



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
FACULDADE DE GEOFÍSICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

MODELAGEM ATRAVÉS DO SOFTWARE COMSOL MULTIPHYSICS®
DE DADOS DO MÉTODO ELETROMAGNÉTICO MULTI-FREQUÊNCIA

REINALDO SANTOS BARROS JUNIOR

BELÉM

2015

REINALDO SANTOS BARROS JUNIOR

MODELAGEM ATRAVÉS DO SOFTWARE COMSOL MULTIPHYSICS®
DE DADOS DO MÉTODO ELETROMAGNÉTICO MULTI-FREQUÊNCIA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Colegiado do Curso de Bacharelado em Geofísica da Universidade Federal do Pará, como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Geofísica.

Orientador: Prof. Dr. Cícero Roberto Teixeira
Regis. Universidade Federal do Pará

Coorientador: Prof. Dr. Edelson da Cruz Luz.
Centro de Instrução Almirante Brás de Aguiar

BELÉM-PA
2015

Dados Internacionais de Catalogação de Publicação (CIP)
Biblioteca do Instituto de Geociências/SIBI/UFPA

Barros Junior, Reinaldo Santos, 1990-

Modelagem através do software Comsol multiphysics® de dados
do método eletromagnético multi-frequência / Reinaldo Santos
Barros Junior. – 2015.
35 f : il.; 30 cm

Inclui bibliografias

Orientador: Cícero Roberto Teixeira Régis

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade
Federal do Pará, Instituto de Geociências, Faculdade de Geofísica,
Belém, 2015.

1. Eletromagnetismo – simulação por computador. 2. Comsol -
Multiphysics. 3. Eletromagnetismo – Modelos matemáticos. I.
Título.

CDD 22 ed. 537.60285

REINALDO SANTOS BARROS JÚNIOR

MODELAGEM ATRAVÉS DO SOFTWARE COMSOL MULTIPHYSICS DE DADOS
DO MÉTODO ELETROMAGNÉTICO MULTI-FREQUÊNCIA

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Faculdade de Geofísica do
Instituto de Geociências da Universidade
Federal do Pará, como requisito parcial à
obtenção de grau de Bacharel em
Geofísica.

Data da defesa: 04 de dezembro de 2015.

Conceito: REG

Banca Examinadora:

Cícero Régis

Prof. Cícero Roberto Teixeira Régis – Orientador
Doutor em Geofísica
Universidade Federal do Federal do Pará

Victor César Tocantins de Souza

Prof. Victor César Tocantins de Souza - Membro
Doutor em Geofísica
Universidade Federal do Pará

Edelson da Cruz Luz

Prof. Edelson da Cruz Luz - Membro
Doutor em Geofísica
Universidade Federal do Pará

Agradecimentos

A todos os meus familiares que sempre me apoiaram especialmente minha querida mãe Angela Maria e meu pai Reinaldo Santos.

A minha noiva Ana Paula Mendes Carrera pelo seu amor, dedicação e por se prontificar a me ajudar em todas as etapas desses nossos dez anos juntos. Amo você!

Ao meu orientador Cícero Roberto Teixeira Regis, pela sua atenção e compreensão pelo grande tempo que levei para concluir este trabalho.

Ao meu coorientador Edelson Cruz da Luz por sua grande paciência e por ter reservado algumas horas do seu tempo para me orientar. Seu direcionamento foi de vital importância para a conclusão deste trabalho.

A turma da graduação geofísica 2011 pelo seu espírito de companheirismo, em ajudar aquele que esta em dificuldade com alguma matéria.

E a todos que me ajudaram direta ou indiretamente para a minha formação e conclusão deste curso.

O sucesso é ir de fracasso em fracasso sem perder o entusiasmo.

Winston Churchill.

