

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA**

**PATRICK ROGER GARCIA**

**DESENVOLVIMENTO E APLICAÇÃO DO SOFTWARE RIMT  
(ROPLUS INVERSION MAGNETOTELLURIC)**

**ORIENTADOR:** VINICIUS ABREU DE OLIVEIRA

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

**Caçapava do Sul**

**2018**

## 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, tendo 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, 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 amigável e distribuição livre. O RiMT (Roplus inversion Magnetotelluric) nasceu então 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 (PYTHON SOFTWARE FOUNDATION, 2018) e a construção da interface gráfica será desenvolvida usando a API Kivy (KIVY ORGANIZATION, 2018) dentre outros pacotes. A escolha por essa linguagem foi a vasta quantidade de pacotes, o crescente número de pessoas implementando e a facilidade com que é a construção de seu código.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

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

### Fundamentos do Método

As flutuações no campo magnético da Terra e tempestades equatoriais geram correntes que penetram no interior da Terra, para simplificar os modelos, em forma de ondas planas ortogonais, por indução geram novas correntes chamadas de correntes 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.

Para construção do método algumas situações de contorno são propostas:

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.

A equação 2.1 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  $e$ .

$$\delta_\omega = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}} \rightarrow \delta_f \approx 500\sqrt{\frac{\rho_a}{f}} \quad (2.1)$$

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

### Fundamento Matemático e Leis de Maxwell

Usando as leis de Maxwell (HAYT; BUCK, 2013) podemos medir os campos elétricos e magnéticos separadamente em diferentes componentes e assim unir para obter

a função de *skin-depth*.

Os campos podem ser descritos pelas equações a seguir para cargas e correntes livres (macroscópica):

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2.2)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (2.3)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (2.4)$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho \quad (2.5)$$

$\vec{E} \rightarrow$  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 situações de contorno para um meio isotrópico temos as seguintes relações (equações constitutivas):

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (2.6)$$

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad (2.7)$$

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (2.8)$$

$\mu \rightarrow$  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 que se propagam.

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.

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 apresentara uma resistência a corrente.

$$\begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} H_x \\ H_y \end{pmatrix} \quad (2.9)$$

$$E_x(\omega) = Z_{xx}(\omega)H_x(\omega) + Z_{xy}(\omega)H_y(\omega) \quad (2.10)$$

$$E_y(\omega) = Z_{yx}(\omega)H_x(\omega) + Z_{yy}(\omega)H_y(\omega) \quad (2.11)$$

Podemos então reescrever as equações 2.2 e 2.3 usando as equações constitutivas 2.6, 2.7 e 2.8.

$$\nabla \times \vec{E} = -\mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \quad (2.12)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \sigma \vec{E} + \epsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (2.13)$$

O desenvolvimento das equações estão bem descrita no trabalho de DIDANA(2010). A partir do tensor podemos usá-lo para definir a resistividade aparente a partir da equação 2.14

$$\rho_a = \frac{1}{\mu_0 \omega} |Z|^2 \quad (2.14)$$

## Teoria 1D

O modelo de resistividade para a Terra 1D é descrita como a variação da resistividade apenas em profundidade, assim o tensor impedância é escrito da seguinte forma:

$$Z_{1D} = \begin{pmatrix} 0 & Z_{xy} \\ -Z_{xy} & 0 \end{pmatrix} \quad (2.15)$$

Assim a partir das soluções das equações diferenciais temos:

$$Z_{xy}(\omega) = \frac{E_x(\omega)}{H_x(\omega)} = \frac{\omega\mu_0}{k} \quad (2.16)$$

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

## Teoria 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.

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:

$$Z_{2D} = \begin{pmatrix} 0 & Z_{xy} \\ Z_{yx} & 0 \end{pmatrix} \quad (2.17)$$

Assim cada polarização pode ser escrita como:

$$\text{TE} = \begin{cases} \frac{\partial E_x}{\partial y} = \frac{\partial B_z}{\partial t} = -i\omega B_z \\ \frac{\partial E_x}{\partial z} = \frac{\partial B_y}{\partial t} = i\omega B_y \\ \frac{\partial B_z}{\partial y} - \frac{\partial B_y}{\partial z} = \mu\sigma E_x \end{cases} \quad (2.18)$$

$$\text{TM} = \begin{cases} \frac{\partial B_x}{\partial y} = \mu\sigma E_z \\ -\frac{\partial B_x}{\partial z} = \mu\sigma E_y \\ \frac{\partial E_z}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial z} = i\omega B_x \end{cases} \quad (2.19)$$

