

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

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

PATRICK ROGGER GARCIA

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

Caçapava do Sul

2018

LISTA DE FIGURAS

| | | |
|----------|--|----|
| Figura 1 | Arranjo para medir a resistividade (ρ) de um material..... | 12 |
| Figura 2 | Resistividade dos Materiais Geológicos | 13 |
| Figura 3 | Modelo de Terra 2D para a resistividade variando na direção y..... | 18 |
| Figura 4 | Exemplo de janela com Kivy implementada somente com código Python..... | 21 |
| Figura 5 | Exemplo dos pontos interpolados usando SciPy e plotados usando Matplotlib..... | 23 |

LISTA DE TABELAS

| | | |
|------------|--|----|
| Tabela 4.1 | Distribuição de pontos com valor anômalo ao centro. | 22 |
| Tabela 7.1 | Cronograma - 1º Semestre 2018 | 27 |
| Tabela 7.2 | Cronograma - 2º Semestre 2018 | 27 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | |
|-------|--|
| API | Application Programming Interface |
| ASCII | American Standard Code for Information Interchange |
| CPU | Central Processing Unit |
| CWI | Centrum Wiskunde & Informatica |
| 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 |

LISTA DE SÍMBOLOS

| | |
|-----------------|--------------------------------|
| σ | Condutividade |
| ρ | Resistividade |
| V | Diferença de Potencial |
| i | Corrente |
| R | Resistência |
| 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 |
| ρ_f | Densidade de Carga |
| t | Tempo |
| μ | Permissividade Magnética |
| ϵ | Permissividade Elétrica |

SUMÁRIO

| | |
|---|-----------|
| 1 INTRODUÇÃO | 8 |
| 2 OBJETIVOS..... | 9 |
| 2.1 Objetivos Gerais..... | 9 |
| 2.2 Objetivos Específicos | 9 |
| 3 JUSTIFICATIVA | 10 |
| 4 MATERIAIS E MÉTODOS..... | 11 |
| 4.1 Origem das Correntes Telúricas | 11 |
| 4.2 Resistividade dos Materiais..... | 11 |
| 4.3 Fundamentos Teóricos dos Métodos Eletromagnéticos..... | 13 |
| 4.4 Resposta do Método Magnetotelúrico..... | 16 |
| 4.4.1 Impedância Eletromagnética..... | 16 |
| 4.5 Modelo de Dimensões MT | 16 |
| 4.5.1 Terra 1D | 16 |
| 4.5.2 Terra 2D | 18 |
| 4.5.3 Terra 3D | 19 |
| 4.6 Ferramentas de Desenvolvimento do <i>Software</i> | 19 |
| 4.6.1 Linguagem PYTHON | 19 |
| 4.6.2 Módulos e Pacotes | 20 |
| 4.6.2.1 Kivy..... | 21 |
| 4.6.2.2 SciPy, Matplotlib, NumPy | 21 |
| 4.6.3 Pacotes de Processamentos do grupo Geoma - INPE | 23 |
| 5 ALGORITMOS E PROCESSAMENTOS | 25 |
| 5.1 Arquitetura do Programa e Dependências | 25 |
| 5.2 Conversão dos Dados | 25 |
| 5.3 Processamento Estatísticos..... | 25 |
| 5.4 Plotagem das Bandas de Frequências | 25 |
| 5.5 Criação do Arquivo de Saída Padrão..... | 25 |
| 6 RESULTADOS ESPERADOS | 26 |
| 7 CRONOGRAMA DE ATIVIDADES | 27 |
| 7.1 1º Semestre | 27 |
| 7.2 2º Semestre | 27 |
| REFERÊNCIAS | 28 |

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 promovido 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 fraco 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 (1997).

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* para tratamentos e processamentos de dados magnetotelúrico, também a aplicação do programa no processamento e comparação de dados reais coletados em uma região do nordeste brasileiro, conhecida como província Borborema, região que vem sendo grandemente estudada com o magnetotelúrico e proporciona a este trabalho boa validação dos algoritmos de processamento.

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 consolidados¹.

¹(SANTOS, 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, 1997) 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 os códigos não serão compilados.

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

4 MATERIAIS E MÉTODOS

O método magnetotelúrico proposto por TIKHONOV (1950) e CAGNIARD (1953), usa as propriedades eletromagnéticas para estudar a distribuição de resistividade 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 do meio. As frequências das ondas são baixas variando de 1 mHz à 10 kHz .

Ondas com frequências menores que 1 Hz tem origem nos ventos solares que interagem como o campo magnético terrestre, já ondas com frequências maiores de 1 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 investigação e contraste é a condutividade (σ) ou resistividade (ρ) sendo essa o inverso da primeira. A resistividade é uma propriedade particular de um determinado material, ou seja, a partir de uma resistividade

podemos estimar a qual material ela pertence¹.

