

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA**

**PATRICK ROgger GARCIA**

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

**Caçapava do Sul  
2018**

**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.

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.

37p. : 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.

## RESUMO

Este trabalho trata do desenvolvimento um Software para o processamento de dados magnetotélúrico (MT), esse projeto foi idealizado visto a carência de programas para o trabalho com estes tipos de dados. O programa desenvolvido realiza as etapas de processamento dos dados desde a coleta, realizada pelos equipamentos do tipo Metronix ADU06 ou ADU07, até as etapas de visualização, passando por processamentos estatísticos, conversão de formatos de arquivos e processamento robusto. Todo o programa foi desenvolvido utilizando a linguagem de programação Python sob a licença de software Livre, o programa une inúmeros *scripts* e rotinas consagrados no processamento de dados magnetotélúrico, onde esses processamentos serão feitos através de uma interface gráfica. Facilitando, assim, as etapas de processamentos para os novos usuários. O que se contra põe aos *scripts* e rotinas disponíveis atualmente para o processamento de dados que utilizam apenas linhas de comando e procedimentos excessivamente manuais. Tais fatores, muitas vezes, afasta novos pesquisadores o que restringe este processamento a pequenos núcleos de pesquisadores. O intuito final do trabalho é tornar o processamento MT mais dinâmico através deste novo programa.

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

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Campo magnético natural e as contribuições das fontes do sinal MT. . . . .	13
Figura 2 – Gráfico do <i>skin-depth</i> . . . . .	17
Figura 3 – Arranjo para Aquisição de dados MT. . . . .	19
Figura 4 – Aquisição de Dados Discretos. . . . .	20
Figura 5 – Fluxograma de Pré-processamento. . . . .	21
Figura 6 – Saída Gráfica Gerada pelo <i>script: plot-cmp-tf</i> , utilizando o GMT. . . . .	26
Figura 7 – Tela Inicial PampaMT . . . . .	27
Figura 8 – Seleção das Estações . . . . .	28
Figura 9 – Tela de Configuração para o EMTF . . . . .	28
Figura 10 – Tela Principal PampaMT . . . . .	29
Figura 11 – Integração com Outros Programas . . . . .	30
Figura 12 – Seleção dos Períodos . . . . .	31

## **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

$\sigma$	Condutividade Elétrica
$\rho$	Resistividade Elétrica
$\rho_a$	Resistividade Elétrica Aparente
$\nabla \times$	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
$\varrho$	Densidade de Carga
$t$	Tempo
$\mu$	Permeabilidade Magnética
$\varepsilon$	Permissividade Elétrica
$i$	Unidade Imaginária

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO . . . . .</b>	<b>9</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS . . . . .</b>	<b>11</b>
<b>2.1</b>	<b>Objetivo Geral . . . . .</b>	<b>11</b>
<b>2.2</b>	<b>Objetivos Específicos . . . . .</b>	<b>11</b>
<b>3</b>	<b>FUNDAMENTOS DO MÉTODO MAGNETOTELÚRICO . . . . .</b>	<b>13</b>
<b>3.1</b>	<b>Origem das Correntes Telúricas . . . . .</b>	<b>13</b>
<b>3.2</b>	<b>Resposta do Método Magnetotelúrico . . . . .</b>	<b>14</b>
<b>3.3</b>	<b>Impedância Eletromagnética . . . . .</b>	<b>17</b>
<b>4</b>	<b>AQUISIÇÃO DE DADOS E DEPENDÊNCIAS . . . . .</b>	<b>19</b>
<b>4.1</b>	<b>Aquisição de Dados MT . . . . .</b>	<b>19</b>
<b>4.2</b>	<b>Processamento de Dados MT . . . . .</b>	<b>21</b>
<b>4.3</b>	<b>Formatos de Arquivos de Dados MT . . . . .</b>	<b>22</b>
<b>4.4</b>	<b>Processamento Robusto – EMTF . . . . .</b>	<b>25</b>
<b>4.5</b>	<b>Pacotes de Processamento do Grupo Geoma – INPE . . . . .</b>	<b>25</b>
<b>5</b>	<b>DESENVOLVIMENTO E RESULTADOS DO PAMPAMT . . . . .</b>	<b>27</b>
<b>6</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS . . . . .</b>	<b>33</b>
	<b>REFERÊNCIAS . . . . .</b>	<b>35</b>
	<b>APÊNDICE A – CÓDIGO FONTE PAMPAMT . . . . .</b>	<b>37</b>



## 1 INTRODUÇÃO

A interação do vento solar com a magnetosfera terrestre, gera correntes elétricas na alta atmosfera. Essas correntes são chamadas de correntes telúricas, visto que elas apresentam a propriedade de penetrar e se propagar por todo o interior da Terra. A indução gerada pela propagação das correntes telúricas forma o sinal analítico do método geofísico magnetotelúrico –MT (PARKINSON, 1983). As aplicações do MT giram em torno da prospecção de petróleo e estudos crustais. A 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, 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. Essa será 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;

