

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA**

**PATRICK ROGGER GARCIA**

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

**Caçapava do Sul**

**2018**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA**

**PATRICK ROGGER GARCIA**

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

**ORIENTADOR:** VINICIUS ABREU DE OLIVEIRA

**CO-ORIENTADORA:** ANDRÉA CRISTINA LIMA DOS SANTOS MATOS

**Caçapava do Sul**

**2018**

## RESUMO

Este trabalho se trata da construção de um *Software* para o processamento de dados magnetotelúrico, esse projeto foi pensado visto a carência de programas para o trabalho com este método geofísico, o programa aqui apresentado tratará dos dados desde a coleta, através de equipamentos do tipo Metronix ADU06 ou ADU07, até as etapas de visualização dos dados passando por processamentos estatísticos, conversão de formatos de arquivos e processamento robusto. Todo o programa será desenvolvido utilizando a linguagem de programação Python sob a licença de *software* Livre, o programa unirá inúmeros *scripts* e rotinas consagradas no processamento de dados magnetotelúrico. Estes processamentos serão feitos através de uma interface gráfica, visando então facilitar as etapas de processamentos para os usuários, pois isso vinham sendo feitas através apenas de linhas de comando.

**Palavras-chave:** Magnetotelúrico. Python3. Software Livre.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Arranjo para medir a resistividade elétrica ( $\rho$ ) de um material.....	13
Figura 2	Resistividade Elétrica dos Materiais Geológicos .....	14
Figura 3	Modelo de Terra 2D para a resistividade elétrica variando na direção y .....	19
Figura 4	Series Temporais das cinco componentes contidas no arquivo TS.....	22
Figura 5	Fluxograma de Processamento Clássico.....	23
Figura 6	Exemplo de janela com Kivy implementada somente com código Python.....	28
Figura 7	Exemplo dos pontos interpolados usando SciPy e plotados usando Matplotlib.....	30
Figura 8	Fluxograma Tela Principal PampaMT .....	31
Figura 9	Fluxograma de Inicialização do PampaMT .....	32

## LISTA DE TABELAS

Tabela 5.1 Taxas de Aquisições frequentemente usadas para equipamentos ADU06 e ADU07. ....	21
Tabela 6.1 Distribuição de pontos com valor anômalo ao centro. ....	29
Tabela 8.1 Cronograma - 1º Semestre 2018 .....	34
Tabela 8.2 Cronograma - 2º Semestre 2018 .....	34

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

API	<i>Application Programming Interface</i>
ASCII	<i>American Standard Code for Information Interchange</i>
CPU	<i>Central Processing Unit</i>
CWI	<i>Centrum Wiskunde &amp; Informatica</i>
GEOMA	Grupo de Geomagnetismo
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
MT	Magnetotelúrico
1D	Uma Dimensão
2D	Duas Dimensões
3D	Três Dimensões
TE	Transversal Elétrico
TM	Transversal Magnético
TS	<i>Time Series</i>

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\sigma$	Condutividade Elétrica
$\rho$	Resistividade Elétrica
$V$	Diferença de Potencial
$i$	Corrente Elétrica
$R$	Resistência Elétrica
$A$	Área
$L$	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
$\rho_f$	Densidade de Carga
$t$	Tempo
$\mu$	Permeabilidade Magnética
$\epsilon$	Permissividade Elétrica

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>9</b>
<b>2 OBJETIVOS.....</b>	<b>10</b>
2.1 Objetivos Gerais.....	10
2.2 Objetivos Específicos .....	10
<b>3 JUSTIFICATIVA .....</b>	<b>11</b>
<b>4 FUNDAMENTOS DO MÉTODO MAGNETOTELÚRICO .....</b>	<b>12</b>
4.1 Origem das Correntes Telúricas .....	12
4.2 Resistividade dos Materiais.....	12
4.3 Fundamentos Teóricos dos Métodos Eletromagnéticos.....	14
4.4 Resposta do Método Magnetotelúrico.....	17
4.4.1 Impedância Eletromagnética.....	17
4.5 Modelo de Dimensões MT .....	18
4.5.1 Terra 1D .....	18
4.5.2 Terra 2D .....	19
4.5.3 Terra 3D .....	20
<b>5 SOFTWARES UTILIZADOS EM DADOS MT .....</b>	<b>21</b>
5.1 Aquisição de Dados MT .....	21
5.1.1 Estrutura do Arquivo TS .....	22
5.2 Fluxo de Processamento de Dados MT .....	23
5.2.1 Conversão de Dados Binários .....	24
5.2.2 Dnff .....	24
5.2.3 TranMT .....	24
5.2.4 ToJones .....	25
5.3 Pacotes de Processamentos do grupo Geoma - INPE .....	25
<b>6 PROPOSTA DE SOFTWARE LIVRE INTEGRADOR.....</b>	<b>26</b>
6.1 Linguagem PYTHON .....	26
6.2 Módulos e Pacotes .....	27
6.2.1 Kivy.....	27
6.2.2 SciPy, Matplotlib, NumPy .....	28
6.3 Arquitetura do Programa e Abordagem dos fluxos de Processamento .....	30
<b>7 RESULTADOS ESPERADOS .....</b>	<b>33</b>
<b>8 CRONOGRAMA DE ATIVIDADES .....</b>	<b>34</b>
8.1 1º Semestre .....	34
8.2 2º Semestre .....	34
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>35</b>



## 1 INTRODUÇÃO

Apoiado nas leis de Maxwell o método MT (Magnetotelúrico) usa a Terra como um condutor ôhmico e as variações do seu campo magnético gerado por ventos solares (PARKINSON, 1983) e tempestades equatoriais que interagem com a ionosfera para investigar as estruturas internas da Terra e litologias rasas.

No Brasil o uso do método MT é insipiente, restrito ao meio acadêmico e pouco utilizado na indústria, porém, pode ser bem aplicado na prospecção de hidrocarbonetos, sendo a sua resolução melhor que a magnetometria e gravimetria, também em estudos crustais apoiando a sismologia devido sua grande profundidade de investigação, mas o alto custo de processamento e a falta de *softwares* para trabalhar com os dados tem sido algumas das causas do pouco uso.

Esse trabalho foi inicialmente pensado para tornar o MT mais difundido, desenvolvendo um *software* com interface gráfica e distribuição livre. Assim o projeto nasceu com esse propósito, compreendendo o processamento de dados MT desde a coleta até a primeira visualização dos dados, como: escolha de bandas, plotagem de pseudo-seções em função de resistividade e fase, além de fazer tratamentos estatísticos e processamento robusto proposto por EGBERT (1997b).

O programa será construído usando a linguagem Python (DRAKE, 2018) e a construção da interface gráfica será desenvolvida usando a API Kivy (KIVY ORGANIZATION, 2018a) dentre outros pacotes. A escolha por essa linguagem foi a vasta quantidade de pacotes, o crescente número de pessoas implementando e a facilidade da construção do código.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 Objetivos Gerais

O objeto de estudo desse trabalho é o desenvolvimento de um *Software* Livre, em *Python* para tratamentos e processamentos de dados magnetotelúrico .

