida de Fourier

Figura 8 – Saída Gráfica Gerada pelo *script: plot-cmp-tf*, utilizando o GMT.



Fonte: O autor, 2018.

5 DESENVOLVIMENTO E RESULTADOS DO PAMPAMT

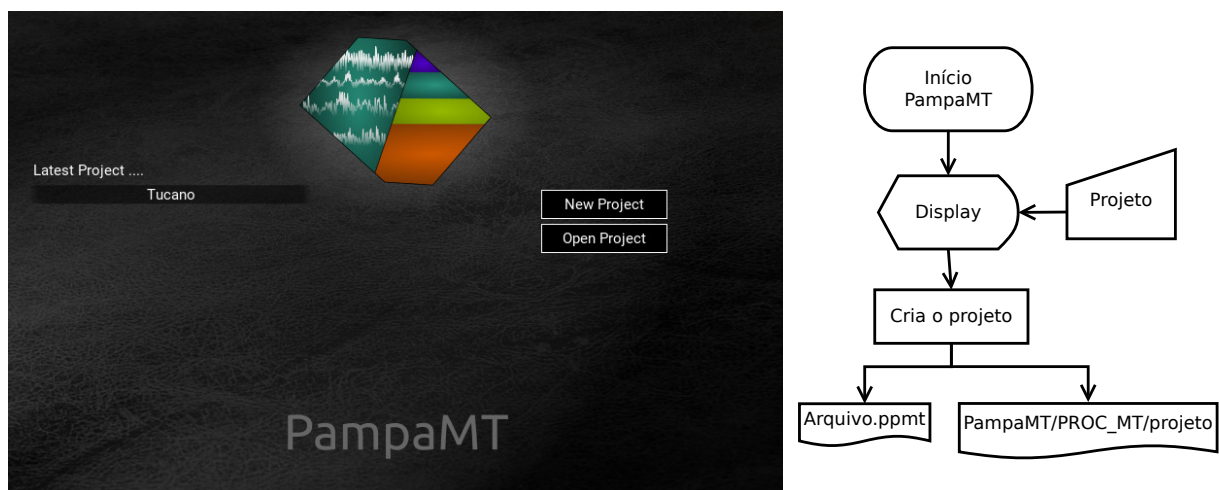
O *software* desenvolvido recebeu o nome de PampaMT, em homenagem a Universidade Federal do Pampa. O desenvolvimento iniciou-se em janeiro de 2018, com o primeiro protótipo de codinome RiMT, para testar os conceitos e a viabilidade das funções para o programa, em junho de 2018 o código foi reestruturado e reescrito, atentando para os problemas e adicionando novas funções. A principal mudança foi a construção do *software* em módulos, facilitando a adição de novas funções.

No apêndice A pode ser encontrado o caminho para o código fonte do programa, junto com as informações para a instalação. O PampaMT foi desenvolvido para ambiente Linux rodando em base Debian. O código foi escrito em *Python*, com alguns trechos escritos em *Shell* para instalação e comunicação da interface com os executáveis dos programas Dnff e TranMT.

O PampaMT foi dividido em duas etapas: a primeira destinada a criação do projeto; escolha dos arquivos a serem processados e a processamento EMTF. A segunda parte foi destinada a escolha das melhores rodadas e períodos, a maior interação com o usuário é destinada a essa etapa.

A figura 9 mostra a primeira tela ao executar o PampaMT, nela pode-se escolher criar um novo projeto ou abrir um já existente.