### 3 FUNDAMENTOS DO MÉTODO MAGNETOTELÚRICO

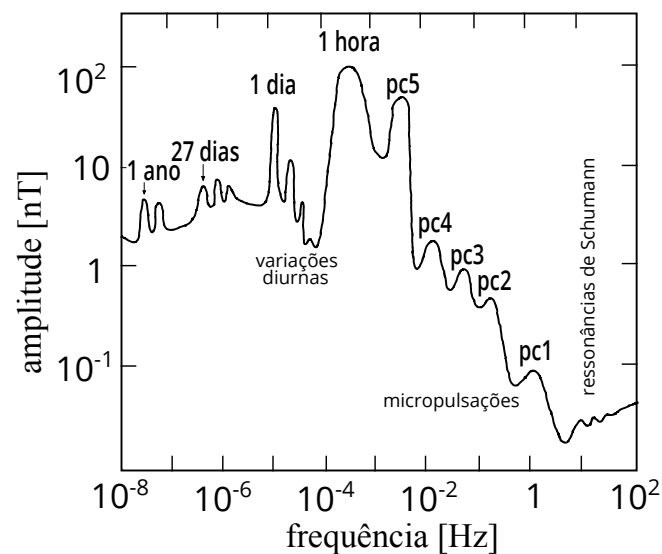
Proposto com (TIKHONOV, 1950) e (CAGNIARD, 1953) o método magnetotelúrico usa as fontes passivas<sup>1</sup> eletromagnéticas do planeta Terra para estudar e mapear a subsuperfície.

#### 3.1 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 1 mostra a contribuição de cada mecanismo no espectro MT.

Figura 1 – 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.

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

### 3.2 Resposta do Método Magnetotelúrico

O magnetotelúrico assim como outros métodos geofísicos eletromagnéticos, fundamentam-se nas Leis de Maxwell [3.1 – 3.4], pode-se partir das equações para estimar os parâmetros físicos para a investigação MT, assim:

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (3.1)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (3.2)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (3.3)$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho \quad (3.4)$$

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-espaco isotrópico.

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

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (3.5)$$

$$\vec{D} = \varepsilon \vec{E} \quad (3.6)$$

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (3.7)$$

$\mu \rightarrow$  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,  $\mu$  e  $\varepsilon$  são estáticos e assumem os seguintes valores:

$$\begin{aligned}\mu &= 1,2566 \times 10^{-6} H/m \\ \varepsilon &= 8,85 \times 10^{-12} F/m\end{aligned}$$

Utilizando as equações constitutivas podemos reescrever as equações 3.1 e 3.2:

$$\begin{aligned}\nabla \times \vec{E} &= -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}; & \vec{B} &= \mu \vec{H} \\ \nabla \times \vec{E} &= -\mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t}\end{aligned}\tag{3.8}$$

$$\begin{aligned}\nabla \times \vec{H} &= \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}; & \vec{J} &= \sigma \vec{E} \quad \text{e} \quad \vec{D} = \varepsilon \vec{E} \\ \nabla \times \vec{H} &= \sigma \vec{E} + \varepsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}\end{aligned}\tag{3.9}$$

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  $\omega$  a frequência angular.

Portando as equações: 3.8, 3.9, 3.3 e 3.4, podem ser reescritas como:

$$\nabla \times \vec{E} = i\omega\mu\vec{H}\tag{3.10}$$

$$\nabla \times \vec{H} = (i\omega\varepsilon + \sigma)\vec{E}\tag{3.11}$$

$$\nabla \cdot \vec{H} = 0\tag{3.12}$$

$$\nabla \cdot \vec{E} = 0\tag{3.13}$$

Aplicando o rotacional na equação 3.11, obtemos:

$$\nabla \times \nabla \times \vec{H} = (i\omega\varepsilon + \sigma)\nabla \times \vec{E}\tag{3.14}$$

Comparando a equação 3.14 com a equação 3.10, pode-se reescreve-la como:

$$\begin{aligned}\nabla \times \nabla \times \vec{H} &= (i\omega\varepsilon + \sigma)\nabla \times \vec{E}; & \nabla \times \vec{E} &= i\omega\mu\vec{H} \\ \nabla \times \nabla \times \vec{H} &= i\omega\mu(i\omega\varepsilon + \sigma)\vec{H}\end{aligned}\quad (3.15)$$

Pode-se expressar a equação 3.15 usando a seguinte identidade vetorial:

$$\nabla \times \nabla \times \vec{A} = \nabla(\nabla \cdot \vec{A}) - \nabla^2 \vec{A} \quad (3.16)$$

Portanto:

$$\begin{aligned}\nabla(\nabla \cdot \vec{H}) - \nabla^2 \vec{H} &= i\omega\mu(i\omega\varepsilon + \sigma)\vec{H} \\ \nabla(\nabla \cdot \vec{H}) - \nabla^2 \vec{H} &= \vec{H}[i\omega\mu(i\omega\varepsilon + \sigma)] \xrightarrow{\kappa^2} \\ \nabla(\nabla \cdot \vec{H}) - \nabla^2 \vec{H} &= \kappa^2 \vec{H} \\ \nabla^2 \vec{H} + \kappa^2 \vec{H} &= 0; \quad \kappa^2 = i\omega\mu(i\omega\varepsilon + \sigma)\end{aligned}\quad (3.17)$$

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

$$\kappa^2 = i\omega\mu\sigma \quad (3.18)$$

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

A equação 3.18 pode ser expressa seguindo a definição, como:

$$\begin{aligned}\kappa &= \sqrt{i\omega\mu\sigma}; \quad i = e^{i\frac{\pi}{2}} \\ \kappa &= \sqrt{\omega\mu\sigma} \sqrt{e^{i\frac{\pi}{2}}} \\ \kappa &= \sqrt{\omega\mu\sigma} e^{i\frac{\pi}{4}}; \quad e^{i\frac{\pi}{4}} = \sqrt{1/2}(1 + i) \\ \kappa &= \sqrt{\frac{\omega\mu\sigma}{2}}(1 + i) \\ \kappa &= \frac{(1 + i)}{\delta}\end{aligned}\quad (3.19)$$

