

Estudo dos efeitos da topografia em sondagens MT através da computação paralela

Rodrigo Erasmo da Conceição Silva, CPGf/UFPa, Brasil, rodrigoerasmo@gmail.com

Luiz Rijo, CPGf/UFPa, Brasil, rijo@amazon.com.br

Copyright 2009, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation during the 11th International Congress of the Brazilian Geophysical Society held in Salvador, Brazil, August 24-28, 2009.

Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the 11th International Congress of the Brazilian Geophysical Society and do not necessarily represent any position of the SBGf, its officers or members. Electronic reproduction or storage of any part of this paper for commercial purposes without the written consent of the Brazilian Geophysical Society is prohibited.

Abstract

In this work we presented some results on the effects of the topography on MT soundings computed through parallel computation. With this objective a program was developed to draw no structured finite elements meshes and also for minimization of the semi-band of the system of linear equations. Even with the minimization of the semi-band of the finite elements matrix, the computational time for a MT sounding with 51 periods (0.01 - 1000 s) takes more than one hour in a sequential computer with a Core 2 Duo processor. On the other hand, the computational time can be greatly reduced by using parallel computation. For instance, in a cluster with more than 51 cores like Netune the time can be reduced for less than one minute. Three models with a topographic valley were computed: Model 0 is a valley without body, Model 1 with a 1D layer with 10 $\Omega \cdot m$, 1000 m thick and 1000 m below the bottom of the valley. In the Model 2, the 1D layer was substituted by a two-dimensional body with 10 $\Omega \cdot m$, 1000 m thick and 2000 m width. The effects of the topography were analyzed with several EM soundings at different positions across the valley.

Introdução

Na modelagem geofísica 2-D e 3-D nos métodos geofísicos eletromagnéticos é comum se usar o método dos Elementos Finitos (FE) (Volakis et al., 1998; Rijo 2008). Dependendo do tipo de modelo usa-se malhas estruturadas (grid) ou malhas não estruturadas (mesh). Se a geometria do modelo for simples, as malhas estruturadas fornecem, normalmente, bons resultados. A vantagem das malhas estruturadas é que elas são simples de construir e resultam em sistemas de equações lineares de elementos finitos com semi-banda reduzida o que é uma grande vantagem em termo de memória RAM e tempo computacional. Entretanto, para modelos complexos, como os com topografia, as malhas estruturadas não fornecem bons resultados. Assim é necessário se usar malhas não estruturadas que apresentam a flexibilidade para tratar qualquer modelo por mais complexos que sejam (Baude, 2000; Filho, 2002; Silva e Rijo, 2008). A desvantagem das malhas não estruturadas é que elas são mais trabalhosas de construir e além disso resultam em sistemas de equações lineares de elementos finitos com semi-bandas maiores do que as das malhas estruturadas. Com isso o tempo computacional cresce bastante. Nesse caso, uma

alternativa para se reduzir o tempo computacional de uma sondagem MT é se usar a computação paralela distribuindo cada uma das frequências em diferentes processadores de um cluster de computadores, como o Netuno, por exemplo. Neste trabalho apresentamos alguns exemplos de como isso pode ser feito, usando várias sondagens MT ao longo de um vale.

Metodologia

Para se obter os resultados aqui apresentados, foi necessário passar por cinco etapas: a) construção da malha inicial; b) refinamento da malha; c) redução da semi-banda da matriz de EF; d) construção e calibração do programa MT 2-D, e) modelagem MT do vale.