RESUMO

Os métodos eletromagnéticos tem grande utilidade para diversos setores da geofísica, pois encontram propriedades elétricas do meio, localizando alvos, delimitando meios ou auxiliando outros métodos eliminando possíveis casos de ambiguidade. Para muitos aspectos das aplicações de métodos eletromagnéticos, o trabalho de modelagem numérica dos dados é de fundamental importância. Neste trabalho investigamos a aplicação do software Comsol Multiphysics para a modelagem eletromagnética na Geofísica. Como exemplo, a aplicação é na criação de modelos 3D do Método Eletromagnético a Multifrequência. Os resultados indicam que o software pode ser usado como uma ferramenta de fácil implementação para a modelagem eletromagnética.

Palavras-chaves: Comsol. Modelagem 3D. Método eletromagnético.

ABSTRACT

The electromagnetic methods have great utility for diverse sectors of the geophysics, because they find electric properties of environment, locating targets, delimiting environment or assisting other methods eliminate possible cases of ambiguity. For many aspects of electromagnetic methods applications, the work of numerical modeling of the data is of fundamental importance. In this work investigate the application of software Comsol Multiphysics for electromagnetic modeling in Geophysics. As an example, the application is in creating of 3D models of Electromagnetic multifrequency method. The Results indicate the software can be used as a easy tool of implemetation of electromagnetic modeling.

Keywords: Comsol. Modeling 3D. Electromagnetic method

LISTA DE FIGURAS

Figura 1-Comsol versão 4.4	13
Figura 2- Comsol escolhendo a dimensão do modelo	13
Figura 3- Escolhendo a física do modelo	13
Figura 4 - Escolhendo o estudo do modelo	14
Figura 5- Geometria base.....	14
Figura 6- biblioteca de materiais	15
Figura 7- guia da física.....	16
Figura 8 – dipolo magnético vertical.....	16
Figura 9 – Modelo homogêneo.....	21
Figura 10 – Seções da parte real e imaginária do espaço homogêneo comparando o uso do comsol com a programação feita em Fortran.	21
Figura 11 – Modelo com um corpo condutivo.....	22
Figura 12 - Seções da parte real e imaginária do modelo com um corpo de 50 metros comparando o uso do comsol com a programação feita em Fortran.	23
Figura 13- Seções da parte real e imaginária do modelo com um corpo de 250 metros comparando o uso do comsol com a programação feita em Fortran.	24
Figura 14- Seções da parte real e imaginária do modelo com um corpo de 500 metros comparando o uso do comsol com a programação feita em Fortran.	25
Figura 15 – Seções da parte real e imaginária do modelo com um corpo de 1000 metros comparando o uso do comsol com a programação feita em Fortran.	26
Figura 16 – Seções da parte real e imaginária do modelo com um corpo de 2000 metros comparando o uso do comsol com a programação feita em Fortran.	27
Figura 17 – Modelo com dois corpos condutivos	28

Figura 18 – Seções da parte real e imaginária do modelo com dois corpos e 1000 metros entre seus centros horizontais comparando o uso do comsol com a programação feita em Fortran.....	29
Figura 19 – Seções da parte real e imaginária do modelo com dois corpos e 500 metros entre seus centros horizontais comparando o uso do comsol com a programação feita em Fortran.....	30
Figura 20 – Seções da parte real e imaginária do modelo com dois corpos e 250 metros entre seus centros horizontais comparando o uso do comsol com a programação feita em Fortran.....	31

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	10
2	METODOLOGIA	13
2.1	Skin depth.....	18
2.2	Elementos Finitos	18
2.3	Solver MUMPS	19
2.4	Solver FGRMES	19
3	RESULTADOS	20
3.1	Modelo do espaço homogêneo.....	21
3.2	Modelos com um corpo condutivo	22
3.3	Modelos com dois corpos condutivos	28
4	CONCLUSÃO	32

1 INTRODUÇÃO

Os métodos eletromagnéticos se mostraram úteis em diversos setores como prospecção mineral, de água e de hidrocarbonetos, além disso, podem também ser usados na geofísica ambiental como delimitação de áreas contaminadas.

O uso de bobinas como fontes do campo eletromagnético é comum a vários métodos diferentes. Existem métodos que medem a inclinação do campo resultante, métodos que medem as componentes do campo e métodos que medem diretamente a condutividade ou resistividade elétrica (ELIS, 2000).