### 2.2 Objetivos Específicos

O MT é um método geofísico que trabalha com propriedades eletromagnéticas, essa característica torna o processamento dos dados extremamente trabalhoso e com alto custo computacional, o trabalho então propõe:

- Criação de novos algoritmos escritos em Python.
- Otimização dos códigos frente as novas tecnologias.
- Obter secções lito-geofísicas de resistividade para a região de estudo.
- Comparar os resultados obtidos com trabalhos já consolidados<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup>(SANTOS-MATOS, 2012) e (BARBOSA et al., 2018)

### 3 JUSTIFICATIVA

Esse trabalho foi pensado para auxiliar a expansão do magnetotelúrico , hoje existem vários programas proprietários para processamento destes tipos de dados, mas, são programas de alto custo e fechados, isto é, não possuem transparência dos fluxos de processamentos dentro do programa. O processamento hoje usado na maioria dos trabalhos usam como base os algoritmos propostos por EGBERT para a primeira fase de processamento e a rotina To Jones (EGBERT, 1997b) para compilação dos dados em arquivos manipuláveis.

Esses processos atualmente são feitos através de linhas de comando unindo diversos programas separados, o que torna o procedimento muito instável provocando diversos tipos de erros além de não prever outros.

O programa proposto aqui pretende ser escrito em apenas uma linguagem e utilizar pacotes nativamente compatíveis, o que prevê erros de compatibilidades e torna a manutenção do código mais fácil, uma vez que estes não serão compilados.

Outra forma de beneficiar a utilização do programa se dará pela construção de uma interface gráfica para todos os processos, tornando assim mais fácil utilizar e prevenir erros provocados pelo usuário.

## 4 FUNDAMENTOS DO MÉTODO MAGNETOTELÚRICO

O método magnetotelúrico proposto por TIKHONOV (1950) e CAGNIARD (1953), usa as propriedades eletromagnéticas para estudar a distribuição de resistividade elétrica na crosta, podendo variar a sua investigação de dezenas de metros a dezenas de quilômetros.

### 4.1 Origem das Correntes Telúricas

As flutuações no campo magnético terrestre geram campos elétricos na alta atmosfera que induzem correntes magnéticas.

As ondas eletromagnéticas penetram no interior da Terra na forma de ondas planas ortogonais que induzem novas correntes chamadas de corrente telúricas que trazem informações das características físicas das litologias (TIKHONOV, 1950) e (CAGNIARD, 1953).

Uma das características é a modulação da frequência, causada por diferentes tipos de rochas e estruturas, esse fenômeno é diretamente relacionado a resistividade elétrica do meio. As frequências das ondas são baixas variando de  $1\text{ mHz}$  à  $10\text{ kHz}$ .

Ondas com frequências menores que  $1\text{ Hz}$  tem origem nos ventos solares que interagem com o campo magnético terrestre, já ondas com frequências maiores de  $1\text{ Hz}$  são provocadas por tempestades equatoriais. Para o estudo do magnetotelúrico são feitas as seguintes suposições:

1. Ondas geradas na ionosfera, distantes o suficientes, penetram ortogonais à superfície da Terra.
2. A Terra se comporta como um condutor ôhmico.
3. A Terra é considerada um semi-espaço isotrópico.

### 4.2 Resistividade dos Materiais

Para o magnetotelúrico a propriedade de investigação e contraste é a condutividade elétrica ( $\sigma$ ) ou resistividade elétrica ( $\rho$ ) sendo essa o inverso da primeira. A resistividade elétrica é uma propriedade particular de um determinado material, ou seja, a partir de uma

resistividade elétrica podemos estimar a qual material ela pertence<sup>1</sup>.

Em 1827, Georg Ohm verificou de forma empírica que aplicando uma diferença de potencial em um material, esse gera uma resistência à passagem de corrente, essa relação é chamada de lei de Ohm (equação 4.1) (HAYT; BUCK, 2013).

$$V = Ri \quad (4.1)$$

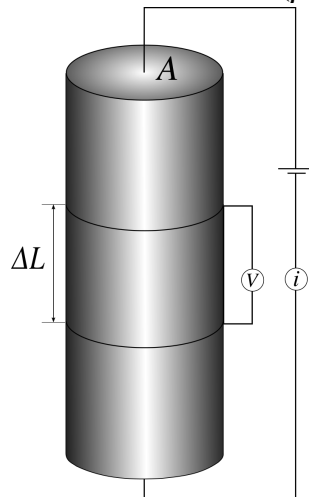
Onde  $V$  é a diferença de potencial (Volts - V),  $i$  é a corrente (Ampère - A) e  $R$  é a resistência (Ohms -  $\Omega$ ), materiais que obedecem essa lei são chamados de materiais ôhmicos.

A Terra pode ser considerada como um material ôhmico. No entanto para a investigação geofísica a resistência não é uma propriedade viável, visto que depende muito da geometria do problema, assim foi proposto a resistividade elétrica, onde, um mesmo material terá a sua resistividade elétrica igual, independente da geometria.

A figura 1 mostra um circuito para se obter a resistividade elétrica de um material, sendo  $A$  a área [ $m^2$ ],  $R$  a resistência [ $\Omega$ ],  $L$  o comprimento [ $m$ ] e  $\rho$  a resistividade elétrica dada em  $\Omega m$ .

$$\rho = \frac{RA}{L} ; \quad R = \frac{V}{i} \quad (4.2)$$

Figura 1 – Arranjo para medir a resistividade elétrica ( $\rho$ ) de um material



Fonte: Adaptado TELFORD, (1990)

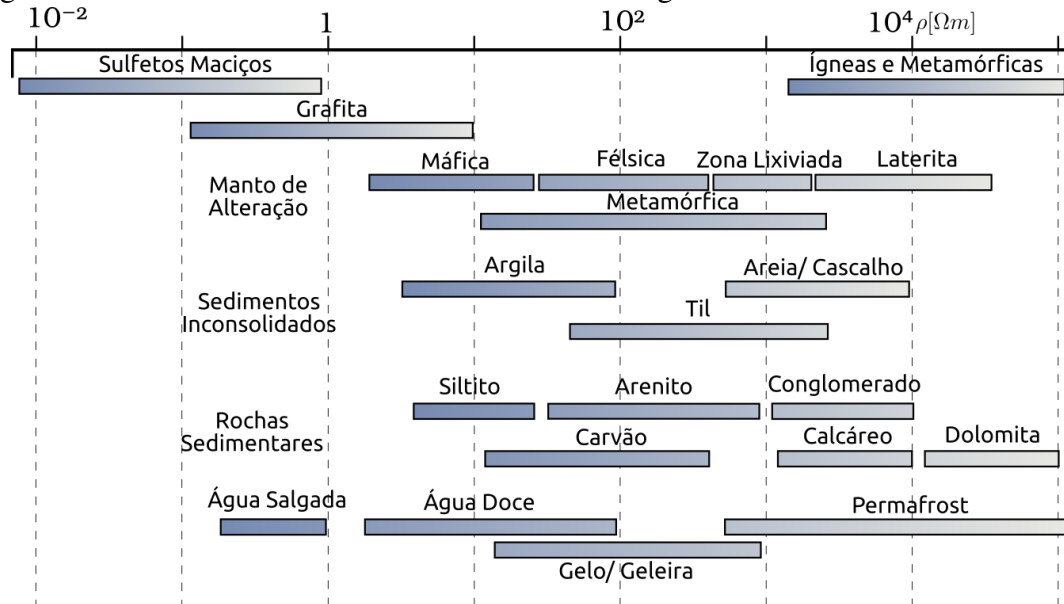
A figura 2 mostra a distribuição de resistividade elétrica para diversos materiais geológicos. Portanto podemos identificar a partir de um contexto geológico quais litolo-

<sup>1</sup>Para os meios geológicos essa propriedade é representada por um intervalo de valores, devido as complexidades químicas e físicas das diferentes litologias.

guas pertencem a cada resistividade elétrica encontrada.

Por exemplo, uma litologia que tenha resistividade elétrica em torno de  $100 \Omega m$  e outra com  $3000 \Omega m$  pode ser caracterizada como um arenito e uma rocha ígnea respectivamente.

