

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.....	15
Figura 4	Exemplo de janela com Kivy implementada somente com código Python.....	18
Figura 5	Exemplo dos pontos interpolados usando SciPy e plotados usando Matplotlib	20

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1	Distribuição de pontos com valor anômalo ao centro.	19
Tabela 7.1	Cronograma - 1º Semestre 2018	23
Tabela 7.2	Cronograma - 2º Semestre 2018	23

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

MT	Magnetotelúrico
API	Application Programming Interface
CWI	Centrum Wishunde & Informatica
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
GEOMA	Grupo de Geomagnetismo

LISTA DE SÍMBOLOS

σ	Condutividade
ρ^1	Resistividade
V	Diferença de Potencial
i	Corrente
R	Resistência
A	Área
L	Comprimento
$\nabla \times$	Rotacional
$\nabla \cdot$	Divergente
\vec{E}	Compo Elétrico
\vec{H}	Compo Magnetizante
\vec{J}	Densidade de Corrente
\vec{D}	Campo de Deslocamento Elétrico
ρ^2	Densidade de Carga
t	Tempo
μ	Permissividade Magnética
ϵ	Permissividade Elétrica
1D	Uma Dimensão
2D	Duas Dimensões
3D	Três Dimensões
TE	Transversal Elétrico
TM	Transversal Magnético

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	OK	8
2 OBJETIVOS	OK	9
2.1	Objetivos Gerais	9
2.2	Objetivos Específicos	9
3 JUSTIFICATIVA	OK	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	15
4.4.1	Impedância Eletromagnética	15
4.5	Modelo de Dimensões MT	15
4.5.1	Terra 1D	15
4.5.2	Terra 2D	15
4.5.3	Terra 3D	16
4.6	Processamento das Series Temporais (mudar o título)	16
4.7	Ferramentas de Desenvolvimento do <i>Software</i>	OK 16
4.7.1	Linguagem PYTHON	16
4.7.2	Módulos e Pacotes	17
4.7.2.1	Kivy	18
4.7.2.2	SciPy, Matplotlib, NumPy	18
4.7.3	Pacotes de Processamentos do grupo Geoma - INPE	20
5 ALGORITMOS E PROCESSAMENTOS		21
5.1	Arquitetura do Programa e Dependências	21
5.2	Conversão dos Dados	21
5.3	Processamento Estatísticos	21
5.4	Plotagem das Bandas de Frequências	21
6 RESULTADOS ESPERADOS	OK	22
7 CRONOGRAMA DE ATIVIDADES	OK	23
7.1	1º Semestre	23
7.2	2º Semestre	23
REFERÊNCIAS		24

1 INTRODUÇÃO OK

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 pensado primeiramente para tornar o MT mais difundido, construindo um *software* com interface gráfica e distribuição livre. O *software* então 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 também fazendo 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 OK

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 no 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 a criação de novos algoritmos e otimizações dos que já existem para tornar o processamento mais fácil e barato.

Tem objetivo também de obter pseudosecções de resistividades e modelos litogeofísicos de resistividade para a região de estudo com as novas rotinas comparando com trabalhos anteriores (SANTOS, 2012) e (BARBOSA et al., 2018).

3 JUSTIFICATIVA OK

Esse trabalho foi pensado para auxiliar a expansão do magnetotelúrico , hoje existem vários programas proprietários para processamento de dados magnetotelúrico , mas, são programas caros e que não permitem ver como são feitos os fluxos de processamentos dentro do programa. O processamento hoje usado na maioria dos trabalhos acadêmicos ou não 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 hoje são feitos através de linhas de comando unindo diversos programas separados, esse processo acaba sendo muito instável provocando diversos tipos de erros e não prevenindo outros, também força a instalação de vários pacotes separados que muitas vezes são compilados e instalados manualmente, afastando uma pessoa leiga em computação a utilizar.

O programa então pretende ser escrito em apenas uma linguagem e utilizar pacotes nativamente compatíveis isso preve 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 então mais fácil e prevenindo 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 então 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.

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-espaco 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 condutividade. A resistividade é uma propriedade particular de cada 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).