A primeira etapa consiste na construção da malha inicial, a qual é feita com o auxílio do toolbox *pdetool* do programa MATLAB (Matlab, 2008). A próxima etapa é o refinamento da malha inicial. Infelizmente o MATLAB não oferece recursos suficientes para o refinamento do tipo de malha exigido neste trabalho. Assim, foi preciso desenvolver um programa para esta etapa. Usamos dois modelos para testar o programa de construção de malhas. Estes modelos serão apresentados na seção de "Testes da malha não estruturada". A Figura 1 mostra o Modelo_0. A Figura 2 mostra a malha de FE inteira e a Figura 3 mostra um zoom na região central da malha correspondente ao Modelo_0. A Figura 4 mostra o Modelo_1, enquanto que as Figuras 5 e 6 mostram, respectivamente, a malha inteira e um zoom da região central para o modelo. A Figura 7 mostra o Modelo_2, enquanto que as Figuras 8 e 9 mostram, respectivamente, a malha inteira e um zoom da região central para este modelo.

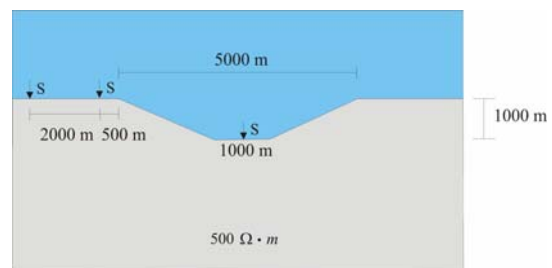


Figura 1: Geometria do Modelo_0.

A terceira etapa é a redução da semi-banda da matriz de EF, para reduzir o tempo de processamento e a memória computacional usados na resolução do sistema de equações lineares, e que foi feita com o auxílio do algoritmo Cuthill-McKee (Cuthill and McKee, 1969). As duas últimas etapas referem-se a construção e calibração do programa MT 2-D, e cuja calibração será apresentada nos exemplos abaixo.

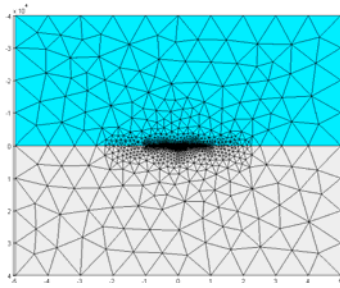


Figura 2: Malha de FE do Modelo_0.

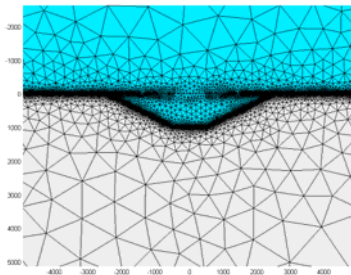


Figura 3: Zoom da malha de FE do Modelo_0.

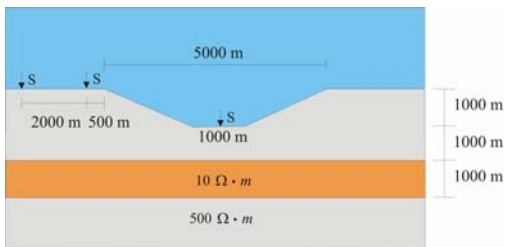


Figura 4: Geometria do Modelo_1.

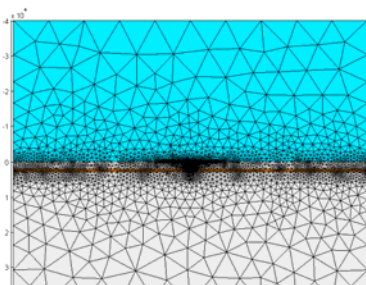


Figura 5: Malha de FE do Modelo_1.

A terceira etapa é a redução da semi-banda da matriz de EF, para reduzir o tempo de processamento e a memória computacional usados na resolução do sistema de equações lineares, e que foi feita com o auxílio do algoritmo Cuthill-McKee (Cuthill and McKee, 1969). As

duas últimas etapas referem-se a construção e calibração do programa MT 2-D, e cuja calibração será apresentada nos exemplos abaixo.