Onde,

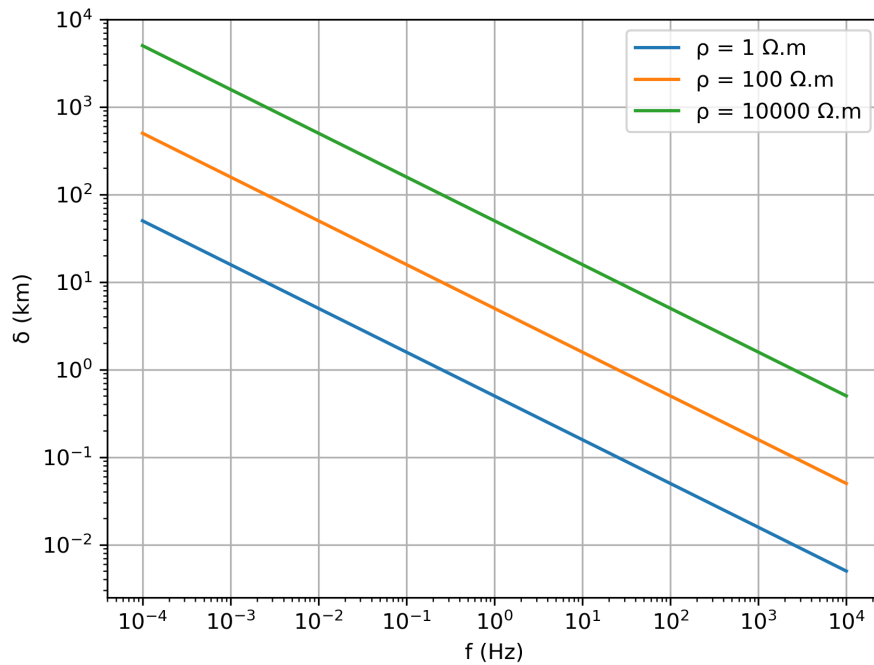
$$\delta_\omega = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu}} \longrightarrow \delta_f \approx 500 \sqrt{\frac{\rho_a}{f}} \quad (3.20)$$

A equação 3.20 é chamada de *skin-depth*<sup>2</sup>, ela representa a profundidade de penetração da onda eletromagnética em um meio condutor. A partir da equação são mapeadas as litologias em subsuperfície, relacionando-as com a  $\rho_a$ .

<sup>2</sup> Espessura pelicular

O meio geológico influencia diretamente a profundidade de investigação, a figura 2 mostra que para uma mesma frequência, ela pode representar valores diferentes de profundidade, variando o meio em subsuperfície, isso é representado por  $\rho$ . Os meios mais resistivos 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 contados com contextos cristalinos (meio resistivo), a atenção deve-se voltar para o fato de que um mesmo período em função de  $\rho$  pode representar duas profundidades diferentes, estando a estação em cima do contexto sedimentar ou em cima do contexto cristalino.

Figura 2 – Gráfico do *skin-depth* em função da frequência [Hz], variando a resistividade do meio



Fonte: O autor, 2018.

### 3.3 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 3.17 e da sua análoga para o campo  $\vec{E}$  são dadas por:

$$\vec{H}(\vec{r}) = \vec{H}e^{-\vec{k} \cdot \vec{r}} \quad (3.21)$$

$$\vec{E}(\vec{r}) = \vec{E}e^{-\vec{k} \cdot \vec{r}} \quad (3.22)$$

Substituindo a equação 3.21 e 3.22 em 3.11, temos:

$$\begin{aligned}\nabla \times \vec{H}e^{-\vec{k} \cdot \vec{r}} &= (i\omega\varepsilon + \sigma)\vec{E}e^{-\vec{k} \cdot \vec{r}}; \quad \sigma \gg i\omega\varepsilon \\ \nabla \times \vec{H}e^{-\vec{k} \cdot \vec{r}} &= \sigma\vec{E}e^{-\vec{k} \cdot \vec{r}}; \quad \sigma = \frac{\kappa^2}{i\omega\mu} \\ \nabla \times \vec{H}e^{-\vec{k} \cdot \vec{r}} &= \frac{\kappa^2}{i\omega\mu}\vec{E}e^{-\vec{k} \cdot \vec{r}}\end{aligned}\tag{3.23}$$

Usando as identidades:

$$\nabla(e^{-\vec{k} \cdot \vec{r}}) = -e^{-\vec{k} \cdot \vec{r}}\vec{k}\tag{3.24}$$

$$\nabla \times \vec{C}(f(\vec{r})) = -\vec{C} \times \nabla f(\vec{r})\tag{3.25}$$