Figura 2 – Resistividade Elétrica dos Materiais Geológicos



Fonte: Adaptado PALACKY, (1987)

### 4.3 Fundamentos Teóricos dos Métodos Eletromagnéticos

Usando as leis de Maxwell (HAYT; BUCK, 2013) podemos medir os campos elétricos e magnéticos e a partir deles estimar a resistividade elétrica dos meios litológicos em sub-superfície.

Os campos podem ser descritos pelas seguintes equações<sup>2</sup>:

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (4.3)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (4.4)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (4.5)$$

<sup>2</sup>Para cargas e correntes livres (macroscópica)

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho_f \quad (4.6)$$

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  $[C/m^2]$

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

$t \rightarrow$  Tempo  $[s]$

Obedecendo as relações de contorno para um meio isotrópico temos as seguintes relações (equações constitutivas):

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (4.7)$$

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad (4.8)$$

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (4.9)$$

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

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

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

Cada escalar das equações anteriores são características que dependem do meio em que a onda se propaga. Para a crosta  $\mu = 1,2566 \times 10^{-6} H/m$  e  $\epsilon = 8,85 \times 10^{-12} F/m$ ; esses parâmetros funcionam como tensores em um meio anisotrópico que variam em função do tempo. Considerando para os trabalhos de investigação o meio supõe-se ser isotrópico, assim, tornando estáticos os tensores.

Através das propriedades dos meios isotrópicos podemos reescrever as equações 4.3 e 4.4 usando as equações constitutivas 4.7, 4.8 e 4.9.

$$\nabla \times \vec{E} = -\mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \quad (4.10)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \sigma \vec{E} + \epsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (4.11)$$

Derivando a equação 4.11 no tempo, multiplicando por  $\mu$  e usando a equação 4.10 temos:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\nabla \times \vec{H})}{\partial t} &= \frac{\partial(\sigma \vec{E})}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial t} \left( \epsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right) \\ \frac{\nabla \times \partial \vec{H}}{\partial t} &= \sigma \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \epsilon \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} \\ \mu \frac{\nabla \times \partial \vec{H}}{\partial t} &= \mu \sigma \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \mu \epsilon \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} \\ -\frac{\mu}{\mu} \nabla \times \nabla \times \vec{E} &= \mu \sigma \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \mu \epsilon \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} \\ -\nabla \times \nabla \times \vec{E} &= \mu \sigma \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \mu \epsilon \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} \end{aligned} \quad (4.12)$$

Usando a identidade vetorial:

$$\nabla \times \nabla \times \vec{A} = -\nabla^2 \vec{A} + \nabla(\nabla \cdot \vec{A}) \quad (4.13)$$

Podemos reescrever a equação 4.6 considerando, que para meios homogêneos e isotrópicos não há troca de carga entre ele e a densidade de carga,  $\rho_f$ , é zero assim:

$$\nabla \cdot \vec{E} = 0 \quad (4.14)$$

Portanto:

$$\nabla \times \nabla \times \vec{E} = -\nabla^2 \vec{E} + \nabla(\nabla \cdot \vec{E}); \quad \text{onde } \nabla(\nabla \cdot \vec{E}) = 0 \quad (4.15)$$

Substituindo [4.15] em [4.12] temos:

$$\nabla^2 \vec{E} - \mu \sigma \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} - \mu \epsilon \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = 0 \quad (4.16)$$



De forma análoga podemos verificar que:

$$\nabla^2 \vec{H} - \mu \sigma \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} - \mu \varepsilon \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2} = 0 \quad (4.17)$$

Seguindo a dedução das equações como demonstrado no trabalho de DIDANA em (2010), podemos verificar que:

$$E_x = A e^{-ikz} + B e^{ikz} \quad (4.18)$$

$$H_y = \frac{k}{\omega \mu_0} (A e^{-ikz} + B e^{ikz}) \quad (4.19)$$

Onde  $k^2 = \iota \omega \mu_0 \sigma$ .

Os coeficientes  $A$  e  $B$  são parâmetros e ajustem e dependem da condição de contorno dos dados.

## 4.4 Resposta do Método Magnetotelúrico

### 4.4.1 Impedância Eletromagnética

Outro conceito importante é o tensor Impedância, ele é descrito como uma relação entre os campos elétricos e magnéticos, análogo a Lei de Ohm (HAYT; BUCK, 2013) que apresenta resistência a passagem de corrente.

O tensor impedância é descrito em função da frequência angular, através da transformada de Fourier (BRACEWELL; BRACEWELL, 1986).

A transformada de Fourier gera um número complexo, portando o tensor recebe um valor real e outro imaginário.

$$\begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} H_x \\ H_y \end{pmatrix} \quad (4.20)$$

$$E_x(\omega) = Z_{xx}(\omega)H_x(\omega) + Z_{xy}(\omega)H_y(\omega) \quad (4.21)$$

$$E_y(\omega) = Z_{yx}(\omega)H_x(\omega) + Z_{yy}(\omega)H_y(\omega) \quad (4.22)$$

## 4.5 Modelo de Dimensões MT

### 4.5.1 Terra 1D

Para o modelo de Terra 1D considera-se que a resistividade elétrica varia apenas em uma direção, em outras palavras, a resistividade elétrica varia com a profundidade. A matriz impedância para esse modelo tem a sua diagonal principal igual a zero.

$$Z_{1D} = \begin{pmatrix} 0 & Z_{xy} \\ -Z_{yx} & 0 \end{pmatrix} \quad (4.23)$$

Isso significa que a resistividade elétrica nas duas direções são iguais porém a fase entre elas são opostas.

Substituindo [4.18] e [4.19] na equação 4.21, obtemos:

$$Z_{xy}(\omega) = \frac{E_x(\omega)}{H_y(\omega)} = \frac{\omega\mu_0}{k} \quad (4.24)$$

Elevando o módulo ao quadrado da equação 4.24, temos:

$$\left| \frac{E_x(\omega)}{H_y(\omega)} \right|^2 = \left| \frac{\omega\mu_0}{k} \right|^2 = \frac{\omega\mu_0}{\sigma} \quad (4.25)$$

Portanto:

$$\frac{1}{\sigma} = \frac{1}{\omega\mu_0} \left| \frac{E_x(\omega)}{H_y(\omega)} \right|^2 = \rho \quad (4.26)$$

A onda sofre influência de todas as camadas que percorre, sendo assim, a resistividade elétrica é classificada como aparente nos pontos em que ela representa o valor de todo o pacote, assim:

$$\rho_a = \frac{1}{\omega\mu_0} |Z|^2 \quad (4.27)$$

A fase do tensor impedância é definido como sendo o arco tangente da parte imaginária sobre a parte real na matriz complexa do tensor.

$$\phi = \arctg \left( \frac{\text{Im } Z}{\text{Re } Z} \right) \quad (4.28)$$

A equação 4.29 mostra a relação entre a profundidade ( $\delta_f[m]$ ), frequência ( $f[Hz]$ )

e a resistividade aparente ( $\rho_a[\Omega.m]$ ), essa profundidade é chamada de *skin-depth* (HAYT; BUCK, 2013).

