

## Desenvolvimento de software Gráfico para aplicação em Eletromagnetismo (EM)

Umberto José Travaglia Filho<sup>1</sup> – [beto\\_jtf@yahoo.com.br](mailto:beto_jtf@yahoo.com.br), Mônica Giannocarro Von Huelsen<sup>1</sup>, André Luiz G. de Paiva<sup>1</sup>,  
<sup>1</sup>Universidade de Brasília - UnB

Copyright 2012, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

Este texto foi preparado para a apresentação no V Simpósio Brasileiro de Geofísica, Salvador, 27 a 29 de novembro de 2012. Seu conteúdo foi revisado pelo Comitê Técnico do V SimBGF, mas não necessariamente representa a opinião da SBGf ou de seus associados. É proibida a reprodução total ou parcial deste material para propósitos comerciais sem prévia autorização da SBGf.

### Resumo

Este resumo tem como objetivo apresentar o resultado parcial do trabalho que teve início no mestrado do primeiro autor e se estende com novas ramificações. O resultado da sub-rotina *RDImagEM* é a segunda etapa do complemento do software *ImagEM* que por meio de um inversão simples e rápida usando o método da secante tem como resposta os valores estimados de resistividade e profundidade a partir dos dados de tensão obtidos em levantamentos *in loop* de equipamentos eletromagnéticos no domínio do tempo (TDEM). A *RDImagEM* integra o processamento do *ImagEM* com a parte gráfica de uma Imagem da Resistividade pela Profundidade – IRP, mais conhecida como *Resistivity Depth Imagem – RDI*. O programa foi desenvolvido inicialmente em *MatLab* e sua versão final será em Java.

### Introdução

Nos últimos anos houve um crescente aumento no número de softwares que auxiliam no processamento de dados geofísicos, principalmente para os métodos sísmicos e gravimétricos. Contudo, esse desenvolvimento não seguiu o mesmo passo para o método eletromagnético (EM), onde o número de programas é limitado e o custo de licença elevado.

Com o intuito de explorar essa lacuna, formou-se o Grupo de Pesquisa e Interpretação Eletromagnética da Universidade de Brasília, que tem com seu primeiro produto o software *ImagEM*, que é capaz de processar dados de equipamentos TDEM.

Utilizando os dados de tensão registrados pelo equipamento terrestre, o *ImagEM* calcula a resistividade e profundidade estimada por meio de uma inversão simples utilizando o método da secante e a teoria TDEM. Com estes resultados associados à distância entre as estações, ou a coordenada da linha do levantamento.

A sub-rotina *RDImagEM* insere-se neste contexto como complemento do *ImagEM* para construir um perfil 2D dos dados processados e reproduzir uma *RDI* tendo como arquivo de entrada o resultado do *ImagEM*, configurando assim um pacote de programas para o método TDEM.

Atualmente a *RDImagEM* está sendo desenvolvido em *MatLab*, devido a sua fácil alteração no código e incremento de funções. Contudo a sua versão final será em Java com o objetivo de redução de custos, torná-lo mais amigável a interface programa/usuário e uma maior versatilidade de plataforma, já que pode ser instalado em Windows e Linux sem dificuldade.

### Metodologia/ Problema Investigado

Os equipamentos EM comumente são compostos de um transmissor e um receptor. O transmissor é uma bobina confeccionada com fio condutor. No transmissor é injetada uma corrente elétrica de grande intensidade, essa corrente elétrica variante no tempo gera um campo magnético que se intensifica de acordo com o número de voltas do fio. Este campo produzido pelo transmissor é denominado de campo magnético primário. A Figura 1 ilustra o comportamento deste campo (Scrivens, 2009).