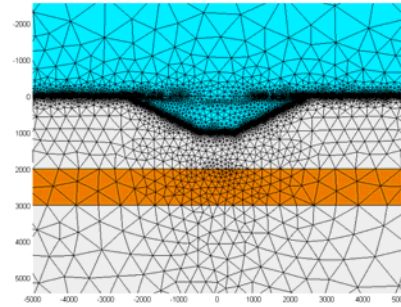


Figura 6: Zoom da malha de FE do Modelo_1.

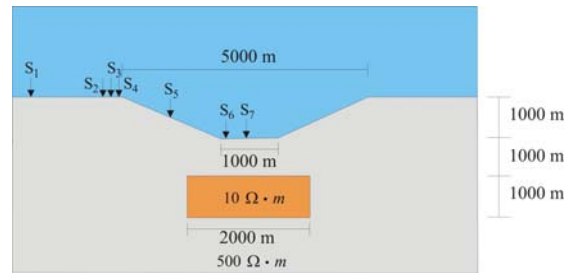


Figura 7: Geometria do Modelo_2.

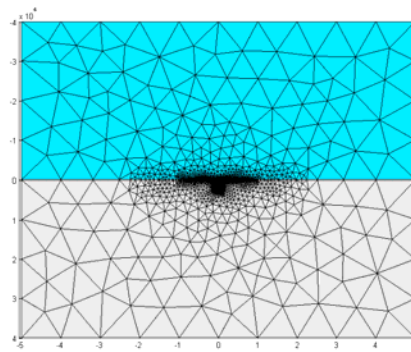


Figura 8: Malha de FE do Modelo_2.

Testes da malha não estruturada

Antes de tudo é preciso testar se o programa de geração de malhas não estruturadas funciona bem. Para isso, usamos alguns modelos com resultados conhecidos calculados com malhas estruturadas (grids). O primeiro modelo (www.rijo.pro.br) é ilustrado na Figura 10. As Figuras 10, 11 e 12 mostram a comparação as componentes E_y , H_x e H_z calculadas com uma malha estruturada (www.rijo.pro.br) e não estruturada apresentada aqui.

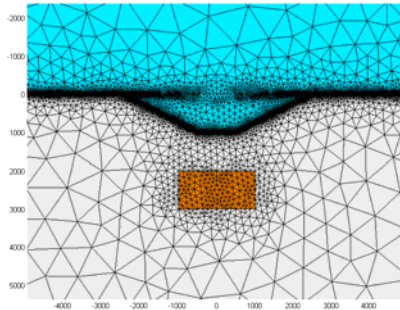


Figura 9: Zoom da malha de FE do Modelo 2

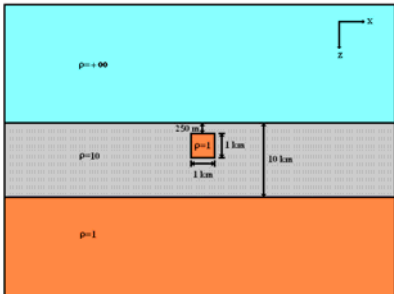


Figura 10: Geometria do modelo de calibração 1 (www.rijo.pro.br)

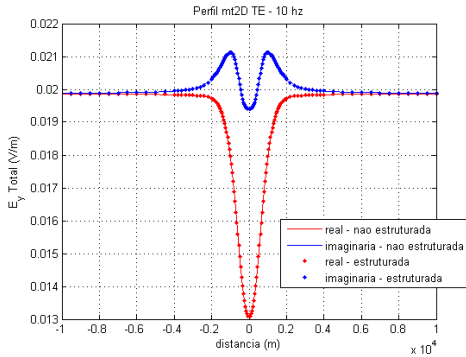


Figura 11: Comparação da componente E_y do campo elétrico (www.rijo.pro.br).

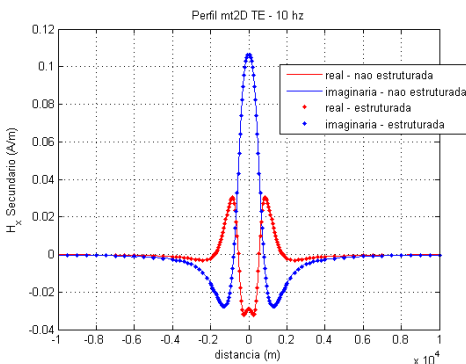


Figura 12: Comparação da componente H_x do campo magnético (www.rijo.pro.br).