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

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

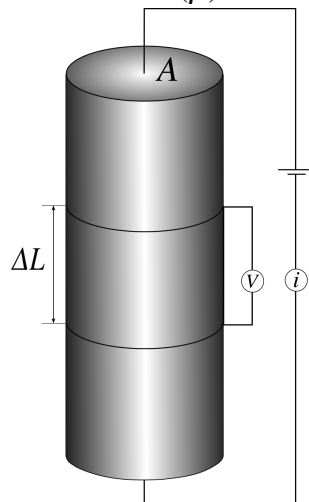
Onde V é a diferença de potencial (Volts - V), i é a corrente (Ampère - A) e R é a resistência (Ohms - Ω), materiais que obedecem essa lei são chamados de materiais ôhmicos.

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, onde, um mesmo material terá a sua resistividade igual independente da geometria.

A figura 1 mostra um circuito para se obter a resistividade, sendo A a área [m^2], R a resistência [Ω], L o comprimento [m] e ρ a resistividade dada em Ωm .

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

Figura 1 – Arranjo para medir a resistividade (ρ) de um material



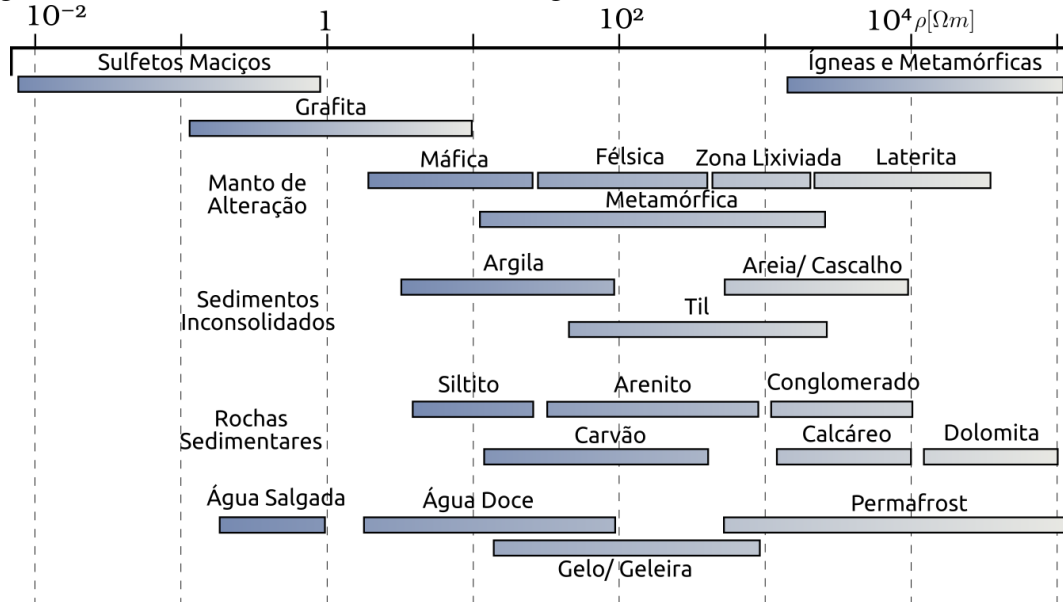
Fonte: Adaptado TELFORD, (1990)

A figura 2 mostra a distribuição de resistividade para diversos materiais geológicos. Portanto podemos identificar a partir de um contexto geológico quais litologias pertence a cada resistividade encontrada.

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

Por exemplo, uma litologia que tenha resistividade 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 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 dos meios litológicos em sub-superfície.

Os campos podem ser descritos pelas seguintes equações²:

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

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

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

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

²Para cargas e correntes livres (macroscópica)

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 μ e usando a equação 4.10 temos:

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

Usando a identidade vetorial:

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

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, ρ_f , é zero assim:

$$\nabla \cdot \vec{E} = 0 \tag{4.14}$$

Portanto:

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

Substituindo [4.15] em [4.12] temos:

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

De forma análoga podemos verificar que:

$$\nabla^2 \vec{H} - \mu \sigma \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} - \mu \epsilon \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2} = 0 \tag{4.17}$$

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

$$E_x = A e^{-ikz} + B e^{ikz} \tag{4.18}$$

$$H_y = \frac{k}{\omega\mu_0}(Ae^{-ikz} + Be^{ikz}) \quad (4.19)$$

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

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.

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

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

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

4.5 Modelo de Dimensões MT

4.5.1 Terra 1D

Para o modelo de Terra 1D considera-se que a resistividade varia apenas em uma direção, ou seja, a resistividade 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 nas duas direções não iguais porem 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 isso significa que a resistividade é classificada como aparente onde ela representa a resistividade 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), e decai com o inverso de e .