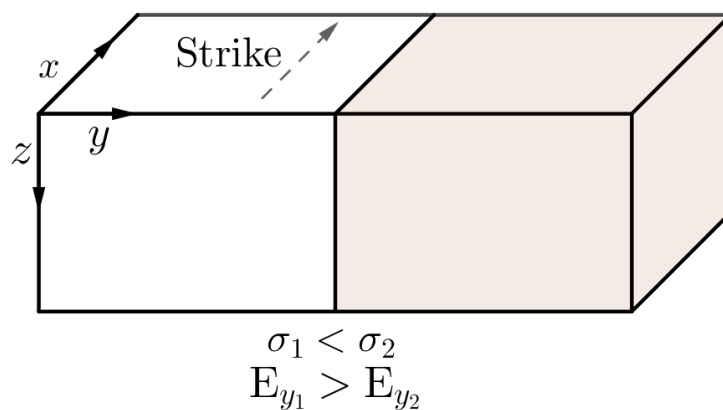
$$\begin{aligned}\delta_\omega &= \frac{1}{\text{Re}(k)} \\ \delta_\omega &= \frac{1}{\text{Re}(\sqrt{i\omega\mu_0\sigma})} \\ \delta_\omega &= \sqrt{\left(\frac{2}{\omega\mu_0\sigma}\right)} \\ \delta_\omega &= \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}} \rightarrow \delta_f \approx 500\sqrt{\frac{\rho_a}{f}}\end{aligned}\quad (4.29)$$

Essa relação mostra que para uma mesma profundidade variando a resistividade aparente a frequência é alterada.

#### 4.5.2 Terra 2D

O modelo de Terra 2D é caracterizado pelo contato vertical entre dois meios de diferentes resistividades elétricas. Se o contato é paralelo ao eixo  $x$  então é definido a direção do *strike* no eixo  $x$ , a direção deve ser paralela ao plano de contato, ou seja, onde a condutividade elétrica é constante.

Figura 3 – Modelo de Terra 2D para a resistividade elétrica variando na direção  $y$



Devido a essa diferença entre as resistividades elétricas polarizamos os campos em TE (Transversal Elétrico) e TM (Transversal Magnético). Para esse modelo temos o tensor impedância como:

$$Z_{2D} = \begin{pmatrix} 0 & Z_{xy} \\ Z_{yx} & 0 \end{pmatrix} \quad (4.30)$$

Assim cada polarização pode ser escrita como:

$$\text{TE} = \begin{cases} \frac{\partial E_x}{\partial y} = \frac{\partial B_z}{\partial t} = -i\omega B_z \\ \frac{\partial E_x}{\partial z} = \frac{\partial B_y}{\partial t} = i\omega B_y \\ \frac{\partial B_z}{\partial y} - \frac{\partial B_y}{\partial z} = \mu\sigma E_x \end{cases} \quad (4.31)$$

$$\text{TM} = \begin{cases} \frac{\partial B_x}{\partial y} = \mu\sigma E_z \\ -\frac{\partial B_x}{\partial z} = \mu\sigma E_y \\ \frac{\partial E_z}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial z} = i\omega B_x \end{cases} \quad (4.32)$$

### 4.5.3 Terra 3D

Na maioria das condições geológicas o modelo se comporta como 3D, isso implica que a condutividade elétrica varia ao longo das três direções ( $\sigma = \sigma_{x,y,z}$ ).

A matriz do tensor impedância é então calculada com todos os termos.

$$Z_{3D} = \begin{pmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \end{pmatrix} \quad (4.33)$$

## 5 SOFTWARES UTILIZADOS EM DADOS MT

Neste capítulo será discutido e mostrado como vinham sendo processados os dados magnetotelúrico desde a etapa de coleta dos dados, até a produção de pseudo-seções.

Os programas utilizados são disponibilizados pelo *site* MTnet, (2018). O *site* MTnet é uma comunidade que une diversos programas para processamento de dados MT, para fins acadêmicos

### 5.1 Aquisição de Dados MT

O MT utiliza as frequências das ondas, isolando-as para obter um valor de resistividade, essas variam entre 1  $mHz$  e 10  $kHz$ <sup>1</sup> dentro do espectro eletromagnético.

A escolha da taxa de aquisição dos dados é um fator importante, pois há um grande intervalo de períodos. Por exemplo, a frequência de 1  $mHz$  tem o período equivalente a 1000  $s$ , ou seja, leva cerca de 17 minutos para que seja registrado um comprimento de onda em contra partida para 10  $kHz$  leva apenas 1 milissegundo.

Para que seja contornada a problemática da aquisição são realizadas varias tomadas chamadas de bandas e cada uma é configurada com uma taxa de aquisição diferente, a tabela 5.1 mostra as taxas de aquisições frequentemente usadas.

Tabela 5.1 – Taxas de Aquisições frequentemente usadas para equipamentos ADU06 e ADU07.

Equipamento	Banda	Taxa de Aquisição [ $H_z$ ]
ADU06	A	65536
	B	4096
	F	Livre
	C	64
	D	2
ADU07	65536H	65536
	4096H	4096
	128H	128
	4H	4

Fonte: O Autor, 2018

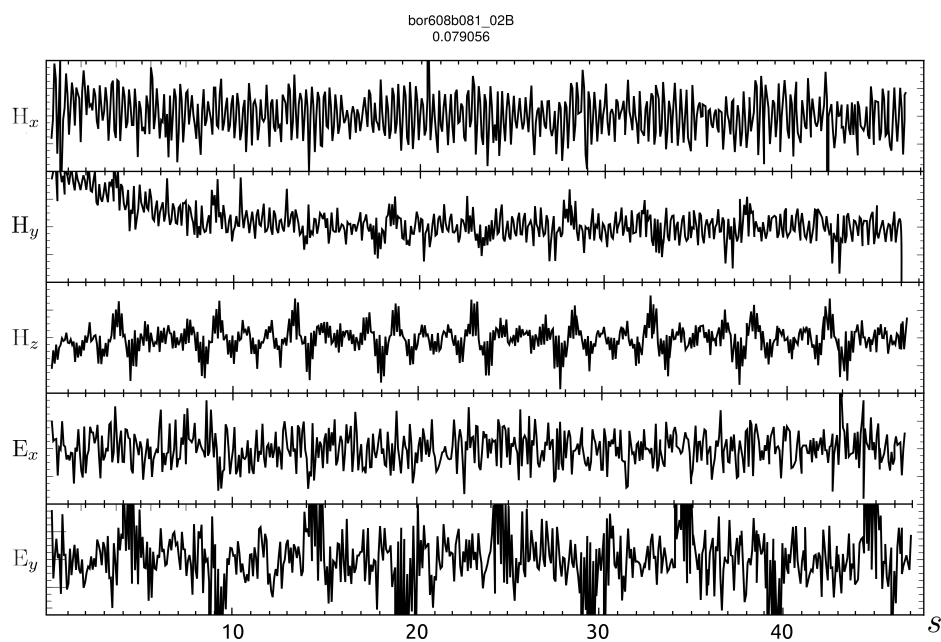
Como discutido na subsecção 4.4.1 para se obter a matriz impedância é necessário

<sup>1</sup>Para aquisição Banda Larga

efetuar a aquisição das componentes dos campos elétricos e magnéticos separadamente.

Essas componentes são registradas em  $[mV/Km]$  e em  $[nT]$  para os campos elétricos e magnéticos respectivamente e são chamadas de séries temporais. As cinco séries temporais ( $E_x$ ,  $E_y$ ,  $H_x$ ,  $H_y$  e  $H_z$ ) são armazenadas em um arquivo binário com extensão padrão TS.

Figura 4 – Series Temporais das cinco componentes contidas no arquivo TS



Fonte: O Autor, 2018

### 5.1.1 Estrutura do Arquivo TS

Os arquivos .TS (*Time Series*) são arquivos binários e estruturados em 3 blocos; comentários, informações e dados (JONES, 1999).