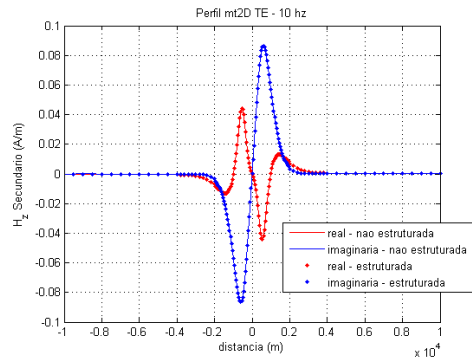


Figura 13: Comparação da componente H_z do campo magnético (www.rijo.pro.br).

O segundo modelo de teste é ilustrado na Figura 14 e trata-se do modelo do vale de Wannamaker et al. (1986). As Figuras 15 e 16 comparam os resultados de Wannamaker et al. (1986) e os obtidos aqui para o modo TE. De modo análogo, as Figura 17 e 18 mostram os resultados do modo TM. Muitos outros testes foram feitos, inclusive com resultados usando o algoritmo das equações integrais, e todos mostram o bom desempenho do nosso programa de geração de malha não estruturada. Outros testes podem ser vistos em www.rijo.pro.br.

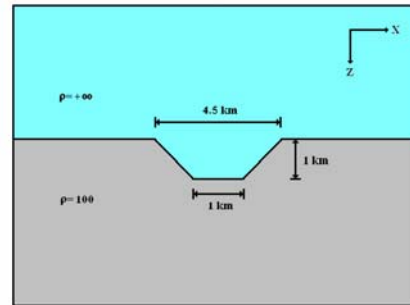


Figura 14: Modelo de calibração 2.

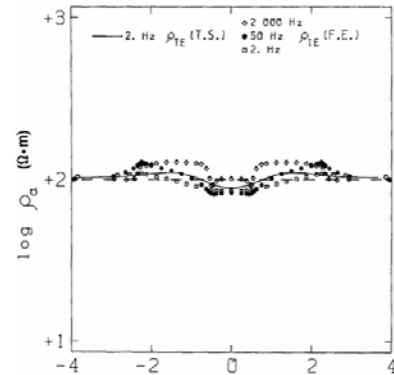


Figura 15: Perfis (km) obtidos por de Wannamaker et al. (1986). Modo TE. Freqüências 2Hz, 50Hz e 2000Hz.

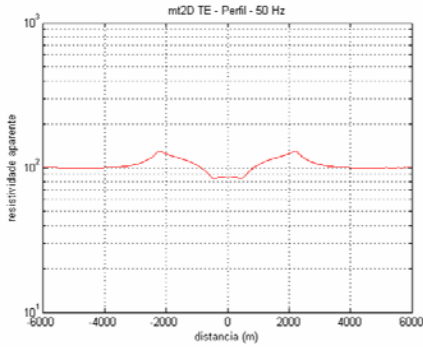


Figura 16: Perfis obtidos com nossos programas. Modo TE. Frequência 50Hz.

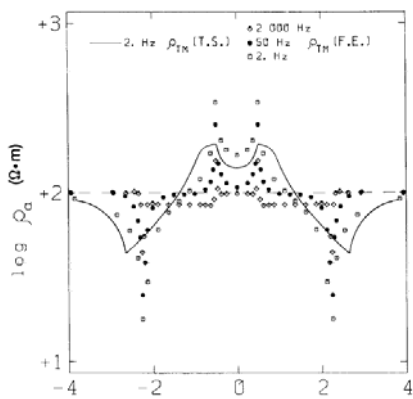


Figura 17: Perfis (km) obtidos por de Wannamaker et al. (1986). Modo TM. Frequências 2Hz, 50Hz e 2000Hz