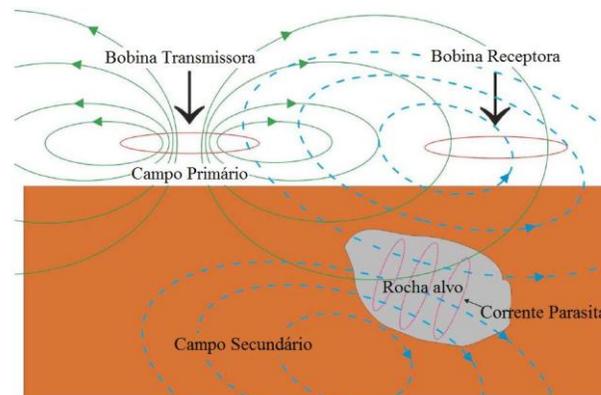


Figura 1 – Comportamento do campo primário e secundário produzidos pela bobina transmissora e receptora (Scrivens, 2009)

O campo magnético primário propaga-se até o subsolo e interage com corpos de maior ou menor condutividade. A interação desse campo induz uma corrente elétrica no solo em subsuperfície. Essas correntes são chamadas de correntes parasitas, sendo mais intensas para os corpos condutores e menos intensas para os corpos resistivos (Telford *et al.*, 1990; Kearey *et al.*, 2009).

Nos corpos resistivos, devido a pouca diferença de potencial, o campo primário se propaga sem sofrer uma atenuação relevante. Entretanto, quando o campo primário encontra um corpo condutor (fluido salino, sulfetos maciços, grafita), o deslocamento das correntes parasitas é mais intenso. Essas correntes movimentam-se de forma alternada no corpo condutor, gerando um campo eletromagnético secundário que se propaga até o

receptor (Nabighian & Macnae, 1987a,b; Kearey *et al.*, 2009). O campo secundário, ao encontrar o receptor, gera uma corrente alternada em sua bobina. O pulso elétrico no receptor é convertido em sinais eletrônicos e registrado pelo equipamento durante o levantamento.

O método TDEM baseia-se na resposta, detectada pelo receptor, do campo eletromagnético secundário gerado pela variação da resistividade no subsolo (campo secundário), quando este foi submetido também a um campo eletromagnético primário proveniente do transmissor. No caso de equipamentos que trabalham *off time*, o campo secundário só é captado quando a corrente no transmissor é desligada, registrando somente a resposta do alvo (Telford *et al.*, 1990; Fullagar, 1989).

Com relação à interação do campo eletromagnético com o meio, Hoversten & Morrison (1982) avaliaram o modelo de 1, 2 e 3 camadas horizontais baseados na corrente máxima e em um semi-espaço infinito para bobinas concêntricas. O comportamento do campo eletromagnético, gerado pela bobina transmissora, decai à medida que interage com as rochas em subsuperfície devido à penetração do sinal (Nabighian, 1979). As medidas de tensão ( $U(t)$ ) captadas pelo receptor são obtidas pela derivada do campo magnético em relação ao tempo ( $\partial h/\partial t$ ), formulado por Newman *et al.* (1987):

$$U(t) = -\mu_0 \left( \frac{\partial h}{\partial t} \right) M \quad (1)$$

Onde:  $M$  é a área efetiva da bobina receptora ( $m^2$ ) e  $\mu_0$  é permeabilidade elétrica ( $H/m^2$ ).

Esta tensão captada pela bobina receptora, para cada intervalo de tempo, pode ser relacionada com modelos de camadas em diferentes profundidades (Wait, 1951; Wait & Hill, 1973; Eaton, 1989). Frischknecht & Raab (1984), com base na teoria da Lei de Faraday, demonstraram que, na interação corrente/meio, a corrente elétrica fica confinada à superfície do condutor durante os tempos iniciais (*early time*) e é normal ao campo que a gerou. Quando esta corrente começa a ser dissipada (*late time*), ocasiona uma diminuição do campo magnético que gera corrente na vizinhança. Esse comportamento é explicado pela Figura 2.