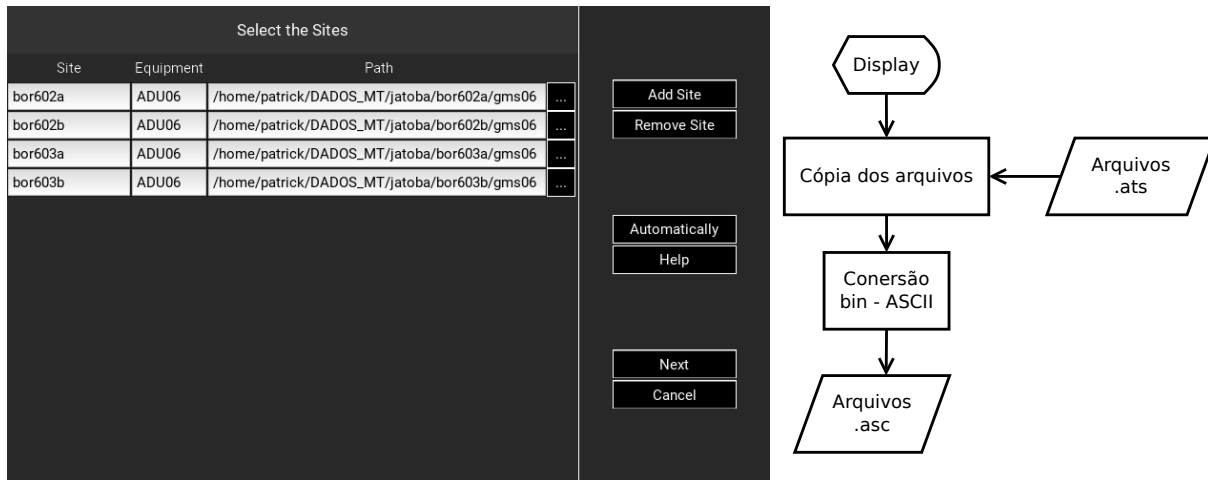
Figura 9 – Tela Inicial PampaMT



Fonte: O autor, 2018.

Após a escolha do diretório para um novo projeto, o usuário é direcionado a escolha dos arquivos *TS*, nele o usuário pode escolher entre três equipamentos: ADU-06, ADU-07 e LiMS, a seleção pode ser automática ou adicionada cada estação individualmente (figura 10).

Figura 10 – Seleção das Estações

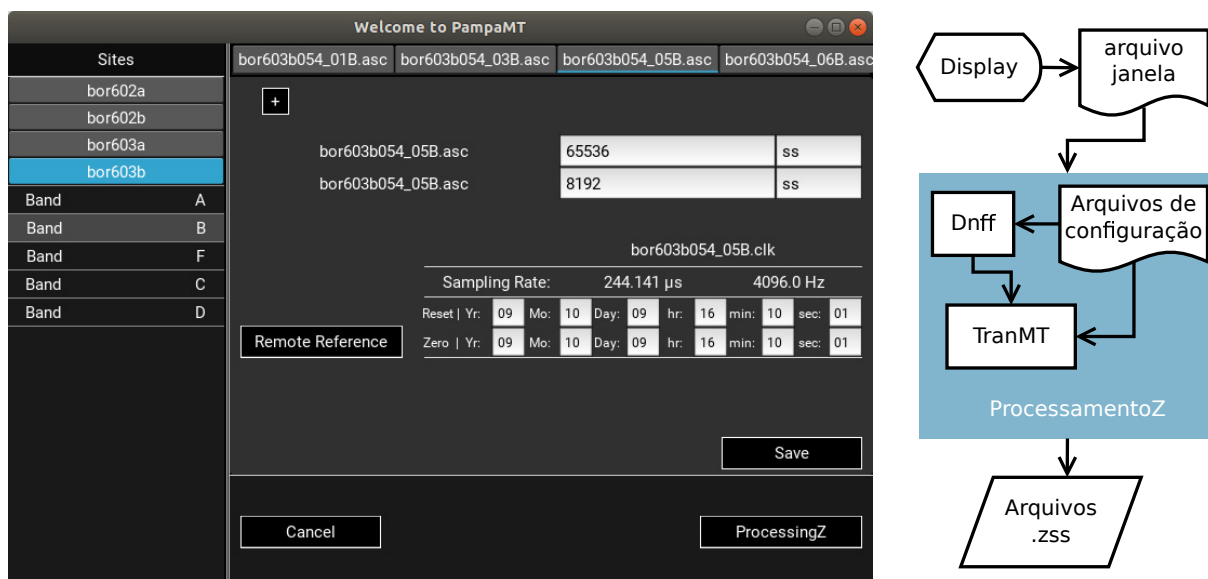


Fonte: O autor, 2018.