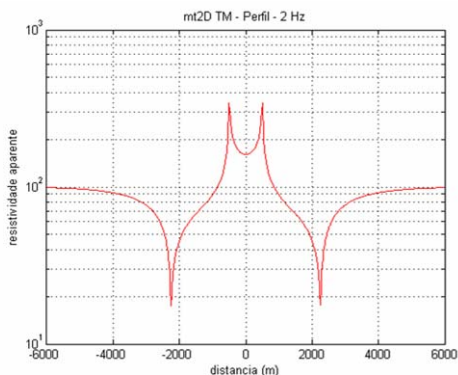


Figura 18: Perfis obtidos com nossos programas. Modo TM. Frequência 2Hz.

Resultados

As sondagens do Modelo_0 MT 2-D modo TE são apresentada na Figura 19 (Resistividade Aparente) e na Figura 20 (Fase). As sondagens do Modelo_0 MT 2-D modo TM são apresentada na Figura 21 (Resistividade

Aparente) e na Figura 22 (Fase). As sondagens do Modelo_1 MT 2-D modo TE são apresentada na Figura 23 (Resistividade Aparente) e na Figura 24 (Fase). As sondagens do Modelo_1 MT 2-D modo TM são apresentada na Figura 25 (Resistividade Aparente) e na Figura 26 (Fase). As sondagens feitas para o modelo_2 MT 2-D modo TE são apresentada na Figura 27 (Resistividade Aparente) e na Figura 28 (Fase). A diferença entre o modelo_1 e o modelo_2 é que a camada de 10 Ω.m do modelo 1 foi substituída por um corpo de 10 Ω.m, na mesma profundidade (2000 m), mas com largura de 2000 m. As sondagens feitas para o modo TM são apresentadas na Figura 29 e na Figura 30

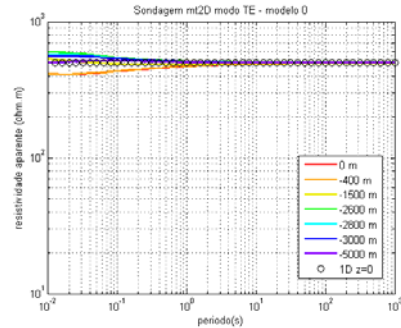


Figura 19: Sondagens Resistividade Aparente modo TE para o modelo_0.

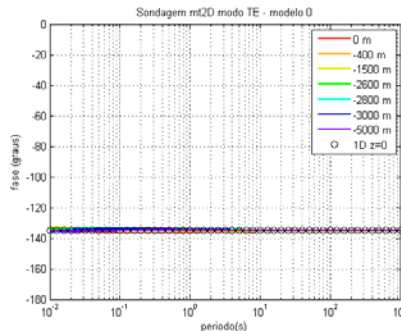


Figura 20: Sondagens Fase modo TE para o modelo_0.

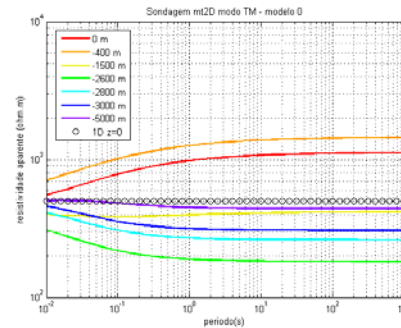


Figura 21: Sondagens Resistividade Aparente modo TM para o modelo_0.

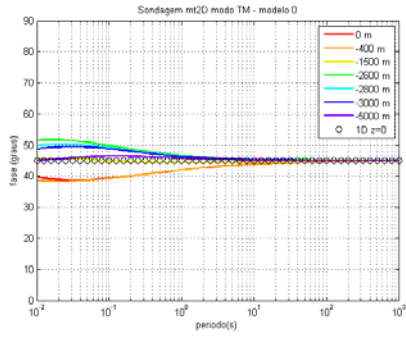


Figura 22: Sondagens Fase modo TM para o modelo_0.