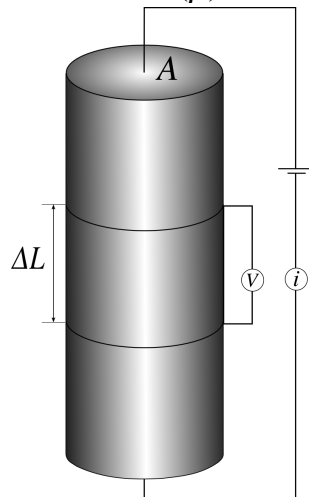
$$V = Ri \quad (4.1)$$

Onde V é a diferença de potencial (V), i é a corrente (A) e R é a resistência (Ω), materiais que obedecem essa lei são chamados de materiais ôhmicos, a Terra é considerada um material ôhmico, porém 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 resistividade então é definida pela **que o material oferece para um comprimento (equação 4.2)..... mudar isso e colocar igual do livro**, 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



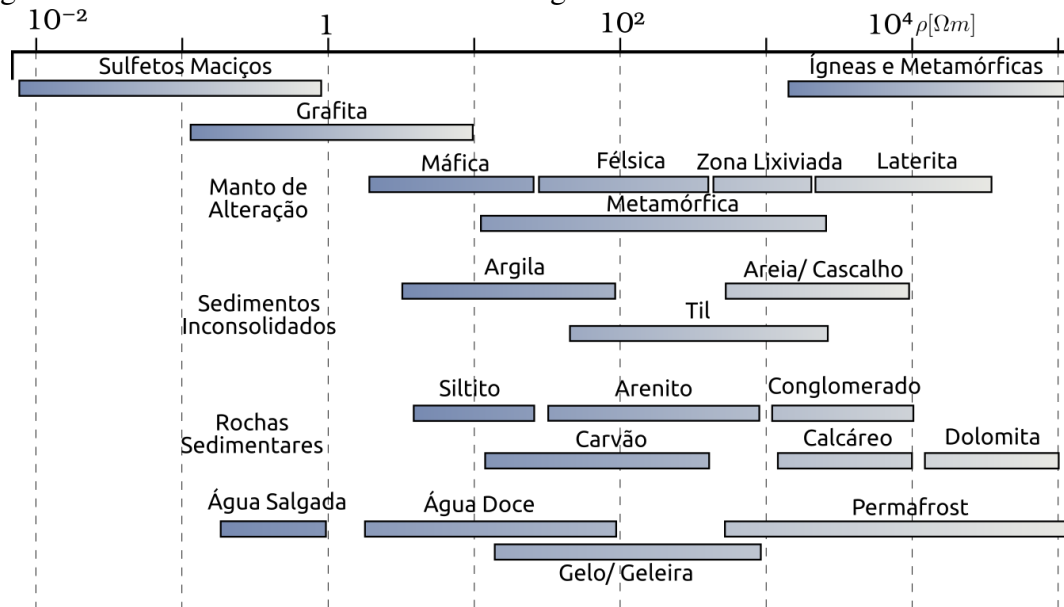
Fonte: Adaptado TELFORD, (1990)

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

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

pertence a cada resistividade encontrada, 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:

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

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

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

²Para cargas e correntes livres (macroscópica)

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

$\vec{E} \rightarrow$ 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 $[s]$

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, já considerando para os trabalhos de investigação o meio supõe-se ser isotrópico, assim, tornando estáticos os tensores.

4.4 Resposta do Método Magnetotelúrico

4.4.1 Impedância Eletromagnética

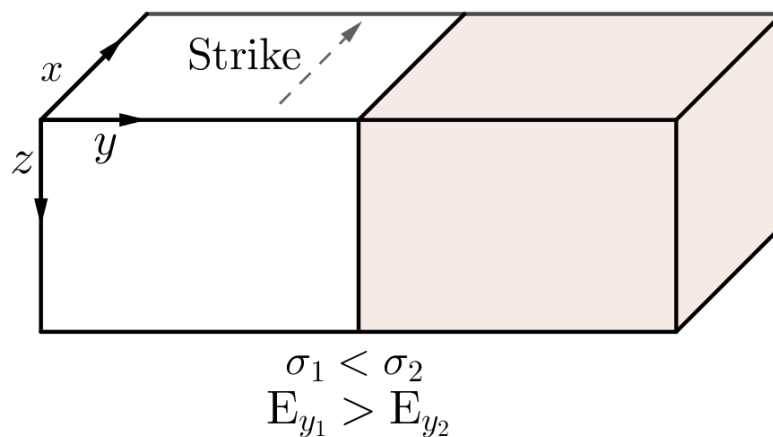
4.5 Modelo de Dimensões MT

4.5.1 Terra 1D

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:

$$Z_{2D} = \begin{pmatrix} 0 & Z_{xy} \\ Z_{yx} & 0 \end{pmatrix} \quad (4.10)$$

Assim cada polarização pode ser escrita como:

$$\text{TE} = \begin{cases} \frac{\partial E_x}{\partial y} = \frac{\partial B_z}{\partial t} = -i\omega B_z \\ \frac{\partial E_x}{\partial z} = \frac{\partial B_y}{\partial t} = i\omega B_y \\ \frac{\partial B_z}{\partial y} - \frac{\partial B_y}{\partial z} = \mu\sigma E_x \end{cases} \quad (4.11)$$

$$\text{TM} = \begin{cases} \frac{\partial B_x}{\partial y} = \mu\sigma E_z \\ -\frac{\partial B_x}{\partial z} = \mu\sigma E_y \\ \frac{\partial E_z}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial z} = i\omega B_x \end{cases} \quad (4.12)$$

4.5.3 Terra 3D

4.6 Processamento das Series Temporais (mudar o título)

4.7 Ferramentas de Desenvolvimento do *Software* OK

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.