Os dados após a seleção, são copiados para o diretório: **DADOS_MT/projeto**, esse processo é realizado para prever eventuais perdas dos arquivos. Os dados então são convertidos e salvos no diretório: **PROC_MT/projeto**

O usuário será levado a tela do processamento EMTF, esse processo já estabelece algumas configurações padrão, o usuário pode alterar qualquer configuração, como escolher uma nova janela ou alterar o horário do relógio dos dados (figura 11).

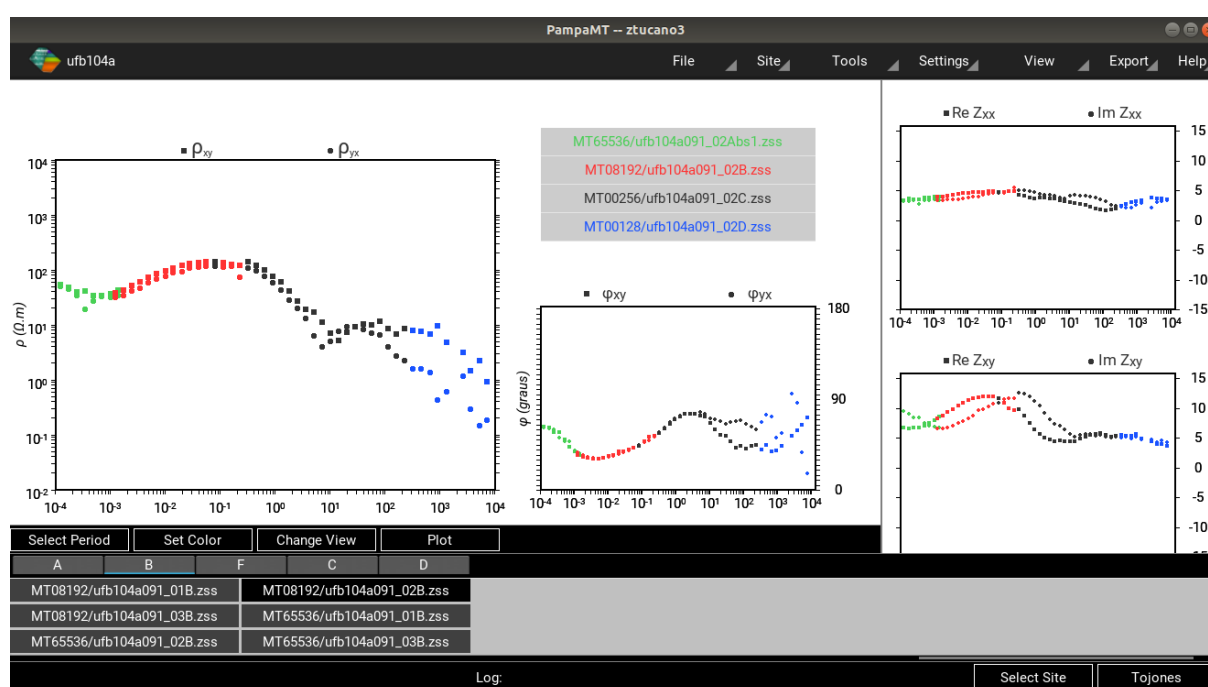
Figura 11 – Tela de Configuração para o EMTF



Fonte: O autor, 2018.

O processo EMTF tende a demorar um tempo considerável, cerca de 1 a 2 minutos para cada estação, para um levantamento típico de 30 estações por perfil esse processo pode demorar de 20 a 30 minutos, visto a grande quantidade de recursos do computador que ele consome. Finalizado o processo EMTF a janela é fechada e inicia-se o tela principal do PampaMT (figura 12).