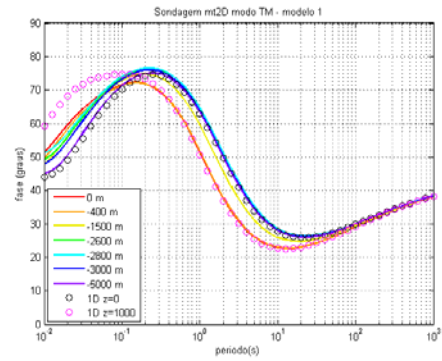


Figura 26: Sondagens Fase modo TM para o modelo_1.

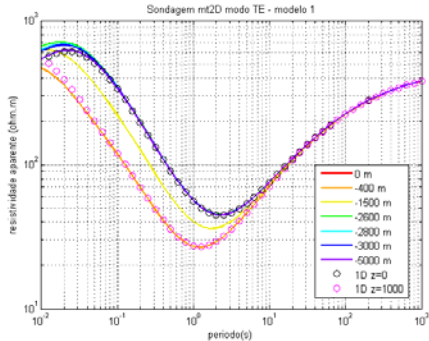


Figura 23: Sondagens Resistividade Aparente modo TE para o modelo_1.

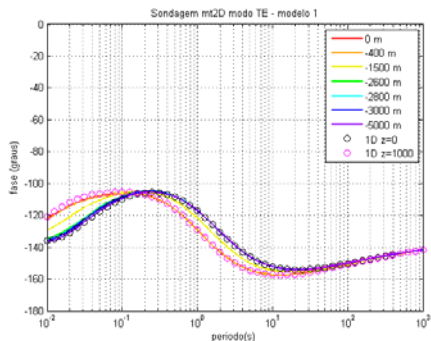


Figura 24: Sondagens Fase modo TE para o modelo_1.

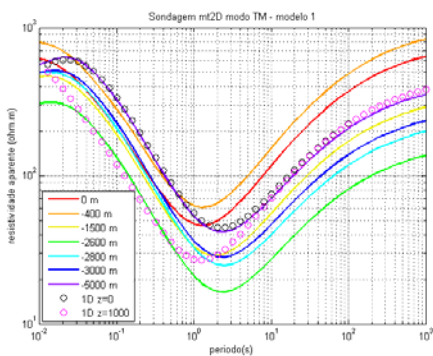


Figura 25: Sondagens Resistividade Aparente modo TM para o modelo_1.

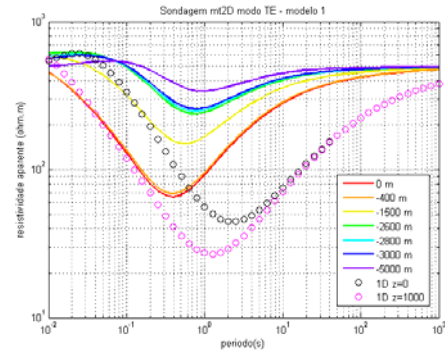


Figura 27: Sondagens Resistividade Aparente modo TE para o modelo_2.