- O Bloco de comentários é marcado pelo símbolo # e todas essas linhas serão ignoradas pelo programa.
- O Bloco de informações contém todas as propriedades da aquisição, como: coordenadas, elevação, declinação magnética, nome da estação, dentre outras.
- O bloco de dados contém 5 colunas e cada valor sendo igual ao registrado pelos sensores, a sequência das colunas são:  $H_x$ ,  $H_y$ ,  $H_z$ ,  $E_x$  e  $E_y$ .

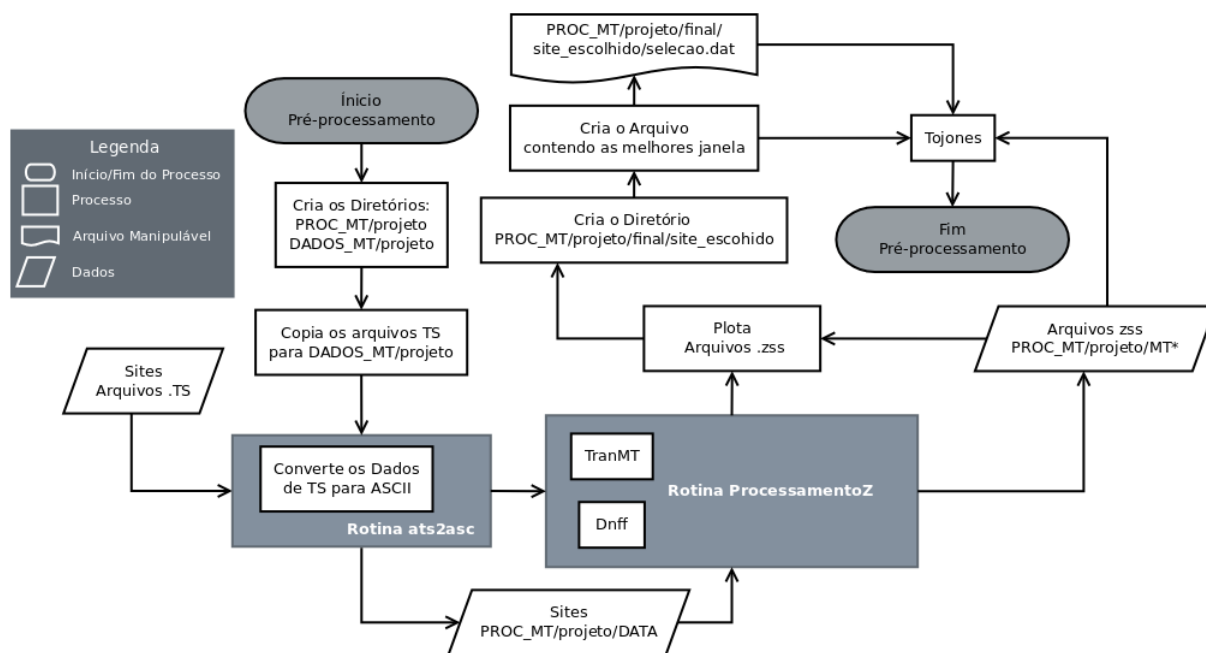
## 5.2 Fluxo de Processamento de Dados MT

Como visto anteriormente (subsecção 4.4.1) a matriz impedância é obtida através das componentes  $H_x$ ,  $H_y$ ,  $E_x$  e  $E_y$ . Porém as mesmas devem estar no domínio da frequência angular, discutido na secção 5.1. As séries temporais são obtidas com taxas de aquisições diferentes, isso implica que o tempo de leitura também será diferente, esse fato propicia que sejam feitas várias leituras com mesma taxa no mesmo ponto, essas leituras são chamadas de rodadas.

O pré-processamento compreende essas etapas: converter os dados de binários para ASCII, para que possam ser manipulados facilmente; utilizar a transformada de Fourier para mudar o domínio dos dados de tempo para frequência angular; filtrar e escolher as melhores rodadas, ou seja, as séries que tiverem a maior coerência e menor ruído.

A figura 5 ilustra todas as etapas de pré-processamento e as subsecções a seguir mostra quais os programas utilizados atualmente e como eles atuam sobre os dados.

Figura 5 – Fluxograma de Processamento Clássico



### 5.2.1 Conversão de Dados Binários

Os arquivos TS são Binários não formatados, sendo que cada linha do arquivo é composta por 80 caracteres.

O comando `ats2asc` (EGBERT, 1997a) é usado para a conversão dos dados, ele efetua a leitura do arquivo, a conversão para ASCII e a separação do arquivo em diferentes diretórios.

A separação do arquivo é dada pela seguinte forma:

1. Diretório DATA/

Arquivos `asc` → Contém as leituras dos sensores.

Arquivos `clk` → Contém a hora que foi iniciada a rodada e também a hora de uma estação para referência remota.

2. Diretório SP/

Aquivos `sp` → Contém os parâmetros da aquisição.

### 5.2.2 Dnff

O programa Dnff faz parte do pacote EMTF (EGBERT, 1997a) desenvolvido por Gary D. Egbert, o pacote EMTF compõem rotinas de mudança de domínio dos dados e processamentos estatísticos para remoção de ruídos.

O Dnff é responsável por fazer a transformada discreta de Fourier sobre os dados e aplica os coeficientes de Fourier que ajustam os problemas de reverberação.

### 5.2.3 TranMT

O programa TranMT também faz parte do pacote EMTF e é responsável por fazer os tratamentos estáticos sobre o dado, removendo *outliers* (pontos muito distantes da curva de tendência) e aumentar a relação sinal/ruído.

A saída do programa TranMT são arquivos ZSS (formato padrão adotado por Egbert) contendo os valores de impedância e fase para cada janela. As janelas são como taxas de aquisições dentro dos arquivos obtidos em campo, essas podem ser configuradas pelo usuário ajustando a melhor representação dos dados em função da taxa de amostragem de aquisição em campo.



#### 5.2.4 ToJones

O programa ToJones (JONES, 1994) extrai as informações dos arquivos ZSS de diferentes janelas e mescla os mesmo em um único arquivo J-format, onde, esses arquivos são usados para plotar as pseudo-seções e outras rotinas como o Rho+ (PARKER; BOOKER, 1997) e programas de inversão.

### 5.3 Pacotes de Processamentos do grupo Geoma - INPE

O grupo Geoma do INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) oferece um treinamento para processamento do magnetotelúrico para alunos e colaboradores.

Os *scripts* oferecidos para o processamento MT foram desenvolvidos pelo Dr. Marcelo Banik de Pádua obtidos sobre comunicação privada pelo autor.

A natureza dos pacotes são *scripts* escritos em *Shell*, *Python*, *C++* que utilizam o programa GMT (NATIONAL SCIENCE FOUNDATION, 2018) para plotagem dos gráficos.

Os *script* auxiliam na utilização dos programas já citados, visto que a saída de um programa é a entrada do próximo. Um exemplo é o programa processamentoZ que prepara os dados para as rotinas Dnff e TranMT, ele ajusta os parâmetros necessários para esses programas e trabalha com os dados de forma padrão auxiliando o usuário na utilização dos pacotes.

## 6 PROPOSTA DE SOFTWARE LIVRE INTEGRADOR

O desenvolvimento do *software*, chamado de PampaMT, foi baseado na filosofia de *Software Livre* (FREE SOFTWARE FOUNDATION, 2018) onde o código fonte será liberado e distribuído para a comunidade geofísica. A linguagem base escolhida para o projeto foi o Python, visto as vastas bibliotecas para trabalhar com dados científicos e a simplicidade da implementação do código.