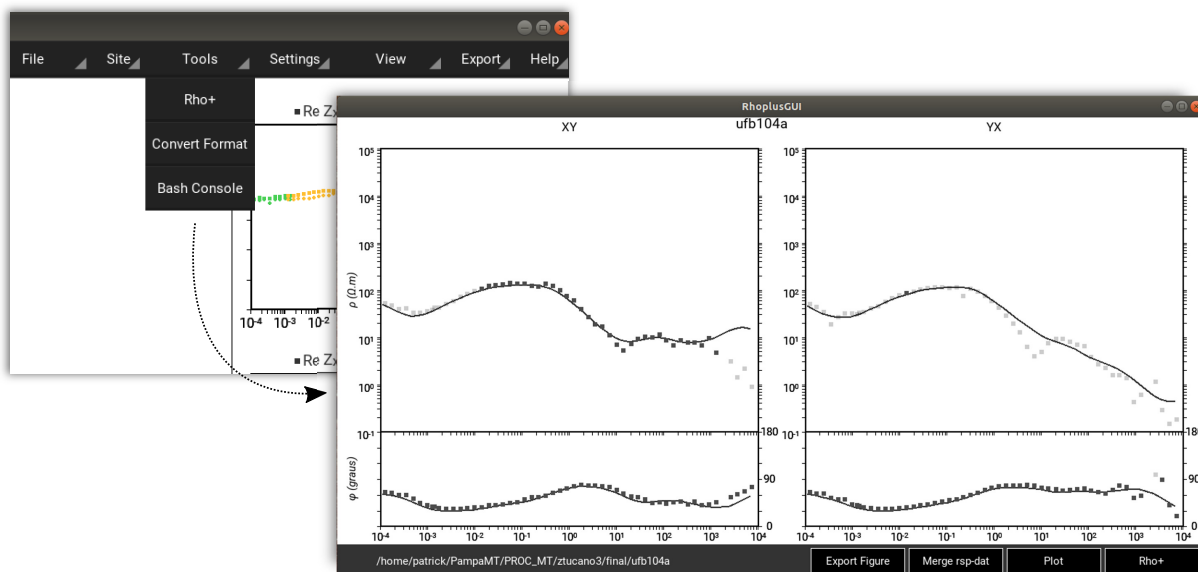
Figura 12 – Tela Principal PampaMT



Fonte: O autor, 2018.

Na tela principal contam todas as funcionalidades do PampaMT, incluindo a etapa de criação de um novo projeto. O carácter modular do PampaMT ajuda na adição de novas funcionalidades, como por exemplo, integração por programas SIG, integração com visualizados de dados, como o GMT, dentre outros. Um exemplo notável é a adição do programa RhoplusGUI em desenvolvido pelo autor, para o projeto PIBIC/INPE/CNPq “Desenvolvimento de Interface Gráfica Amigável para Validação de Dados Magnetotelúrico a Partir do Processamento Rho+”. Esse programa auxilia na manipulação de dados para o processamento Rho+ (PARKER; BOOKER, 1996), onde foi necessário adicionar poucas linhas de código para inclui-lo no PampaMT (figura 13).