Nas sondagens do modeo_0 modo TE (Figuras 19 e 20), percebe-se pouca influência do vale nos pontos de sondagem, sendo que a 5000 m do centro do vale praticamente não há influência. Na seção de “Testes da malha não estruturada” (Figuras 15 e 16) verifica-se que a influência é maior no início e no final da rampa do vale. No centro do vale e longe do vale o efeito d topografia é menor. Para o modo TM esta influência é mais evidente ainda, como se percebe nas Figuras 17 e 18, juntamente com as Figuras 21 e 22. Nas sondagens do Modelo_1 modo TE, percebe-se que a influência do vale nos pontos de sondagem é pequena, pois nas sondagens feitas dentro do vale (0 m e -400 m) a Resistividade Aparente é praticamente a mesma de um modelo MT 1-D com a primeira camada igual a 1000 m de espessura. Nas sondagens feitas fora do vale (-2600 m, -2800 m, -3000 m e -5000 m) a Resistividade Aparente é praticamente a mesma de um modelo MT 1-D com a primeira camada igual a 2000 m de espessura, com pequenas variações para baixos períodos (0.01 s). Somente na rampa dentro do vale (-1500 m) é que se percebe uma influência maior do vale, já que esta sondagem ficou entre a do modelo MT 1-D com a primeira camada igual a 2000 m e a do modelo MT 1-D com a primeira camada igual a 1000 m, a não ser para baixos períodos (0.01 s). Nas sondagens pelo modo TM a influencia do vale é maior que no modo TE, e os gráficos mostram coerência.

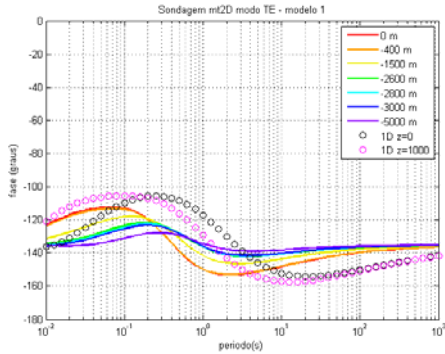


Figura 28: Sondagens Fase modo TE para o modelo_2.

Nas sondagens do Modelo_2 modo TE, percebe-se na Figura 27 que há um aumento no valor da resistividade aparente para períodos maiores que 0.1 s, o que é esperado já que no modelo_2 a camada de 10 Ω .m foi substituída por um corpo correspondente, porém com apenas 2000 m de largura. e conforme a sondagem vai se afastando do vale, o seu valor tende a estabilizar em torno de 500 Ω .m, que é a resistividade do meio encaixante. Na Figura 28 também se percebe que a fase tende a se estabilizar em -135 graus à medida que a sondagem se afasta do centro do vale.

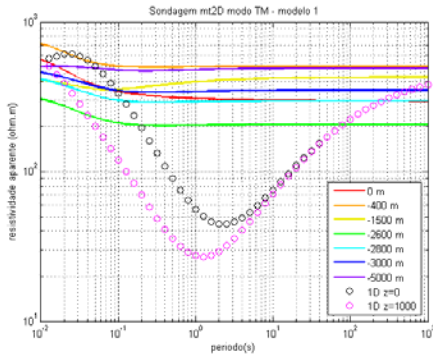


Figura 29: Sondagens Resistividade Aparente modo TM para o modelo_2.

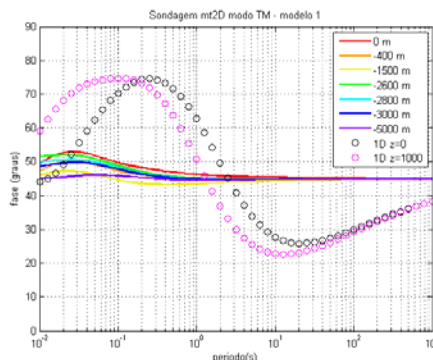


Figura 30: Sondagens Fase modo TM para o modelo_2.

Nas sondagens do Modelo_2 modo TM, percebe-se na Figura 29 que as sondagens não acompanham as do MT 1-D, ao contrário do que ocorreu com o modelo_1, o que parece coerente já que a camada de 10 Ω .m

desapareceu e foi substituída por um corpo de apenas 2000 m de largura, o que leva a um aumento da resistividade aparente. Neste caso percebe-se que a resistividade aparente do modelo_0 se assemelha à do modelo_2, sendo que a do modelo_2 fica menor em função da inclusão de um corpo com resistividade menor que a do meio encaixante. A Figura 30 mostra que a Fase também se estabilizou.