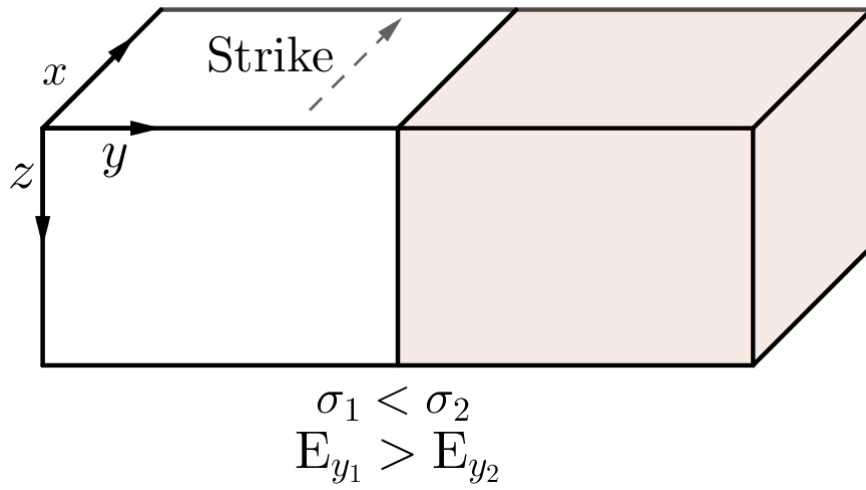
$$\begin{aligned} \delta_\omega &= \frac{1}{\text{Re}(k)} \\ \delta_\omega &= \frac{1}{\text{Re}(\sqrt{i\omega\mu_0\sigma})} \\ \delta_\omega &= \sqrt{\left(\frac{2}{\omega\mu_0\sigma} \right)} \\ \delta_\omega &= \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}} \longrightarrow \delta_f \approx 500 \sqrt{\frac{\rho_a}{f}}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

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. 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 é constante.

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



Fonte: Adaptado (DIDANA, 2010)

Devido a essa diferença entre as resistividades 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:

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

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

4.5.3 Terra 3D

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

A matriz do tensor impedância é então calculada com todos os termos, sem nenhum 0.

4.6 Ferramentas de Desenvolvimento do *Software*

O desenvolvimento do *software* 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.

4.6.1 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 desenvolvedor. 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 nível³ onde seu código deve ser organizado favo-

³Esta relacionada a abstração da linguagem, alto nível significa mais longe da linguagem de código de máquina

recendo 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
```

(4.6.1.1)

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)
2.5
```

(4.6.1.2)

Importando Módulos:

Módulos são estruturas que podemos importar objetos de um código a outro, no script 4.6.1.3 importamos o valor de π que esta contido na variável `pi` dentro do pacote `math`.

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

(4.6.1.3)

4.6.2 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.

4.6.2.1 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.

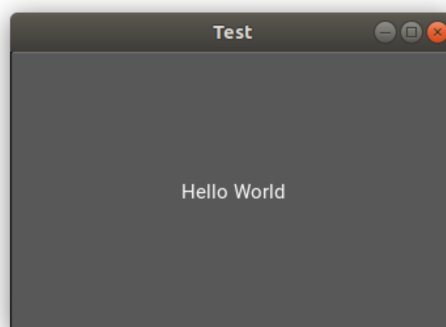
Kivy também é uma linguagem de programação que permite a criação da interface de forma mais fácil, similar ao QT (QT COMPANY, 2018) ela usa uma linguagem de marcação e indentada onde as propriedades dos *widgets* (Objetos interativos com o usuário) são adicionadas colocando-as a baixo e com espaçamento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

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()
```

(4.6.2.1.1)

Figura 4 – Exemplo de janela com Kivy implementada somente com código Python



Fonte: O Autor, 2018

4.6.2.2 SciPy, Matplotlib, NumPy

SciPy é um ecossistema de ferramentas para processamento de dados científicos contando com ferramentas de manipulação de matrizes, plotagem de gráficos, interpola-

ção 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 4.1 apresenta 9 pontos distribuídos numa matriz quadrada de ordem 3, onde, a posição (2,2) possui uma anomalia, o código 4.6.2.2.1 mostra como fazer a interpolação dos pontos e como plotar o resultado (figura 5).

Tabela 4.1 – 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])
```

(4.6.2.2.1)