## Teoria 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 é então calculada com todos os termos, sem nenhum 0.

## Estrutura do software (RiMT)

O RiMT será desenvolvido em linguagem Python na sua terceira versão, a linguagem é gratuita o que torna mais fácil o uso no meio acadêmico, todo o código será liberado após a conclusão do projeto sobre os termos da licença GNU. Os recursos e APIs utilizadas na construção do programação serão:

1. Kivy 1.10.0 → Para a construção da interface gráfica
2. Matplotlib 2.2.2 → Plotagem dos gráficos em conjunto com a API Kivy
3. Numpy e Scipy → Processamento dos dados
4. Python 3.5 → Linguagem base

A primeira parte do projeto será a construção da interface usando como *kernel* de processamento os pacotes desenvolvidos pelo grupo GEOMA DGE do INPE.

Na segunda fase será feita a troca do *kernel* para um novo, escrito somente em Python, essa troca é motivada pelas varias dependências externas que os pacotes tinham que tornavam o código muito instável e de difícil aprendizagem, porém, escrito somente em python o código terá uma melhor comunicação e tornando também mais rápido, apartir RiMT o usuário final não terá contato com o as linhas de comando.

O programa será desenvolvido para distribuições Linux baseadas no Debian.

Após concluir as duas fases será iniciado o processo de testes com dados sintéticos, e otimização do código. No final seram processados os dados do projeto Estudos geofísicos e tectônicos na Província Borborema, Nordeste do Brasil (MCT/CNPq, 42.0222/2005-7) no nordeste brasileiro, esses dados já foram processados no trabalho de SANTOS de (2012) utilizando os pacotes do INPE, os dados serão comparados e analisados.

### **3 RESULTADOS ESPERADOS**

Espera-se ao final desse trabalho de conclusão de curso criar uma interface gráfica para processamento de dados MT.

Essa interface será disponibilizada para a comunidade geofísica.



## 4 CRONOGRAMA DE ATIVIDADES

### 1º Semestre

Tabela 4.1: 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>1.2.1 Linguagem</b>			X	X		
<b>1.2.2 Kivy 1.10.0</b>			X	X		
<b>1.2.3 Numpy, Scipy, Matplotlib</b>			X	X		
<b>1.3 Pacote PROC-MT (INPE)</b>					X	X
<b>1.3.1 Ats2asc</b>					X	
<b>1.3.2 ProcessamentoZ</b>						X
<b>1.3.3 Tojones</b>						X

Fonte: O autor

### 2º Semestre

Tabela 4.2: 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

## REFERÊNCIAS

CAGNIARD, L. Basic theory of the magneto-telluric method of geophysical prospecting. v. 18(3), p. 605–635, 1953.

DGE, D. de G. E. **Geomagnetismo (GEOMA)**. [S.l.], 2018. Available at < [http : //www.dge.inpe.br/geoma/](http://www.dge.inpe.br/geoma/) >. Visited in March, 2018.

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.

EGBERT, G. D. Robust multiple-station magnetotelluric data processing. **Geophysical Journal International**, v. 130, p. 475–496, 1997.

HAYT, W. H.; BUCK, J. A. **Eletromagnetismo**. 8. ed. Porto Alegre, Brazil: AMGH Editora Ltda., 2013.

KIVY ORGANIZATION. **Kivy 1.10.1 documendation**. [S.l.], 2018. Available at < [https : //kivy.org/](https://kivy.org/) >. Visited in March, 2018.

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

PYTHON SOFTWARE FOUNDATION. **Python 3.6.5 documendation**. [S.l.], 2018. Available at < [https : //docs.python.org/3/](https://docs.python.org/3/) >. Visited in March, 2018.

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.

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.