Pode-se reescreve a equação 3.23:

$$\begin{aligned}-\vec{H} \times (-e^{-\vec{k} \cdot \vec{r}}\vec{k}) &= \frac{\kappa^2}{i\omega\mu}\vec{E}e^{-\vec{k} \cdot \vec{r}} \\ e^{-\vec{k} \cdot \vec{r}}(\vec{H} \times \vec{k}) &= e^{-\vec{k} \cdot \vec{r}}\frac{\kappa^2}{i\omega\mu}\vec{E} \\ \vec{E} &= \frac{i\omega\mu}{\kappa^2}\vec{H} \times \vec{k} \\ \vec{E} &= \frac{i\omega\mu}{\kappa}\vec{H} \times \frac{\vec{k}}{\kappa}\end{aligned}\tag{3.26}$$

A relação  $\vec{k}/\kappa$  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  $Z = i\omega\mu/\kappa$ , esta definição é conhecida como impedância intrínseca do meio ou impedância eletromagnética, também pode ser representada da seguinte forma:

$$Z = \frac{|\vec{E}|}{|\vec{H}|} = \frac{i\omega\mu}{\kappa} = \sqrt{\omega\mu\rho}e^{i\frac{\pi}{4}}\tag{3.27}$$

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

$$\begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} H_x \\ H_y \end{pmatrix}\tag{3.28}$$

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 3.20).



## 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

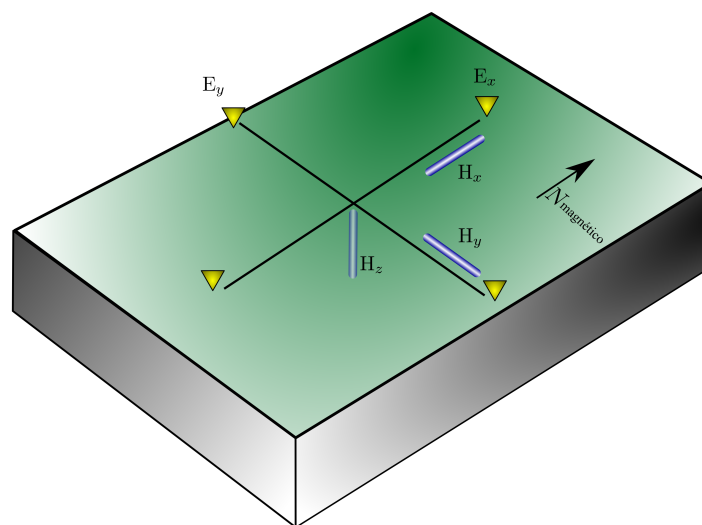
A aquisição de dados MT consiste na obtenção dos campos elétricos ( $E_x$  e  $E_y$ ) e magnéticos ( $H_x$ ,  $H_y$  e  $H_z$ ), onde são os parâmetros essenciais para o cálculo da impedância ( $Z$ ), equação 3.26 e 3.28.

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 3 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 terrestre<sup>1</sup>.

Figura 3 – Arranjo para Aquisição de dados MT.



Fonte: O autor, 2018.

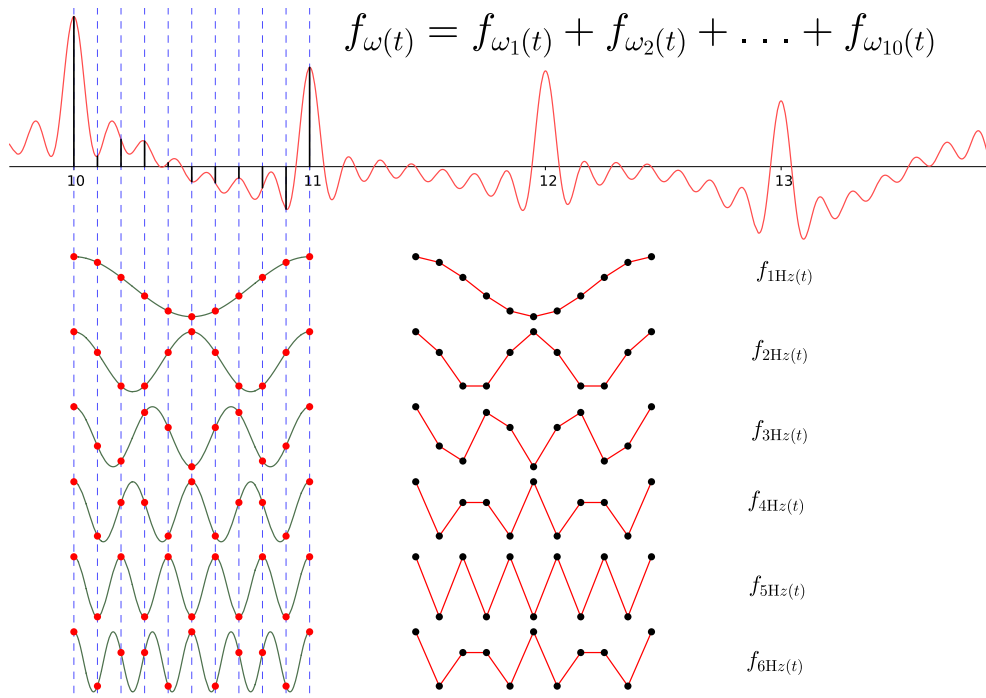
<sup>1</sup> Ponto na superfícies terrestre, onde, a inclinação magnética do modelo matemático para o campo magnético é  $+90^\circ$

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 ( $10^{-4} \text{ Hz}$  a  $10^4 \text{ Hz}$ ), 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 4 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  $10 \text{ Hz}$ , se atribuirmos à ela uma taxa de aquisição de  $10 \text{ Hz}$  pode-se perceber que a frequência de  $6 \text{ Hz}$  não é representada corretamente, já percebe-se que para a frequência de  $1 \text{ Hz}$  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 4 – 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.