Figura 13 – Integração com Outros Programas

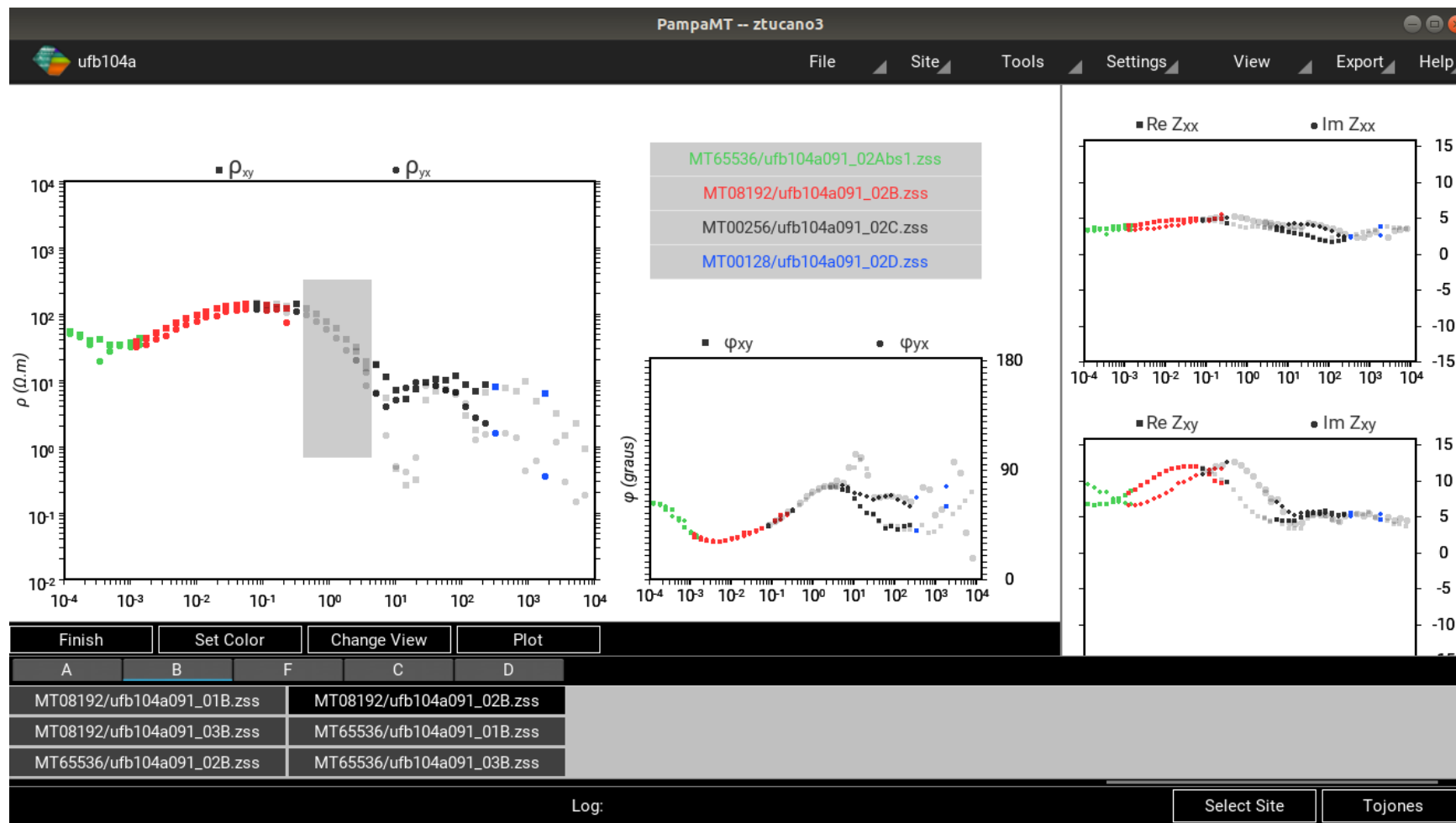


Fonte: O autor, 2018.

A principal função que o usuário utilizará, será a escolha dos melhores períodos e rodadas. Esse processo vinha sendo executado, plotando cada arquivo *.zss* e contando manualmente a posição dos melhores períodos. Então, após a contagem, o usuário deve anotar os pontos que indicam os períodos, e finalmente executar o *script: ToJones*. Esse *script* mescla os arquivos *.zss* com os períodos escolhidos e converte-os para o formato *J (.dat)*.

Esse processo foi incorporado no PampaMT com a escolha dos períodos sendo realizada com o cursor. O usuário habilita a função de seleção, e o programa plota todos os pontos possíveis para a rodada escolhida, por fim o usuário arrasta uma janela de seleção e todos os períodos contidos nessa janela são selecionados (figura 14).

Figura 14 – Seleção dos Períodos



Fonte: O autor, 2018.

Após escolher os melhor períodos o usuário pode executar o *script*: *ToJones*, onde esse é realizado ao pressionar o botão no canto inferior esquerdo, o PampaMT abre uma caixa de diálogo para nomear o arquivo de saída, e executa o *ToJones*, finalizando a ultima etapa do pré-processamento.

A utilização do PampaMT para o pré-processamento elimina completamente o uso de linhas de comando, assim o tempo de processamento e aprendizagem é diminuído drasticamente. Para efeitos de comparação, ao utilizar o programa em fase alfa, usuários que nunca tiveram contato com o terminal *Shell*, puderam executar e processar os dados com sucesso.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Rodando a versão de teste interno (versão alfa), a utilização do PampaMT para processamentos sugere que o principal fator, o tempo, foi drasticamente reduzido. O que tornou o processamento de dados magnetotélúricos mais dinâmico.