Para finalizar, vamos mostrar os resultados de uma comparação do tempo computacional requerido por um processador Celeron 1.6GHz e um Xeon 3.4GHz. O primeiro processador levou 3.58 horas e o segundo levou 1.64 horas para fazer o mesmo trabalho. Neste exemplo foram usados 61 períodos. Pelo tempo de processamento justifica-se o uso de um cluster para fazer este tipo de trabalho. Infelizmente o programa MT 2-D para processamento paralelo ainda está em fase de preparação, e a comparação do tempo de processamento não pôde ser acrescentada aqui. Mas usando-se 61 processadores trabalhando em paralelo, o tempo de processamento seria entre 1.5 e 2 minutos.

Conclusões

Este trabalho tem três aspectos principais: a avaliação do gerador de malhas não estruturadas de EF, a comparação de sondagens em modelos com topografia, e uma avaliação do tempo de processamento para rodar estes modelos. Na seção de “Testes da malha não estruturada”, vimos que a mesma funciona satisfatoriamente. Na seção de resultados fizemos testes com três modelos. No modelo_0 modo TE verifica-se que praticamente não há influência da topografia nos pontos de sondagem. Já no modo TM esta influência é maior. No modelo_1 modo TE os resultados mostram que na parte inferior e fora do vale, o efeito do mesmo é pequeno, mas na rampa de declive dentro do vale verifica-se certo efeito. No modo TM a influência do vale é maior, assim como para o modelo_0. Para o modelo_2 modo TE, a resistividade aparente diminuiu em relação ao modelo_1, o que é coerente já que uma camada de 10 Ω .m é substituída por um corpo de 2000 m de largura. Numa comparação da resistividade aparente no modo TM entre o modelo_0 e o modelo_2 verifica-se uma semelhança, porém no modelo_2 a resistividade aparente fica menor em função da inclusão de um corpo de 10 Ω .m num meio encaixante de 500 Ω .m. Finalmente, vale ressaltar que este tipo de modelagem consome muito tempo de processamento. Portanto, o ideal é usar o processamento paralelo ao invés de serial.

Agradecimentos

Este trabalho teve o suporte do Programa de Recursos Humanos da ANP – PRH - 06, através da manutenção do PROEM (Laboratório de Processamento Eletromagnético) e na concessão de bolsas, do primeiro autor (R.E.C.S.), bolsista de doutorado, e do segundo autor (L.R.) bolsa de Pesquisador Visitante. Os autores agradecem também ao Curso de Pós-Graduação em Geofísica – UFPA.

Referências Bibliográficas

- Balde, E., 2000. Refinamento adaptativo de malhas 2D e 3D para solução numérica de problemas de propagação eletromagnética. Tese de Doutorado – UNICAMP.
- Cuthill, E. and McKee, J., 1969. Reducing the bandwidth of sparse symmetric matrices In Proc. 24th Nat. Conf. [ACM](#), pages 157-172.
- Filho, M. R., 2002. Geração automática e adaptativa de malhas para elementos finitos 2D com aplicações em eletromagnetismo. Tese de Doutorado – UFPA/CT/PPGEE.
- MATLAB, 2008. The language of technical computing, Math Works Inc. (www.mathworks.com, acesso: maio 2008)
- Rijo, L., 2001-2008. " Teoria dos Métodos Eletromagnético I, II e III". UFPA, Departamento de Geofísica. (www.rijo.pro.br, acesso: maio 2008)
- Silva, R. E. C & Rijo, L., 2008. Validação do algoritmo de construção de malhas irregulares para modelagem EM. III Simpósio Brasileiro de Geofísica: Belém - PA.
- Volakis, J. L., Chatterjee, A. & Kempel, L. C., 1998. Finite Element Method for Electromagnetics. IEEE Press: New York.
- Wannamaker, P. E., Stodt, J. A. & Rijo, L., 1986. Two-dimensional topographic responses in magnetotellurics modeled using finite elements. Geophysics, 51: 2131-2144.