Nos métodos eletromagnéticos, a investigação da subsuperfície não é necessário contato galvânico com o terreno, pois tem como base o fenômeno da indução. Uma corrente de baixa frequência, que pode circular numa bobina, começa o processo de excitação da subsuperfície através da indução. Condutores elétricos por ventura presentes no subsolo provocam alterações no campo eletromagnético, detectáveis por meio de outra bobina, que fornecem informações sobre os condutores que as provocaram (LUIZ; SILVA 1995). Dentre os métodos eletromagnéticos mais utilizados na geofísica podemos citar a magnetotelúrico, o GPR e o Slimgram.

O método Eletromagnético a Multi-Frequência (EMMF) consiste de um método geofísico que objetiva encontrar propriedades elétricas da subsuperfície, utilizando como fonte uma espira de corrente estendida sobre a superfície investigada. Aplicado em uma larga faixa de frequências, o método introduz uma corrente indutiva no meio e, a partir da resposta do campo magnético horizontal radial coletado nos receptores, determina o parâmetro de caracterização do efeito de polarização elétrica induzida (IP) provocado no meio, e uma forma de resistividade aparente (DIAS, 1968; MACHADO, 2009; SATO, 1979).

O método usa a variação de dois parâmetros, o número de indução e o parâmetro de polarização para construir uma tabela de valores das partes real e imaginária de um campo formado pela componente magnética radial normalizada pela resposta magnética vertical do espaço livre, através de um dipolo magnético vertical na superfície de um semiespaço homogêneo, esses parâmetros são

associados à posição transmissor-receptor, à frequência de investigação, ao módulo e à fase da condutividade do meio, que nesse caso é uma função complexa que caracteriza o efeito de IP provocado pela excitação da fonte e a heterogeneidade do meio.

Silva (2012) ao analisar o trabalho de Sato (1979) constatou que o mesmo estimou a posição de um ponto da subsuperfície que mais contribui para o campo normalizado medido em uma determinada posição na superfície. Ele principiou a noção de profundidade de penetração para a fonte dipolar, skin-depth dipolar vertical, com base no comportamento da razão posição do receptor/skin-depth em função do número de indução, admitiu uma parte do skin-depth dipolar para estabelecer aproximadamente o ponto associado à resistividade determinada pela tabela criada por Dias (1968). Este ponto é considerado como sendo o centro da zona do semiespaço homogêneo que mais influencia na medida, e sua determinação analítica foi feita por Machado (2009).

Para modelar dados do método EMMF são necessárias ferramentas computacionais que calculem o campo eletromagnético e produzam uma imagem como saída. Para isso é necessário resolver as equações diferenciais parciais construídas a partir das leis do eletromagnetismo. O Comsol Multiphysics é um programa especializado em solucionar equações diferenciais parciais em domínios complicados usando o método elementos finitos, criando modelos e simulando vários sistemas físicos. Ele tem interface intuitiva, porém ainda se faz necessário o conhecimento da física estudada, pois dentro do programa todas as informações necessárias são inseridas pelo usuário.

Neste trabalho, utilizamos o software para calcular o campo magnético dentro de uma região 3D a partir de uma fonte pontual (dipolo magnético), condições que simulam uma aquisição geofísica. Comparamos o resultado com os modelos apresentados por Silva (2012) a fim de exemplificar uma utilidade do programa Comsol para a Geofísica.

No segundo capítulo deste trabalho faremos uma descrição resumida do uso do software para o cálculo aproximado dos campos da bobina, com detalhamento sobre os métodos numéricos usados: geração de malhas, condições de fronteira, solvers etc.