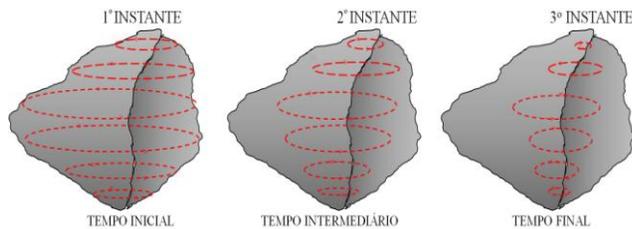


Figura 2: Esboço do fluxo de corrente num condutor interagindo após desligamento do transmissor. Modificado de Von Huelsen, 2007.

Assim, utilizando-se o acoplamento eletromagnético entre o transmissor, o alvo e o receptor é possível medir a resposta do campo magnético secundário. Quanto mais condutor for o corpo, mais intenso o campo magnético emitido por ele, e maior será o tempo de interação eletromagnética captado pela bobina receptora (Frischknecht & Raab, 1984).

### Cálculo da Resistividade

A descrição matemática da resistividade segundo o tempo inicial ( $\rho_{TI}$ ) que foi implementada no programa é dada por (Frischknecht & Raab, 1984):

$$\rho_{TI} = \frac{r_T^3 \frac{dB_z}{dt}}{3a_r} \quad (2)$$

Onde  $r_T$  é o raio do transmissor,  $a_r$  é a área efetiva do receptor em  $m^2$  e  $\frac{dB_z}{dt}$  é a impedância obtida pela bobina receptora em ( $V/A$ ).

Quando este processo é completado, a configuração da distribuição de corrente induzida será mais ou menos invariante no tempo, também chamado de tempo tardio ( $\rho_{TD}$ ). Neste último estágio temos diminuição da amplitude do campo secundário e a resistividade é descrita por Frischknecht & Raab (1984).

$$\rho_{TD} = \frac{\mu}{4\pi t} \left( \frac{4\mu T_m}{t \frac{dB_z}{dt}} \right)^{2/3} \quad (3)$$

Onde  $\mu$  é a permeabilidade magnética no vácuo ( $4\pi \cdot 10^{-7}$ ),  $T_m$  é o momento de dipolo do transmissor que é dado pelo produto da corrente pela área do transmissor,  $t$  é o tempo em segundos.

Com os dados da resistividade calculados pelas equações de  $\rho_{TI}$ ,  $\rho_{TD}$  e o método da secante, é possível obter a função de decaimento da resistividade pelo tempo de interação  $f(t, \rho)$ :

$$f(t, \rho) = \frac{\left( \frac{\mu r a_r 0,886226}{\delta a_t} \right) (1-2R) \left[ \left( \frac{\mu r^2}{t x} \right)^{k+1,5} - \left( \frac{\mu r^2}{(t+\delta x)} \right)^{k+1,5} \right]}{4^k k! (2k+5)(2k+3)} \quad (4)$$

Onde  $\delta$  é o corte da rampa em segundos,  $a_t$  é a área da bobina transmissora em  $m^2$ ;  $K$  é número de iterações;  $R$  é o resto da divisão  $k/2$  (vale 0 ou 1); e  $x$  é logaritmo da  $\rho$  (resistividade) em que  $\rho$  é dado pelas Equações 2 e 3.

## O Cálculo da Profundidade

Existem várias formas de se calcular a profundidade utilizando campo eletromagnético secundário. No *ImagEM*, utiliza-se a resistividade do corpo alvo e tempo médio de decaimento de cada canal. Uma das equações de profundidade do programa foi proposta por Eaton (1989) e adaptada para bobinas dispostas sobre o mesmo eixo vertical.

$$d = 750\sqrt{t \cdot \rho} \quad (5)$$

Onde  $t$  é o tempo médio de cada canal em segundos e  $\rho$  é a resistividade ( $\Omega \cdot m$ ).

## Resultados

### O software *ImagEM* e a função *RDI*

O *ImagEM* (figura 3) calcula a resistividade e a profundidade aproximadas para cada sondagem eletromagnética observada em campo. Estes parâmetros são modelos geoeletrônicos iniciais da subsuperfície. A saída é um arquivo de dados do tipo xyz.