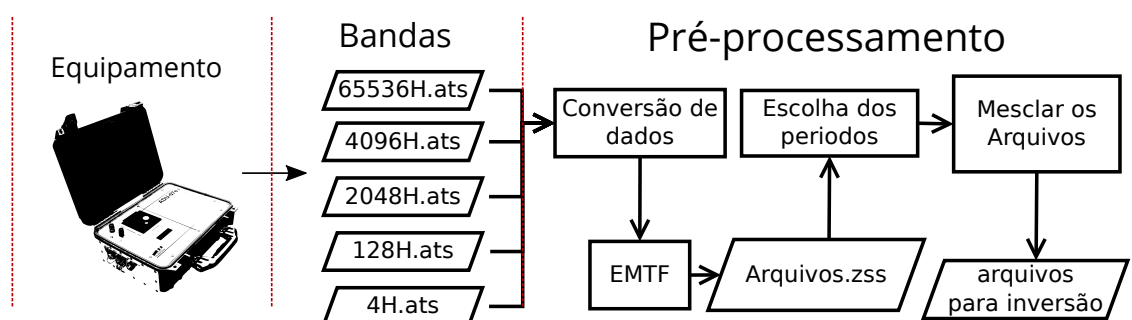
Como comentado na seção anterior, devido as limitações dos equipamentos, os dados são coletados separadamente para cada banda. Esta, após o processamento robusto, gera um arquivo com extensão .zss. Nesses arquivos estão armazenados os tensores de impedância, ou seja, cada componente da matriz  $Z$ , 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 5 ilustra as etapas de pré-processamento.

Figura 5 – 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:  $\rho_a$ ,  $\phi$  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 adota 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 ( $\rho_a$ ) 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 [ $\Omega$ ]

e para se obter a fase ( $\phi$ ) 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  $\rho_a$  e  $\phi$ .

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*<sup>2</sup>). 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.

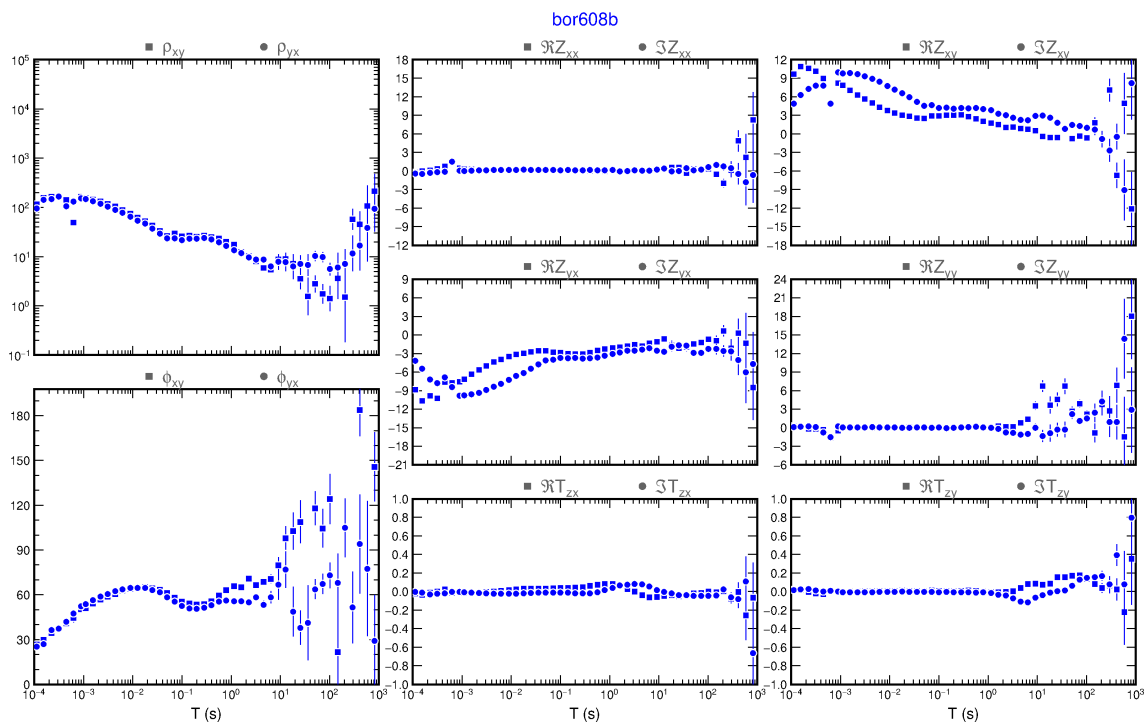
Os *scripts* oferecidos para o processamento MT foram desenvolvidos, em grande parte, pelo Dr. Marcelo Banik de Pádua e pelo Me. Marcelo Banik de Pádua. O programa desenvolvido faz uso dos *scripts* como “ponte” entre a interface e o os programas EMTF, como também para conversores de dados. Um exemplo 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 6. 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.

---

<sup>2</sup> Transformada Rápida de Fourier

Figura 6 – Saída Gráfica Gerada pelo *script: plot-cmp-tf*, utilizando o GMT.



Fonte: O autor, 2018.