A continuidade desse trabalho será ampliar o uso do PampaMT, adicionando novas funções, tais como: processos de inversão, modelagem, referência remota, dentre outros.

REFERÊNCIAS

- CAGNIARD, L. Basic theory of the magneto-telluric method of geophysical prospecting. **Geophysics**, Society of Exploration Geophysicists, v. 18, n. 3, p. 605–635, 1953.
- EGBERT, G. D. Robust multiple-station magnetotelluric data processing. **Geophysical Journal International**, Blackwell Publishing Ltd Oxford, UK, v. 130, n. 2, p. 475–496, 1997.
- EGBERT, G. D. **Errors Bars for Transfer Function Elements in Z-files**. [S.l.], 1998. Disponível em: <ftp://ftp.oce.orst.edu/dist/egbert/EMTF/EMTF.tar.gz>. Acesso em: 07 out. 2018.
- EGBERT, G. D.; BOOKER, J. R. Robust estimation of geomagnetic transfer functions. **Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society**, Wiley Online Library, v. 87, n. 1, p. 173–194, 1986.
- HAYT, W. H.; BUCK, J. A. **Eletromagnetismo**. 8. ed. Porto Alegre, Brazil: AMGH Editora Ltda., 2013.
- JONES, A. G. **Magnetotelluric data file J-format: v2.0**. [S.l.], 1994. Disponível em: <http://mtnet.info/docs/jformat.txt>. Acesso em: 07 out. 2018.
- JONES, A. G. **TS Format v1.3**. Ottawa, 1999. Disponível em: <http://mtnet.info/docs/ts.format.txt>. Acesso em: 02 out. 2018.
- MTNET. 2018. MTNet. Disponível em: <http://mtnet.info/main/index.html>. Acesso em: 19 set. 2018.
- NATIONAL SCIENCE FOUNDATION. **The Generic Mapping Tools**. [S.l.], 2018. Disponível em: <http://gmt.soest.hawaii.edu/>. Acesso em: 07 out. 2018.
- NYQUIST, H. Certain topics in telegraph transmission theory. **Transactions of the American Institute of Electrical Engineers**, IEEE, v. 47, n. 2, p. 617–644, 1928.
- PÁDUA, M. B. d. **Estudos de indução eletromagnética na caracterização de estruturas profundas sob a borda sul do cráton de São Francisco**. Tese (Doutorado) — Brasil. Ministério da Ciência e Tecnologia. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), 2004.
- PALACKY, G.; WEST, G. Airborne electromagnetic methods. In: **Electromagnetic Methods in Applied Geophysics: Volume 2, Application, Parts A and B**. [S.l.]: Society of Exploration Geophysicists, 1991. p. 811–880.
- PARKER, R. L.; BOOKER, J. R. Optimal one-dimensional inversion and bounding of magnetotelluric apparent resistivity and phase measurements. **Physics of the Earth and Planetary Interiors**, Elsevier, v. 98, n. 3-4, p. 269–282, 1996.
- PARKINSON, W. D. **Introduction to Geomagnetism**. Edinburgh: Scottish Academic Press, 1983.
- TELFORD, W. M.; GELDART, L. P.; SHERIFF, R. E. **Applied Geophysics**. New York, USA: British Library Cataloguind, 1990.
- TIKHONOV, A. On determining electric characteristics of the deep layers of the earth's crust. **Dokl. Acad. Nauk. SSSR**, v. 73, p. 295–297, 1950.

WIGHT, D.; BOSTICK, F. Cascade decimation—a technique for real time estimation of power spectra. In: IEEE. **Acoustics, Speech, and Signal Processing, IEEE International Conference on ICASSP'80**. [S.l.], 1980. v. 5, p. 626–629.

APÊNDICE A – CÓDIGO FONTE PAMPAMT

O programa PampaMT esta armazenado no servidor GitHub, atualmente é a maior comunidade de códigos fontes, nela podemos encontrar o *Kernel* Linux, a plataforma SU (*Seismic Unix*), o pacote $\text{abnT}_{\text{E}}\text{X}_2$, dentre um vasto catálogo de outros projetos.



\langle <https://github.com/PatrickRogger/PampaMT> \rangle