A sub-rotina *RDI* gera uma *RDI* por vez de cada linha do levantamento, sendo essa localizada no banco de dados. Após encontrar a linha, a função armazena todos os valores de resistividade, de profundidade e de distância em um eixo predeterminado do levantamento. Com essa localização é montada uma matriz com valores de resistividade (figura 4).

Para os dados que não convergiram a matriz apresenta valores nulos tanto na resistividade quanto na profundidade. Para os problemas de profundidade zero nos últimos canais, foi obtida a média entre as profundidades vizinhas não nulas, evitando assim que o perfil não rebata o valor de profundidade para a superfície e inverta o gráfico. Como mostrado no círculo vermelho na figura 4.

Apesar do *MatLab* possuir funções de interpolação como o *mesh*, ou o *meshgrid*, essas funções não estão sendo usadas devido ao objetivo final que é plotar a *RDI* em Java, onde espera-se resolver essas e outras questões que venham surgir.

Após testes no *MatLab*, passou-se a desenvolver o programa no Java *NetBeans* devido à sua interface gráfica simplificada, às funções de busca, à separação e a construção de matrizes dinâmicas. Este processo se encontra completo e testado, sendo necessário apenas uma adaptação quanto a sintaxes de programação em Java.

Para o desenvolvimento do gráfico da *RDI* utilizamos a biblioteca gráfica *JFreeChart* que está disponível no site que leva seu nome. A função de interpolação está sendo testada pelo Grupo de Pesquisa.

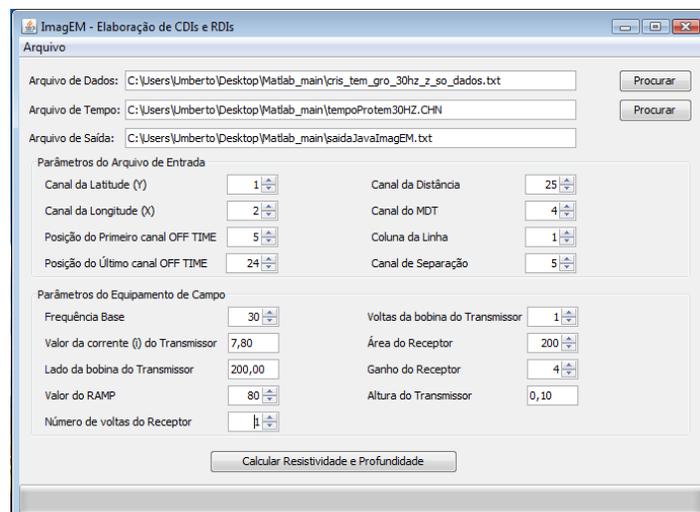


Figura 3: Interface de usuário do *ImagEM* em Java. Na figura temos os dados de entrada e o arquivo de saída; os parâmetros do arquivo de entrada e os parâmetros utilizados pelo equipamento em campo.

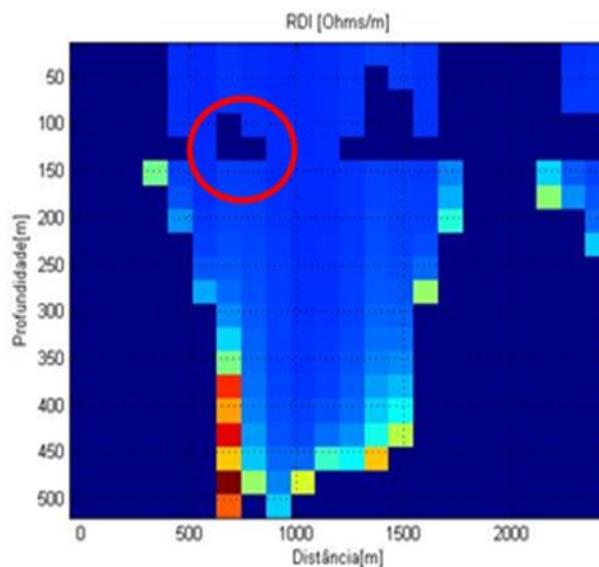


Figura 4: Perfil de uma *RDI* gerada pela função *RDI* gerada pela função *RDI*, as cores mais quentes representam regiões condutivas, as cores mais claras representam regiões mais resistivas.