No terceiro capítulo deste trabalho serão apresentados alguns modelos 3D, em comparação com os resultados 2D realizados no trabalho de Silva (2012),

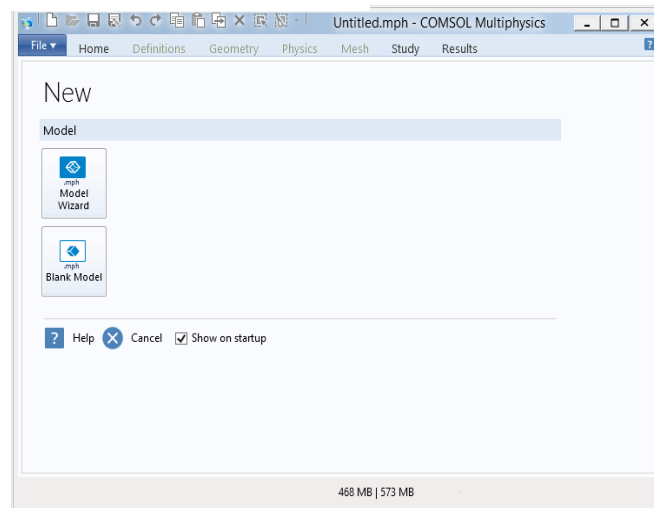
exibindo as respostas e as informações sobre o processamento envolvido em cada modelo gerado, incluindo o tempo de processamento e o uso de memória em cada um deles.

No quarto capítulo serão explanados o resumo dos resultados apresentados e as observações sobre as vantagens e dificuldades no uso do COMSOL fazendo recomendações sobre o uso do COMSOL para a modelagem de outras fontes eletromagnéticas.

2 METODOLOGIA

Para o desenvolvimento dos dados utilizamos o software COMSOL MULTIPHYSICS® versão 4.4 (figura 1), na criação da geometria, implementação das condições físicas, criação da malha e resolução do sistema de equações gerado por cada modelo.

Figura 1-Comsol versão 4.4

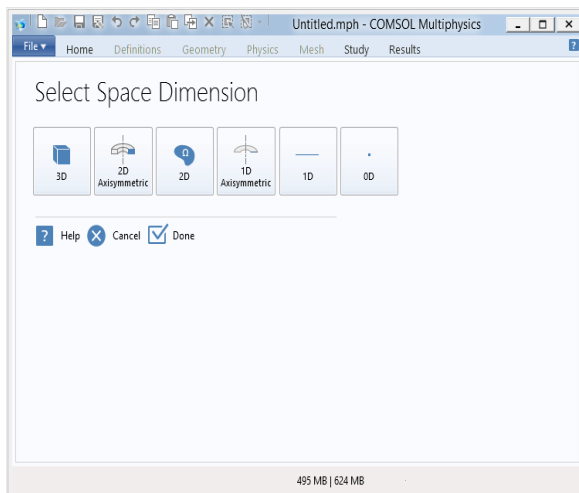


Fonte: Elaborada pelo autor

Para gerar o modelo seguimos os seguintes passos:

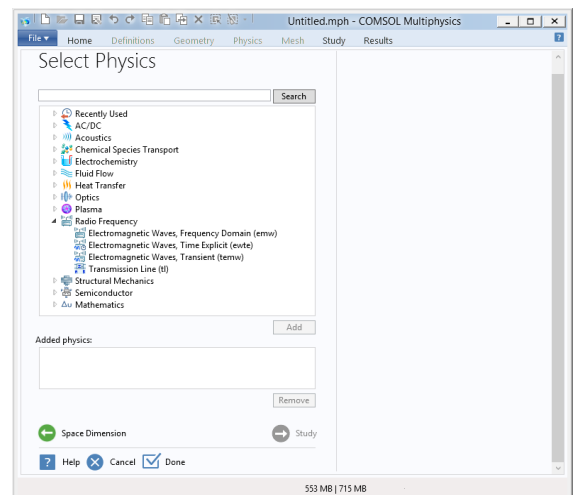
- 1- inicialmente é escolhida a dimensão dentro do model wizard no caso 3D (figura 2).
- 2- identificar a física utilizada dentro do módulo RF (*radio frequency*) e a seção das ondas eletromagnéticas no domínio da frequência utilizada (figura 3).
- 3- escolher o estudo, aqui usamos o estudo no domínio da frequência (figura 4).