4.7.1 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, rapidamente ela começou a ter destaque. Na década de 90 foi criada a *Python Software Activity* que começou a ser a mantenedora por exemplo do python.org, nesse período apenas o criador tomava decisões e era desenvolvedor da linguagem, 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 onde seu código deve ser organizado favorecendo a interpretação 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 podemos simplesmente usar o comando `print`, aproximando muito da linguagem falada.

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

(4.7.1.1)

Operações Matemáticas:

As variáveis no código não precisam ser declaradas para um tipo específico (Ex.: *float*, *int*, *string*), deixando assim o código mais fluido.

```
>>> a = 2
>>> b = 5
>>> print (a + b)
7
>>> print (b / a)
2.5
```

(4.7.1.2)

Importando Módulos:

Módulos são estruturas que podemos importar objetos de um código a outro, no script 4.7.1.3 importamos o valor de π que está contido na variável `pi` dentro do pacote `math`.

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

(4.7.1.3)

4.7.2 Módulos e Pacotes

A vasta quantidade de pacotes de terceiros para Python é o que faz a linguagem tão rica, 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.

4.7.2.1 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 para desenhar a tela é feita no chip gráfico liberando então mais processamento pela CPU.

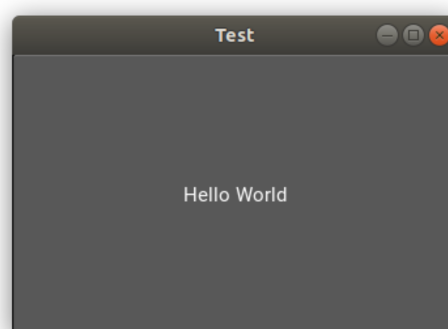
Kivy também é uma linguagem de programação que permite a criação da interface de forma mais fácil, similar ao QT (QT COMPANY, 2018) ela usa uma linguagem de marcação e indentada onde as propriedades dos *widgets* (Objetos interativos com o usuário) são adicionadas colocando-as a baixo e com espaçamento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

(4.7.2.1.1)

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



Fonte: O Autor, 2018

4.7.2.2 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 4.7.2.2.1 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])
```

(4.7.2.2.1)

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')
```

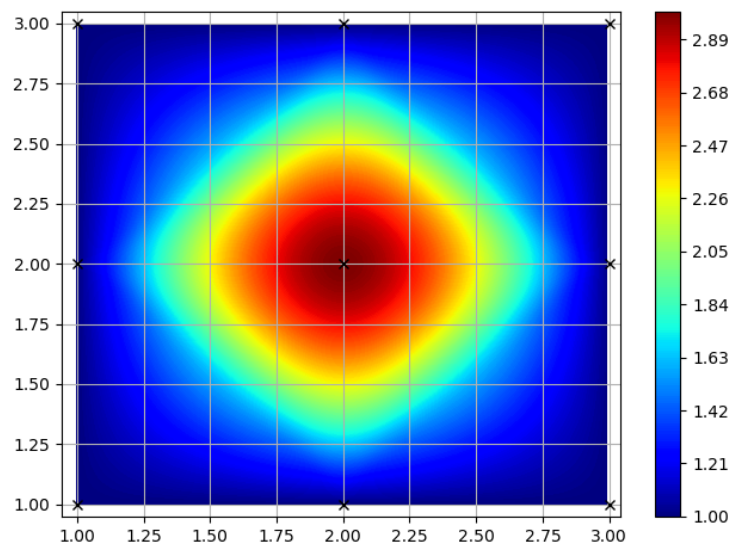
(cont. 4.7.2.2.1)

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. 4.7.2.2.1)

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



Fonte: O Autor, 2018

4.7.3 Pacotes de Processamentos do grupo Geoma - INPE

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 as etapas que consomem a maior parte do tempo de processamento.

O programa então desenvolvido nesse trabalho de conclusão de curso foca nessas etapas de processamento. As seções a seguir mostram como cada etapa será abordada dentro do fluxo de processamento do programa.

5.1 Arquitetura do Programa e Dependências

5.2 Conversão dos Dados

5.3 Processamento Estatísticos

5.4 Plotagem das Bandas de Frequências

5.5 Criação do Arquivo de Saída Padrão

6 RESULTADOS ESPERADOS OK

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 OK

7.1 1º Semestre

Tabela 7.1 – Cronograma - 1º Semestre 2018

Tarefa	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun
1. Revisão Bibliográfica	X					
1.1 Magnetotélurico	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/>>.
- 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.