### 6.1 Linguagem PYTHON

Criada nos anos 80 por Guido Van Rossum no CWI (*Centrum Wiskunde & Informatica*) em Amsterdã, Holanda a linguagem Python foi idealizada no grupo de desenvolvimento da linguagem ABC do CWI, onde rapidamente começou a se destacar.

Na década de 90 foi criada a *Python Software Activity* que começou a cuidar dos interesses da linguagem, nesse período apenas o criador Guido Van tomava as decisões e cuidava do desenvolvimento. Finalmente em 2001 é fundada a *Python Software Foundation* que mantém a linguagem e todos os direitos sobre ela (DRAKE, 2018).

Python é uma linguagem de alto nível<sup>1</sup> onde seu código deve ser organizado favorecendo a interpretação e sendo ao mesmo tempo simples.

Exemplos de código Python:

Mostrar conteúdo na Tela:

Como comentado, o código tem fácil leitura. Para imprimir um conteúdo na tela, por exemplo, podemos simplesmente usar o comando `print`, aproximando muito da língua inglesa.

```
>>> # Comentários
>>> print ('Hello World')
Hello World
```

(6.1.1)

Operações Matemáticas:

As variáveis no código não precisam ser declaradas para um tipo específico (Ex.: *float*, *int*, *string*), como em outras linguagens, o que deixa o código mais fluido.

```
>>> a = 2
>>> b = 5
>>> print (a + b)
7
>>> print (b / a)
```

---

<sup>1</sup>Está relacionada a abstração da linguagem, alto nível significa mais longe da linguagem de código de máquina

2.5

(6.1.2)

### Importando Módulos:

Módulos são estruturas que podemos importar objetos de um código a outro, no script 6.1.3 importamos o valor de  $\pi$  que está contido na variável `pi` dentro do pacote `math`.

```
>>> import math
>>>
>>> pi = math.pi
>>> print(pi)
3.141592653589793
```

(6.1.3)

## 6.2 Módulos e Pacotes

A vasta quantidade de pacotes de terceiros para Python é o que faz a linguagem tão rica. De fato, os pacotes facilitam a implementação do código, por exemplo, se for preciso calcular o espectro de frequência de um conjunto de dados, não será necessário implementar todo o algoritmo para efetuar o cálculo, resolver as integrais e assim por diante, mas sim podemos utilizar o pacote `scipy` e importarmos a função `fftpack` que já foi implementada e executar em nosso código, esse processo economiza tempo em desenvolvimento.

### 6.2.1 Kivy

Kivy é um *framework* criado em 2010 pela KIVY ORGANIZATION (KIVY ORGANIZATION, 2018b) e *Open Source* para o desenvolvimento de interfaces gráficas, a escolha dessa interface foi a alta compatibilidade entre sistemas operacionais e todo o processamento nativo para desenhar a tela é feita no chip gráfico liberando então mais processamento pela CPU.

Kivy também é uma linguagem de programação que permite a criação da interface de forma mais fácil, similar ao QT (QT COMPANY, 2018) ela usa uma linguagem de marcação e indentada onde as propriedades dos *widgets* (Objetos interativos com o usuário) são adicionadas colocando-as a baixo e com espaçamento de 4 espaços do *wid-*

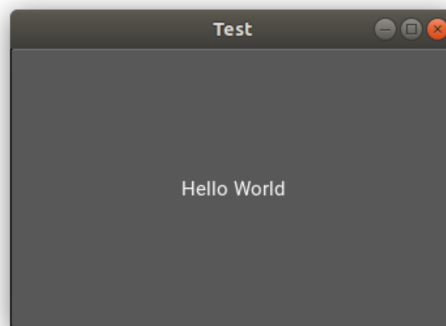
*get.*

Exemplo do Kivy dentro do código Python:

```
>>> from kivy.app import App
>>> from kivy.uix.button import Button
>>>
>>> class Test(App):
>>>     def build(self):
>>>         return Button(text='Hello World')
>>>
>>> Test().run()
```

(6.2.1.1)

Figura 6 – Exemplo de janela com Kivy implementada somente com código Python



Fonte: O Autor, 2018

### 6.2.2 SciPy, Matplotlib, NumPy

SciPy é um ecossistema de ferramentas para processamento de dados científicos contando com ferramentas de manipulação de matrizes, plotagem de gráficos, interpolação dentro outras ferramentas (JONES et al., 2001).

O ecossistema é de código aberto e as principais ferramentas são: NumPy para trabalhos com vetores e matrizes, Matplotlib são ferramentas para plotagem de dados e o próprio SciPy para interpolação, cálculo de espectro de frequência dentre outras.

A tabela 6.1 apresenta 9 pontos distribuídos numa matriz quadrada de ordem 3, onde, a posição (2,2) possui uma anomalia, o código 6.2.2.1 mostra como fazer a interpolação dos pontos e como plotar o resultado (figura 7).

Tabela 6.1 – Distribuição de pontos com valor anômalo ao centro.

Pontos	x	y	z
1	1	1	1
2	2	1	1
3	3	1	1
4	1	2	1
5	2	2	3
6	3	2	1
7	1	3	1
8	2	3	1
9	3	3	1

Fonte: O Autor, 2018

Exemplo Numpy:

```
>>> import Numpy as np
>>>
>>> x = np.array([1,2,3,1,2,3,1,2,3])
>>> y = np.array([1,1,1,2,2,2,3,3,3])
>>> z = np.array([1,1,1,1,3,1,1,1,1])
```

(6.2.2.1)

Exemplo SciPy:

```
>>> from scipy import interpolate
>>> from scipy.interpolate import griddata
>>>
>>> xi = np.arange(x.min(), x.max(), .01)
>>> yi = np.arange(y.min(), y.max(), .01)
>>> xi,yi = meshgrid(xi,yi)
>>>
>>> # Interpolate
>>> zi = griddata((x,y),z,(xi,yi),method='cubic')
```

(cont. 6.2.2.1)

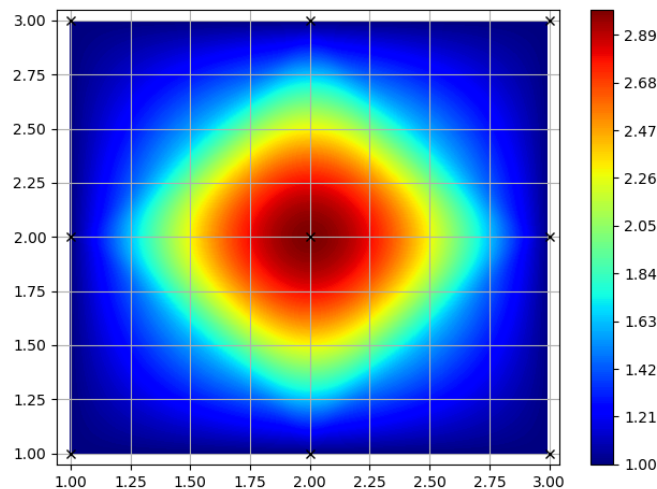
Exemplo Matplotlib:

```
>>> import matplotlib.pyplot as plt
>>>
>>> plt.figure(1)
>>> plt.subplot(111)
>>>
>>> zn = np.arange(z.min(), z.max() + 0.01, .01)
>>>
>>> plt.plot(x, y, 'kx')
>>> plt.contourf(xi, yi, zi, zn)
```

```
>>> plt.colorbar()
>>> plt.grid()
>>> plt.set_cmap('jet')
>>> plt.show()
```

(cont. 6.2.2.1)

Figura 7 – Exemplo dos pontos interpolados usando SciPy e plotados usando Matplotlib



Fonte: O Autor, 2018

### 6.3 Arquitetura do Programa e Abordagem dos fluxos de Processamento

O PampaMT trabalhará com os dados seguindo os fluxos de processamentos comentado no capítulo 5, atualmente o maior consumo de tempo de processamento são destinados a essas etapas. O programa desenvolvido focará em melhorar o tempo de processamento, visualização dos dados e aprendizagem.