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')
```

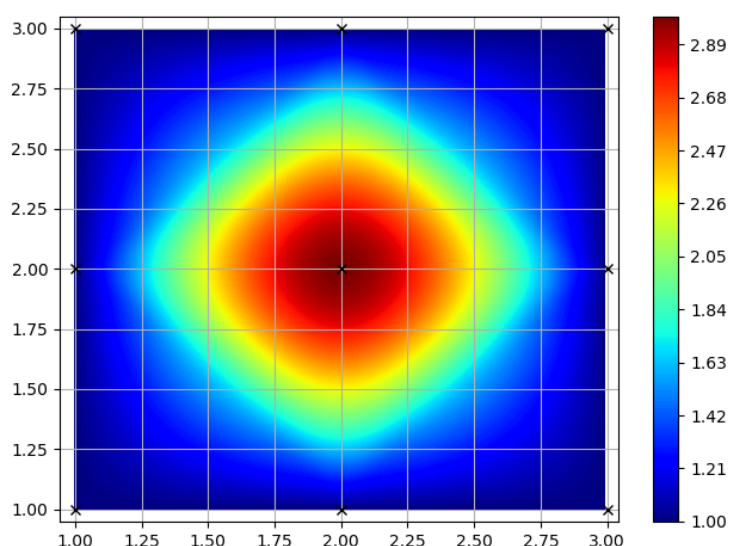
(cont. 4.6.2.2.1)

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. 4.6.2.2.1)

Figura 5 – Exemplo dos pontos interpolados usando SciPy e plotados usando MatPlotLib



Fonte: O Autor, 2018

4.6.3 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 diretamente pelo autor.

A natureza dos pacotes são *scripts* em *Shell* que utilizam o programa GMT (NATIONAL SCIENCE FOUNDATION, 2018) para plotagem dos gráficos e o núcleo de

processamento dos dados são as rotinas propostas por EGBERT e nos trabalhos de Alan Jones, disponíveis no site MTnet

5 ALGORITMOS E PROCESSAMENTOS

O magnetotelúrico segue algumas etapas de processamento, dentre elas: a conversão dos dados de binário para ASCII, processamentos estatísticos para remoção de ruídos, separação de melhores bandas adquiridas em diferentes faixas de frequência e a geração de um arquivo padrão já com diversas informações processadas. Essas etapas são chamadas de pré-processamento e são elas que consomem a maior parte do tempo de computação ao todo.

O programa então desenvolvido nesse trabalho de conclusão de curso foca nessas etapas de processamento.

6 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, possibilitando a expansão no magnetotelúrico na acadêmica visto que qualquer pessoa terá acesso ao programa.

Ao final comparar os resultados obtidos com o programa em relação a forma que vinha sendo trabalho 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.

7 CRONOGRAMA DE ATIVIDADES

7.1 1º Semestre

Tabela 7.1 – Cronograma - 1º Semestre 2018

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

Fonte: O Autor, 2018

7.2 2º Semestre

Tabela 7.2 – Cronograma - 2º Semestre 2018

| Tarefa | Jul | Ago | Set | Out | Nov | Dez |
|---|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| 1. Construção da Interface Gráfica | X | X | | | | |
| 2. Desenvolvimento dos Scripts | | | X | | | |
| 3. Fase de testes com Dados Sintéticos | | | | X | | |
| 4. Fase de testes com Dados Reais | | | | | X | |
| 5. Liberação do Código | | | | | | 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.
- 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. Dissertation (Masters Thesis) — Faculty of Earth Sciences University of Iceland, Reykjavik, Iceland, Abril 2010.
- DRAKE, F. L. **Python 3.6.5 Documentation**. 2018. [Online; accessed March, 2018]. Available from Internet: <<https://docs.python.org/3/>>.
- 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; accessed May, 2018]. Available from 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, E. et al. **SciPy: Open source scientific tools for Python**. 2001. [Online; accessed May, 2018]. Available from Internet: <<http://www.scipy.org/>>.
- KIVY ORGANIZATION. **Kivy 1.10.1 documentation**. 2018. [Online; accessed March, 2018]. Available from Internet: <<https://kivy.org/docs/api-kivy.html>>.
- KIVY ORGANIZATION. **Kivy Organization**. 2018. [Online; accessed March, 2018]. Available from Internet: <<https://kivy.org/>>.
- MTnet. **MTnet**. 2018. [Online; accessed May, 2018]. Available from Internet: <<http://mtnet.info/main/source.html>>.
- NATIONAL SCIENCE FOUNDATION. **The Generic Mapping Tools**. 2018. [Online; accessed May, 2018]. Available from 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.
- PARKINSON, W. D. **Introduction to Geomagnetism**. Edinburgh: Scottish Academic Press, 1983.
- QT COMPANY. **Site Oficial Qt**. 2018. [Online; accessed May, 2018]. Available from Internet: <<https://www.qt.io/>>.

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

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