Figura 2- Comsol escolhendo a dimensão do modelo



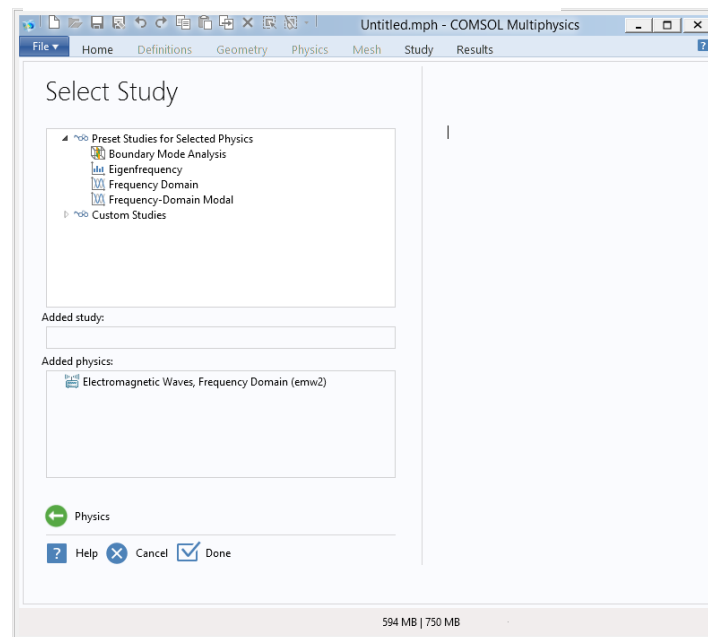
Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 3- Escolhendo a física do modelo



Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 4 - Escolhendo o estudo do modelo

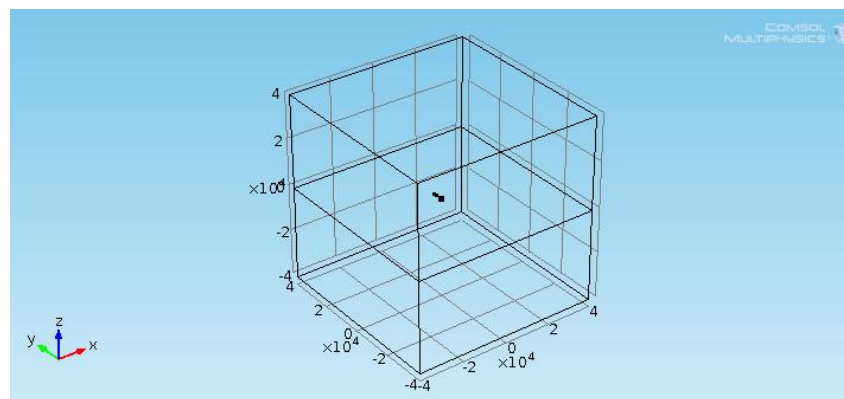


Fonte: Elaborada pelo autor

4- Após gerar o modelo temos que defini-lo, construindo uma geometria, adicionando propriedades, definindo fisicamente e gerando uma malha.

A geometria base utilizada é de dois blocos, um para o semiespaço representando o ar, e um para o semiespaço representando a subsuperfície geofísica, um ponto para posicionar o dipolo magnético, e um polígono aberto em forma de reta para sinalizar a linha de medida (figura 5). Para cada modelo aqui apresentado foram adicionados mais estruturas para sua confecção.