O fluxograma da figura 9 ilustra as etapas de inicialização pensados para o programa e como será a execução do pacote EMTF sobre os dados.

Como já discutido as etapas de processamento serão feitas através de interface gráfica e o programa processamentoZ será reescrito para aumentar a compatibilidade no fluxo.

O fluxograma da figura 8 mostra o processo principal do programa, onde o usuário poderá:

1. Plotar as janelas
2. Escolher os períodos para cada janela

3. Executar o processamentoZ para novas rodadas
4. Executar o Tojones sobre as janelas escolhidas

Após o Tojones é finalizado o processo, compreendendo então todas as etapas propostas no trabalho.

Figura 8 – Fluxograma Tela Principal PampaMT

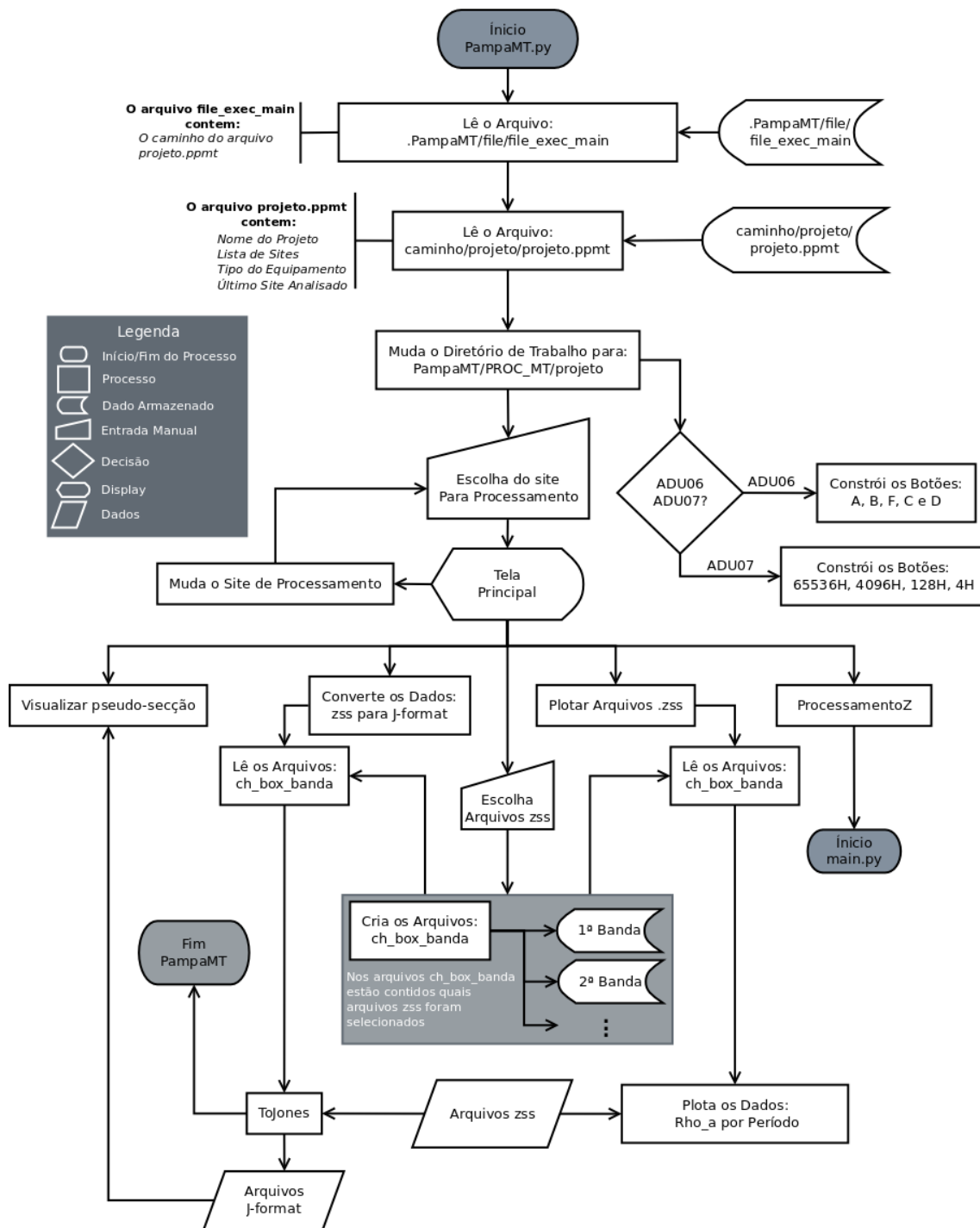
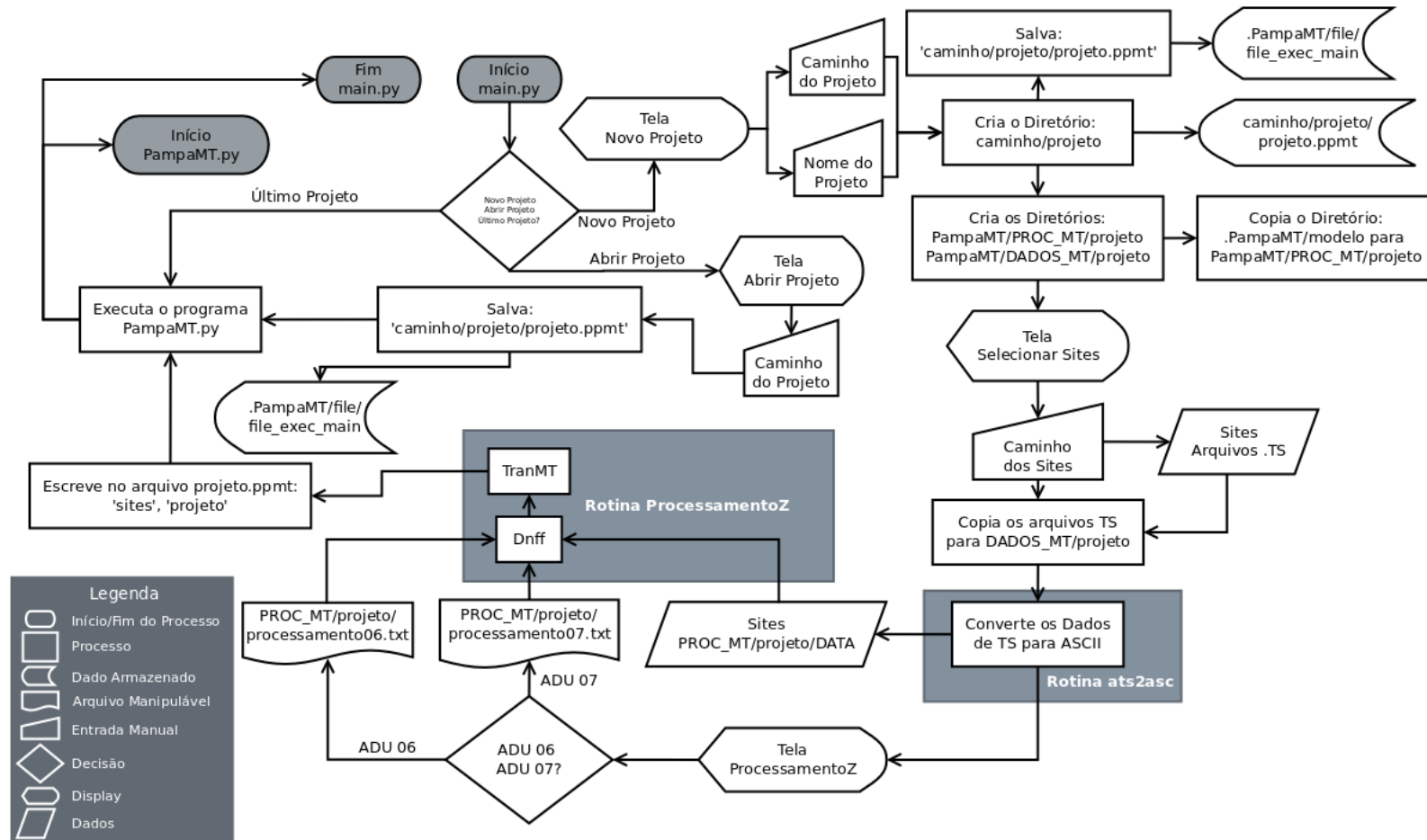