## 5 DESENVOLVIMENTO E RESULTADOS DO PAMPAMT

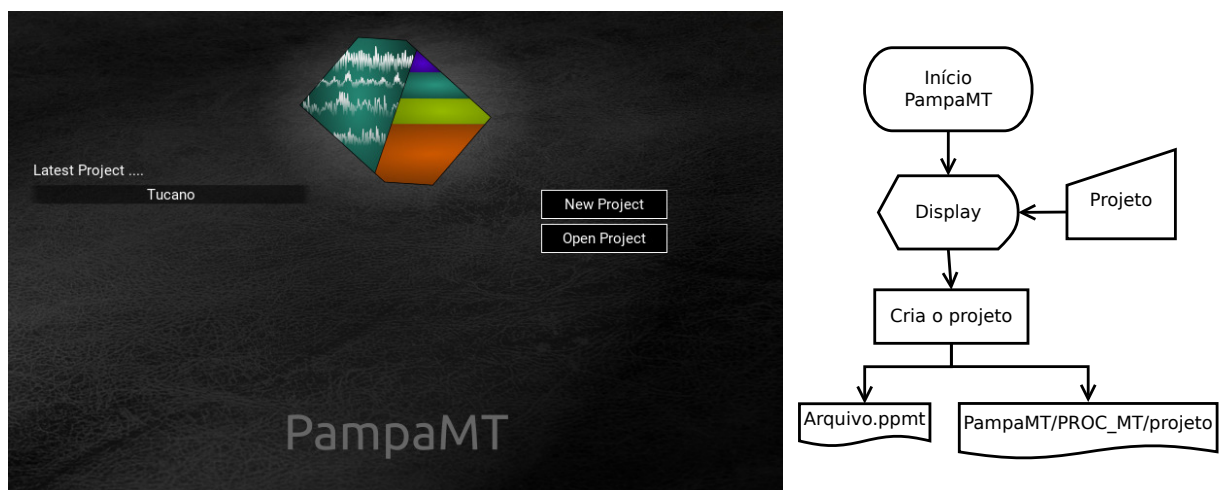
O *software* desenvolvido recebeu o nome de PampaMT, em homenagem a Universidade Federal do Pampa. O desenvolvimento iniciou-se em janeiro de 2018, com o primeiro protótipo de codinome RiMT, para testar os conceitos e a viabilidade das funções para o programa, em junho de 2018 o código foi reestruturado 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 7 mostra a primeira tela ao executar o PampaMT, nela pode-se escolher criar um novo projeto ou abrir um já existente.

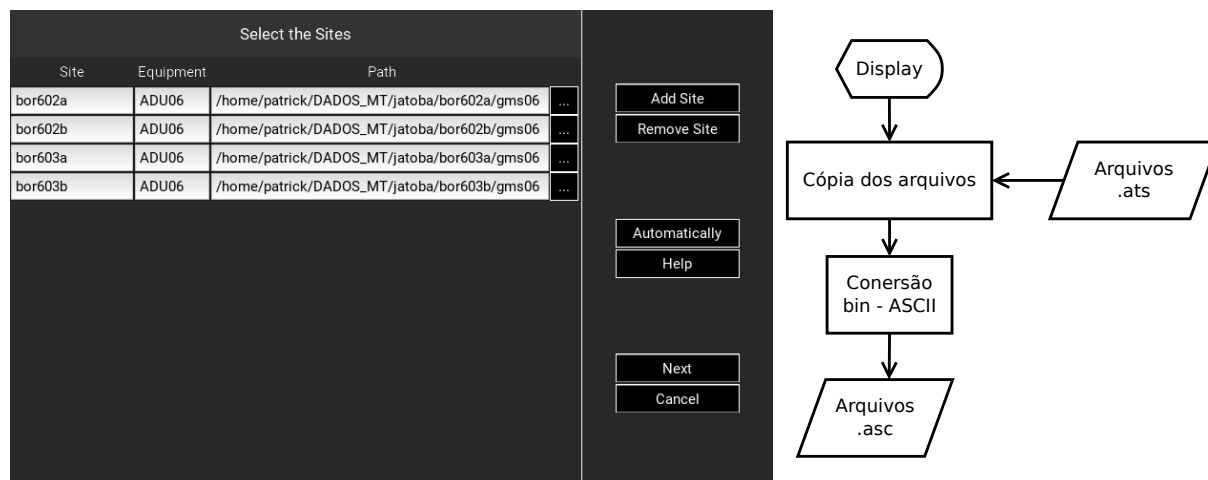
Figura 7 – Tela Inicial PampaMT



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 8).