Figura 5- Geometria base

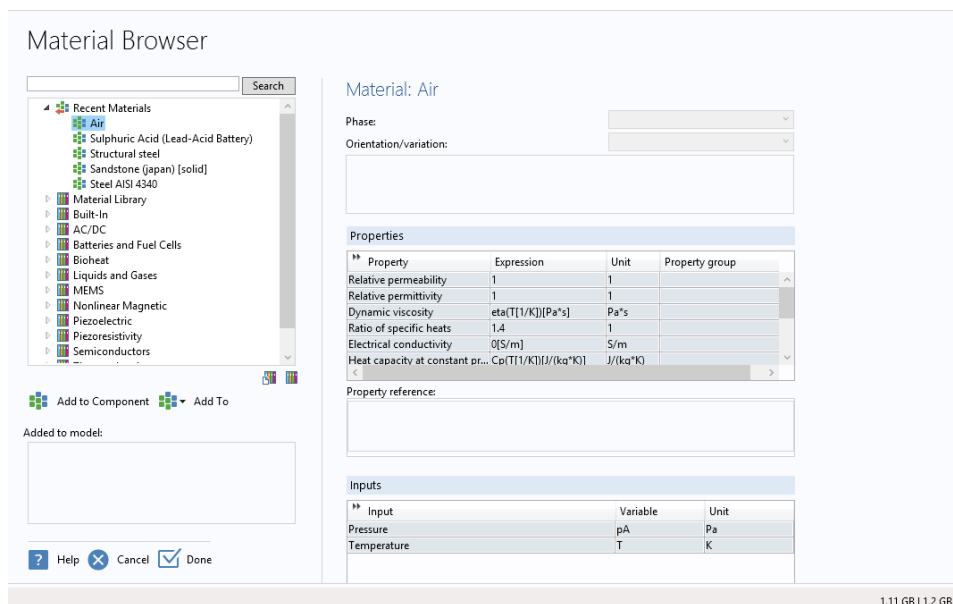


Fonte: Elaborada pelo autor

5- Definir as propriedades dos materiais relevantes aos modelos utilizados neste trabalho sendo eles a condutividade elétrica, a permeabilidade relativa e a permissividade relativa, pois são as propriedades exigidas pelo Comsol dentro do módulo RF.

O Comsol tem uma biblioteca de materiais (figura 6) que podem ser usadas no modelo ou criadas pelo usuário. Para todos os modelos neste trabalho a permissividade e permeabilidade relativa dos materiais envolvidos é igual a 1 (um).

Figura 6- biblioteca de materiais

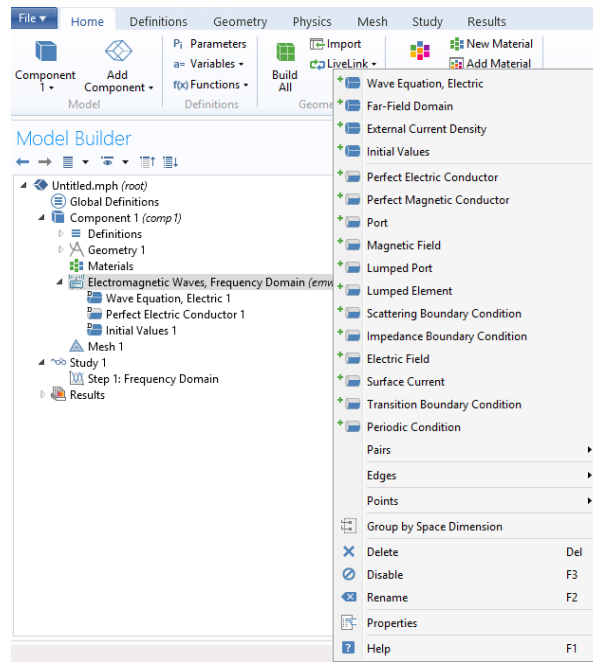


Fonte: Elaborada pelo autor

6- Modificar algumas condições da física envolvida, que no caso é ondas eletromagnéticas, dentro de sua guia correspondente (figura 7), colocando valores iniciais, adicionando fontes, ou alterando condições de borda que por padrão é um condutor perfeito.

No tipo de problema tratado neste trabalho é implementada a condição de fronteira de Dirichlet homogênea na borda das malhas. Para isto, dentro do Comsol foi utilizada a opção de condição de fronteira do tipo “*scattering*”.