## Discussão e Conclusões

Com o aumento do número de levantamentos utilizando o método TDEM, faz-se necessário uma ferramenta que possa processar esses dados. O *ImagEM* e sua sub-rotina *RDI* insere-se neste contexto como ferramenta alternativa no processamento de dados EM.

Devido a velocidade de processamento dos programas apresentados aqui o investigador de campo pode realizar mudanças na sua área de levantamento sem ter a

necessidade de voltar ao escritório para processar os dados e obter resultados.

Acreditamos que a função matemática de interpolação ajudará na interpretação e construção do gráfico, já que a mesma suprirá parcialmente os dados nulos de resistividade, preenchendo algumas lacunas na matriz de plotagem.

### Agradecimentos

Os autores deste trabalho agradecem ao Observatório Sismológico de Brasília e ao Instituto de Geociências da UnB pela liberação de suas instalações, das licenças dos softwares MatLab e Geosoft e da ajuda de custo na viagem para a apresentação deste trabalho. A Aline Tavares (Vale S.A), ao professor Jones Yudi (Faculdade de Tecnologia – UnB).

### Referências

Eaton, P. A., Hohmann, G. W., 1989. A rapid inversion technique for transient electromagnetic soundings. *Physics of the Earth Planetary Interiors*, 53, 384-404.

Frischknecht, F. C., Raab, P. V., 1984. Time domain electromagnetic soundings at the Nevada test site. *Geophysics* 49, 981-992.

Fullagar, P. K., 1989. Generation of conductivity-depth pseudo sections from coincident loop and in-loop TEM data. *Expl. Geophys* 20, 43-53.

Hoversten, G. M., Morrison, H. F., 1982. Transient fields of a current loop source above a layered earth. *Geophysics* 47, 1068-1077.

Kearey, P., Brooks, M., Hill, I., 2009. *Geofísica de Exploração*, first edition, São Paulo.

Nabighian, M.N., Macnae C.J., 1987a. Eletromagnetic Theory for geophysical applications. In Nabighian, M.N. Ed, *Eletromagnetic methods in applied geophysics*, v. 1, Theory, Investigations in geophysics, SEG, 203-252.

Nabighian, M.N., Macnae C.J., 1987b. Time domain eletromagnetic prospecting methods. In Nabighian, M.N. Ed, *Eletromagnetic methods in applied geophysics*, v. 1, Theory, Investigations in geophysics, SEG, 427-520.

Nabighian, M. N., 1979. Quasi-static transient response of a conductivity half-space – an approximate representation. *Geophysics* 44, 1700 – 1705.

Newman, G. A., Anderson, W. L., Holmann, G. W., 1987. Interpretation of transient electromagnetic soundings over three-dimensional structures for the central-loop configuration. *Geophys. J. R. astr. Soc* 89, 889-914.

Scrivens, S., 2009. Poster Comparison Between Fixed-Wing and Helicopter Electromagnetics Systems: <http://www.geotem.com.mx/>.

Talwani, M., 1965. Computation with the help of a digital computer of magnetic anomalies caused by bodies of arbitrary shape. *Geophysics* 30, 797-817.

Telford, W.M., Geldart, L.P., Sheriff, R.E., 1990. *Applied Geophysics*, second edition, Cambridge University.

Von Huelsen, M. G. V., 2007. Interpretação de Dados de Eletromagnetometria Aeroeletrotransportada (AEM) do Sistema GEOTEM (Domínio do Tempo). Tese de Doutorado nº080, Instituto de Geociências – Universidade de Brasília – UnB, 202 pp.

Waint, J. R., Hill, D. A., 1973. Excitation of a homogeneous conductive cylinder of finite length by a prescribed axial current distribution. *Radio Science* 12, 1169-1176.

Wait, J. R., 1951. A conducting sphere in a time varying magnetic field. *Geophysics* 16, 666-672.