Figura 8 – Seleção das Estações

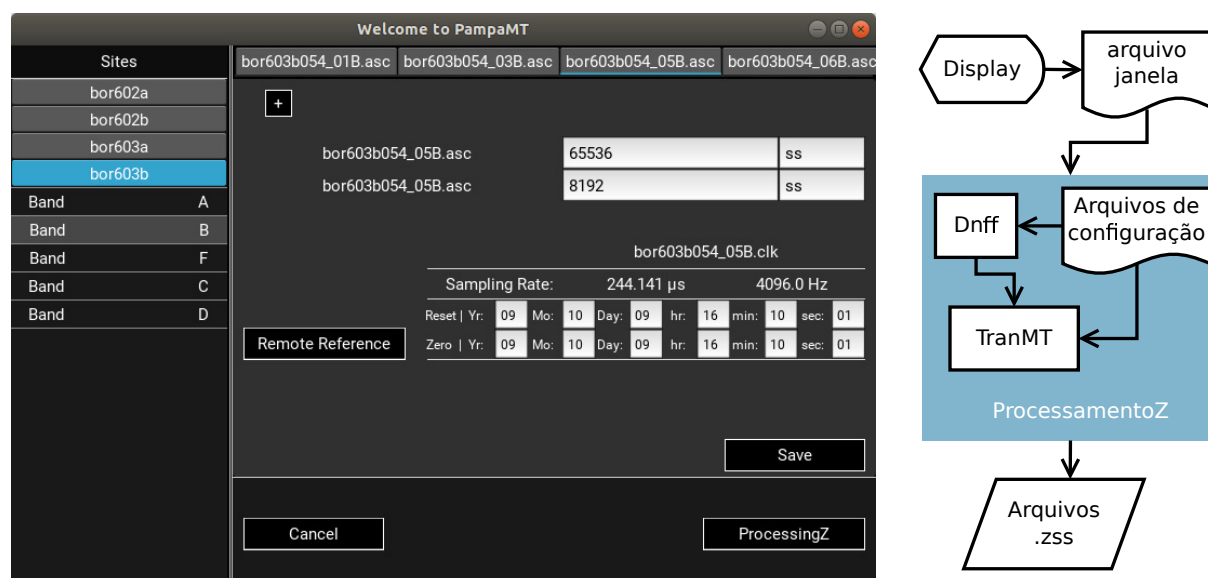


Fonte: O autor, 2018.

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 9).

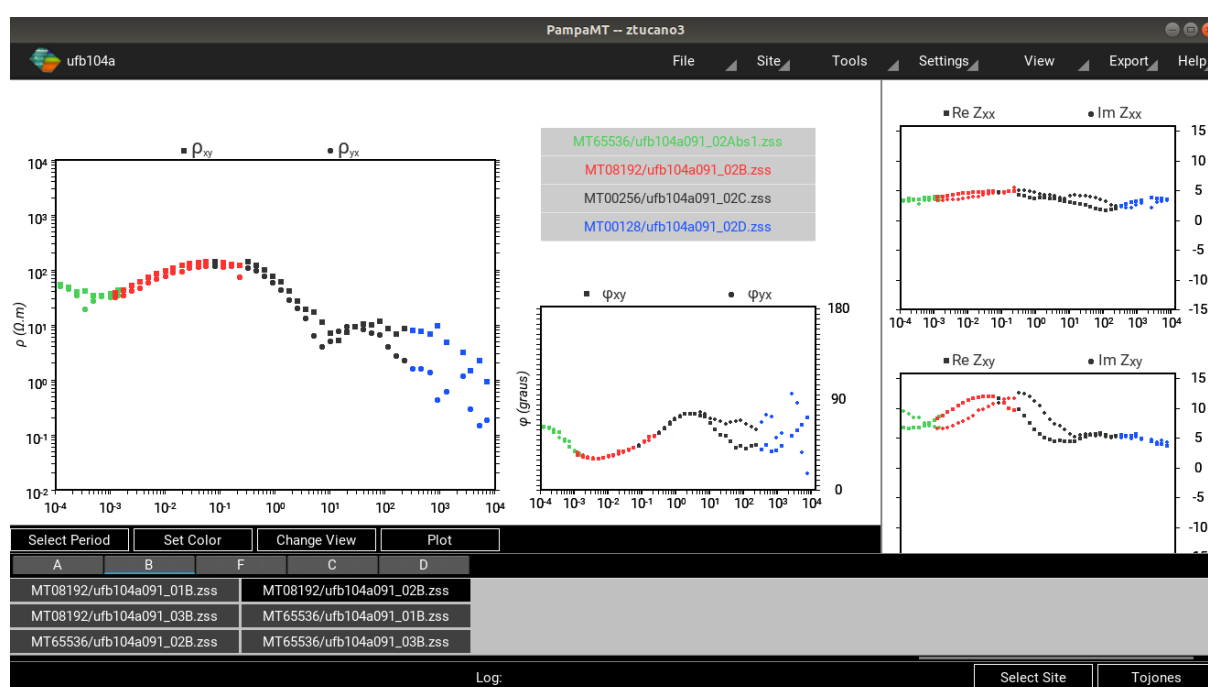
Figura 9 – Tela de Configuração para o EMTF



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 10).