Figura 7- guia da física



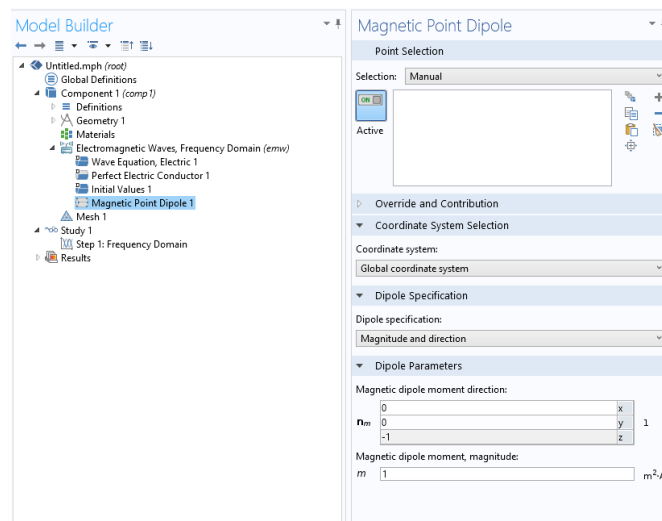
Fonte: Elaborada pelo autor

Sendo aqui introduzido o dipolo magnético vertical como fonte ao direcionar o momento do dipolo magnético na direção $-z$ (figura-8). Não se esquecendo de posiciona-lo selecionando o ponto designado para a fonte. O momento magnético m_z é:

$$m_z = I\pi a^2$$

Onde I é a corrente na bobina e a o raio da bobina.

Figura 8 – dipolo magnético vertical



Fonte: Elaborada pelo autor

7- A próxima etapa é a criação da malha na qual o Comsol ira desenvolver o calculo do campo.

Aqui podemos definir que tipo de malha queremos, e todas as suas propriedades como tamanho mínimo e máximo de elementos, taxa de crescimento entre os elementos, número de elementos em regiões finas (uma dica é sempre colocar no mínimo dois elementos para garantir confiabilidade ao dado na região onde se quer refinar).

Este estágio é crucial para obtermos um resultado satisfatório, pois sem um bom refinamento o avanço da simulação pode ficar comprometido já que pode acarretar uma serie de erros, impedindo o surgimento de uma resposta, ou apontando um resultado incorreto. Uma boa malha deve priorizar o refinamento em torno da fonte, do alvo do estudo, e da região onde obteremos os resultados.

Para refinar regiões específicas foi criada outra malha do tipo *free tetrahedral* e selecionada a opção *remaining*, depois adicionada uma configuração dentro desta nova malha chamada “*Size*”, onde podemos aumentar ou diminuir o tamanho dos elementos nesta região influenciando as regiões próximas, controlar a taxa de crescimento dos elementos, o fator de curvatura, ou impor a resolução de regiões finas. A região que desejamos refinar não precisa ser necessariamente um domínio ele pode ser, por exemplo, um ponto, um vértice, ou uma borda onde refinamos as regiões próximas a eles.

8- Com a malha concluída o modelo esta pronto para ser compilado e entramos na etapa do estudo, o tipo do estudo feito neste TCC é o domínio da frequência.

Aqui podemos escolher que tipo de solver que ira ser implementado, se ele será direto ou iterativo. O solver padrão é o BiCGStab (*biconjugate gradient stabilized*) que é iterativo e o solver escolhido foi o FGMRES (*flexible generalized minimum residual*) que também é iterativo, por apresentar uma convergência mais rápida nos modelos deste TCC. Também podemos selecionar o número máximo de interações, o erro relativo aceitável para cada implementação e como será guardado a informação.

Depois de compilado dentro dos resultados existe uma guia chamada “data set”. Dentro dela criamos uma opção chamada de “Cut line 3d”. É através dela que podemos obter o conjunto de dados na região da linha de medida posicionando dentro da mesma.

Para exportar os conjuntos de dados desejados para o matlab, dentro da guia exportar, basta escolher a opção data, e dentro da opção data escolher o data set “cut line 3d”, as frequências utilizadas (no caso todas), escrever a expressão desejada, e o formato de saída assim como onde será exportado. Assim podemos exportar um arquivo de texto que pode ser lido pelo matlab, e gerar nele as imagens.

2.1 Skin depth

Como o modelo possui fonte de campo magnético devemos observar um fenômeno onde é necessário certo cuidado. O skin depth trata do quão longe um campo pode alcançar de maneira significativa, e caso dentro de um modelo a distância entre a borda mais próxima e a fonte for inferior ao valor de algumas vezes o skin depth, para maior segurança cinco, isto poderá comprometer o resultado, a condição de fronteira homogênea será imposta em uma distância na qual os campos ainda apresentam valores significativos, o que prejudicará a solução em todos os pontos da malha. Porém, foi usado apenas três vezes o skin depth por questões de custo computacional. A fórmula usada para calcular o *skin depth* é

$$sd = \frac{500}{\pi} \sqrt{\frac{10}{f \sigma}}$$

. Para definir os tamanhos da malha, usamos esta fórmula na frequência mais baixa e com a condutividade da primeira camada do modelo.