Figura 9 – Fluxograma de Inicialização do PampaMT





## 7 RESULTADOS ESPERADOS

Espera-se ao final desse trabalho de conclusão de curso criar um programa para processamento do método magnetotelúrico , escrito em Python e de fácil usabilidade.

Também melhorar a compatibilidade com os diversos sistemas operacionais e distribuir sobre a licença de *software livre* para a comunidade geofísica. O que deve possibilitar a expansão no magnetotelúrico na academia visto que qualquer pessoa terá acesso ao programa.

Ao final comparar os resultados obtidos com o programa em relação a forma que vinha sendo trabalhada até então. As principais comparações serão: tempo de processamento, visualização, tempo de aprendizagem para uso da plataforma, coerência entre resultados e manipulação da forma de visualização.

## 8 CRONOGRAMA DE ATIVIDADES

### 8.1 1º Semestre

Tabela 8.1 – Cronograma - 1º Semestre 2018

<b>Tarefa</b>	<b>Jan</b>	<b>Fev</b>	<b>Mar</b>	<b>Abr</b>	<b>Mai</b>	<b>Jun</b>
<b>1. Revisão Bibliográfica</b>	X					
<b>1.1 Magnetotélúrico</b>	X	X	X			
<b>1.2 Python 3.5</b>			X	X		
<b>1.3 Pacote PROC-MT (INPE)</b>					X	X

Fonte: O Autor, 2018

### 8.2 2º Semestre

Tabela 8.2 – Cronograma - 2º Semestre 2018

<b>Tarefa</b>	<b>Jul</b>	<b>Ago</b>	<b>Set</b>	<b>Out</b>	<b>Nov</b>	<b>Dez</b>
<b>1. Construção da Interface Gráfica</b>	X	X				
<b>2. Desenvolvimento dos Scripts</b>			X			
<b>3. Fase de testes com Dados Sintéticos</b>				X		
<b>4. Fase de testes com Dados Reais</b>					X	
<b>5. Liberação do Código</b>						X

Fonte: O Autor, 2018

## REFERÊNCIAS

- BARBOSA, A. N. et al. Estudo magnetotelúrico na região centro-sul da província borborema. **Anais do Salão Internacional de Ensino, Pesquisa e Extensão**, v. 9, n. 3, 2018.
- BRACEWELL, R. N.; BRACEWELL, R. N. **The Fourier transform and its applications**. [S.l.]: McGraw-Hill New York, 1986.
- CAGNIARD, L. Basic theory of the magneto-telluric method of geophysical prospecting. v. 18(3), p. 605–635, 1953.
- DIDANA, Y. L. **Multidimensional Inversion of MT data from Krýsuvík High Temperature Geothermal Field, SW Iceland, and study of how 1D and 2D Inversion can Reproduce a given 2D/3D Resistivity Structures Using Synthetic MT Data**. 136 p. Dissertação (Mestrado) — Faculty of Earth Sciences University of Iceland, Reykjavik, Iceland, Abril 2010.
- DRAKE, F. L. **Python 3.6.5 Documentation**. 2018. [Online; acessado em Março, 2018]. Disponível na Internet: <<https://docs.python.org/3/>>.
- EGBERT, G. D. **Gary Egbert's Processing Codes**. 1997. [Online; acessado em Junho, 2018]. Disponível na Internet: <<http://mtnet.info/programs/egbert.html>>.
- EGBERT, G. D. Robust multiple-station magnetotelluric data processing. **Geophysical Journal International**, v. 130, p. 475–496, 1997.
- FREE SOFTWARE FOUNDATION. **Licença de Software Livre**. 2018. [Online; acessado em Maio, 2018]. Disponível na Internet: <<https://www.gnu.org/philosophy/free-sw.html>>.
- HAYT, W. H.; BUCK, J. A. **Eletromagnetismo**. 8. ed. Porto Alegre, Brazil: AMGH Editora Ltda., 2013.
- JONES, A. G. **Magnetotelluric Data File J-format**. 1994. [Online; acessado em Junho, 2018]. Disponível na Internet: <<http://mtnet.info/docs/jformat.txt>>.
- JONES, A. G. **TS Format v1.3**. 1999. [Online; acessado em Junho, 2018]. Disponível na Internet: <[http://mtnet.info/docs/ts\\_format.txt](http://mtnet.info/docs/ts_format.txt)>.
- JONES, E. et al. **SciPy: Open source scientific tools for Python**. 2001. [Online; acessado em Maio, 2018]. Disponível na Internet: <<http://www.scipy.org/>>.
- KIVY ORGANIZATION. **Kivy 1.10.1 documendation**. 2018. [Online; acessado em Março, 2018]. Disponível na Internet: <<https://kivy.org/docs/api-kivy.html>>.
- KIVY ORGANIZATION. **Kivy Organization**. 2018. [Online; acessado em Março, 2018]. Disponível na Internet: <<https://kivy.org/>>.
- MTnet. **MTnet**. 2018. [Online; acessado em Maio, 2018]. Disponível na Internet: <<http://mtnet.info/main/source.html>>.

NATIONAL SCIENCE FOUNDATION. **The Generic Mapping Tools**. 2018. [Online; acessado em Maio, 2018]. Disponível na Internet: <<http://gmt.soest.hawaii.edu/>>.

PALACKY, G. J. **Electromagnetic Methods in Applied Geophysics**. 1. ed. [S.l.]: Society of Exploration Geophysicists, 1987. 53-130 p.

PARKER, B.; BOOKER, J. **Rho+ Code**. 1997. [Online; acessado em Junho, 2018]. Disponível na Internet: <<http://mtnet.info/programs/rhoplus.zip>>.

PARKINSON, W. D. **Introduction to Geomagnetism**. Edinburgh: Scottish Academic Press, 1983.

QT COMPANY. **Site Oficial Qt**. 2018. [Online; acessado em Maio, 2018]. Disponível na Internet: <<https://www.qt.io/>>.

SANTOS-MATOS, A. C. L. **Imagiamento Magnetotelúrico de Estruturas da Litosfera na Porção SE da Província Borborema**. 159 p. Tese (Doutorado) — Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, Março 2012.

TELFORD, W. M. **Applied Geophysics**. New York, USA: British Library Cataloguing, 1990.

TIKHONOV, A. N. On determining electrical characteristics of the deep layers of the earth's crust. **Doklady Akademii Nauk SSSR**, v. 73, p. 295–297, 1950.