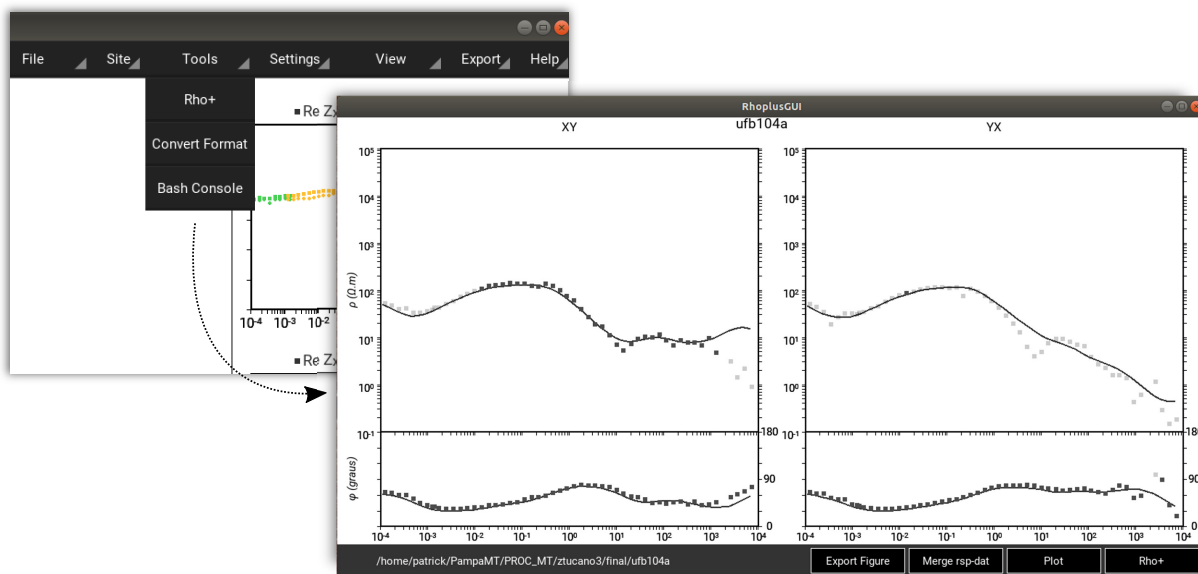
Figura 10 – Tela Principal PampaMT



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 11).

Figura 11 – Integração com Outros Programas

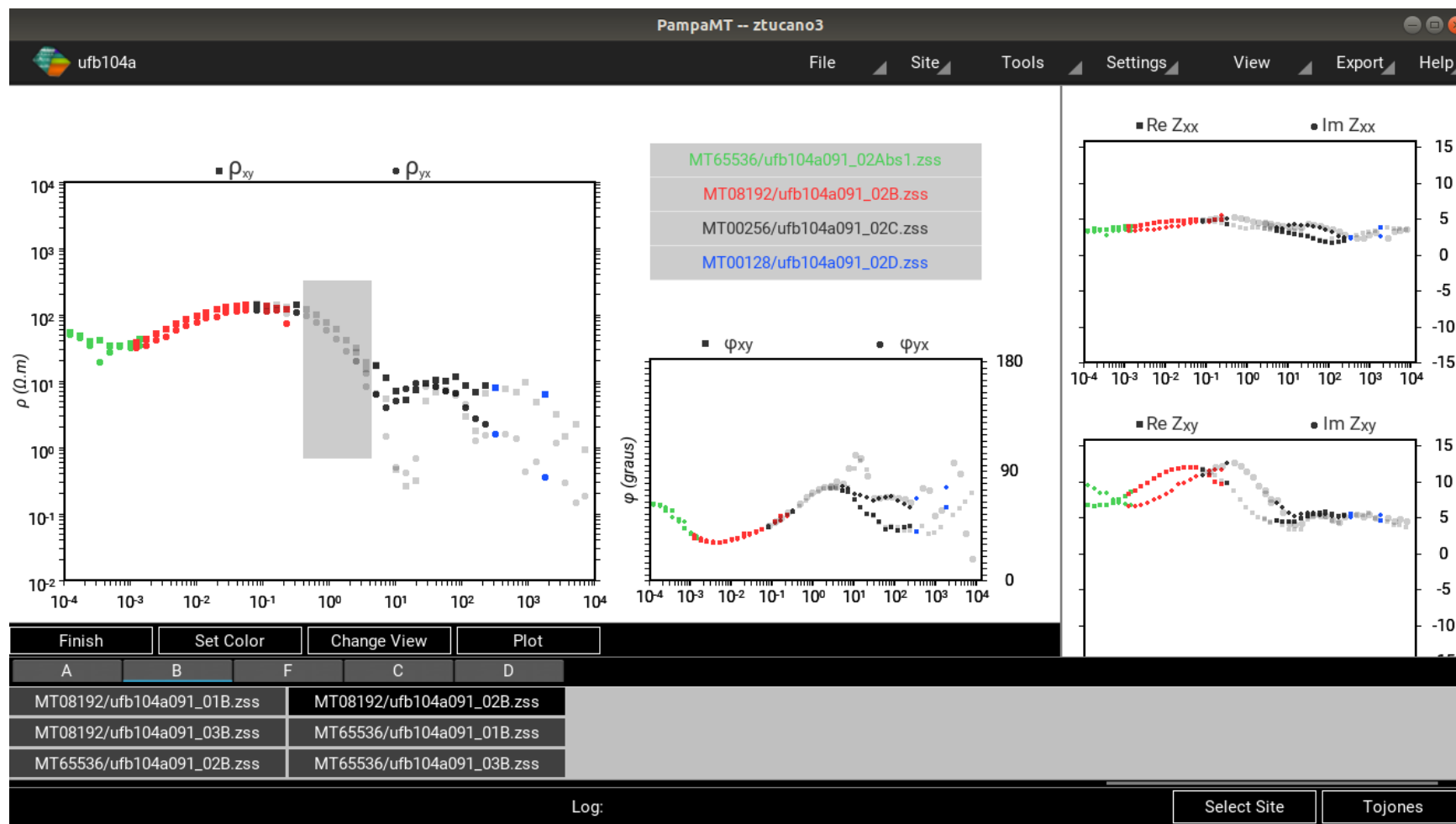


Fonte: O autor, 2018.

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 12).

Figura 12 – 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.
- 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.
- 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.
- 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> $\rangle$