2.2 Elementos Finitos

Elementos finitos consiste em um método numérico que aproxima problemas de equações diferenciais parciais com condições de contorno conhecidas em um número finito de equações algébricas, discretizando o domínio do problema em um número de volumes (elementos), e calculando as soluções em um número finito de pontos (nós) nos vértices destes elementos.

No Comsol o método começa pelo desenvolvimento da malha, uma partição da geometria do problema em pequenos pedaços chamados elementos.

Uma vez que se tenha uma malha, podem-se introduzir aproximações para variáveis dependentes. A ideia é aproximar uma variável com uma função que você pode descrever com um número finito de parâmetros, os chamados graus de

liberdade (DOF). Inserindo esta aproximação na chamada formulação fraca da equação, sendo gerado um sistema de equações algébricas para os graus de liberdade.

A partir dessa discretização, o problema se transforma em um grande sistema linear a ser resolvido pelo computador.

2.3 Solver MUMPS

O solver de sistemas lineares direto MUMPS (MULTifrontal Massively Parallel sparse direct Solver) trabalha com sistemas lineares sob a forma de $Ax = b$ onde A é uma matriz genérica simétrica, assimétrica e/ou definida positivamente simetricamente. Ele utiliza diversos algoritmos de preordenamento para permutar colunas e dessa maneira minimizar o preenchimento (AMESTOY, 2000).

Tendo capacidades “out-of-core” (algoritmo usado para designar o processamento de dados muito grandes para a memória principal do computador de uma vez) pode armazenar os fatores LU no disco rígido minimizando o uso da memória interna. O custo em tempo da solução é maior, pois leva mais tempo ler e escreve do disco do que usar a memória interna. Neste trabalho ele irá auxiliar o solver interativo fatorando a matriz para o FGRME resolver o sistema.

2.4 Solver FGRMES

O método FGMRES (Flexible Generalized Minimal Residual method) é um solver interativo para sistemas não simétricos de equações lineares:

$$Ax = b$$

FGRMES foi desenvolvido para acelerar a convergência baseada no método GMRES (Generalized Minimal Residual method), essa melhoria na convergência é obtida resolvendo sistemas preconditionados, eventualmente determinando x através da generalização de GMRES e aplicando a solução em um sistema preconditionado equivalente (DEVRIES,2013):

$$(AP^{-1})(Px) = b$$

Onde P é o preconditionador, matriz construída para aumentar a condição numérica do problema sob a forma de AP^{-1} que possui autovalores mais próximos que A assim convergindo mais rápido.

3 RESULTADOS

As respostas das partes real e imaginária do campo magnético horizontal foram analisadas sobre vários modelos tridimensionais criados no comsol, e observados quão próximos esses resultados se aproximaram dos resultados mostrados por Silva (2012) que objetivou inferir sobre a sensibilidade dos dados do método EMMF às estruturas presentes nestes ambientes.

Para aproximar os modelos 3d para o 2d a fim de fazer as comparações presentes no trabalho, estendemos um eixo dos corpos presentes de uma ponta a outra do modelo assim este eixo finito será grande o suficiente para ser considerado infinito para a contribuição do campo.

O computador usado para executar os modelos foi um notebook Dell com processador Intel core i5-4200U e com 6 GB de memória RAM em um sistema operacional Windows 8.1. Foram usadas 41 frequências entre 0,1 Hz ate 1000 Hz igualmente espaçadas na escala logarítmica. Essa quantidade de frequências foi escolhida em vez de 120 frequências presente no trabalho de Silva (2012), pois reduz proporcionalmente o custo computacional reduzindo em 2/3 o tempo de execução.

As respostas serão exibidas por meio do campo radial H_r de maneira normalizada pelo campo H_z^o referente à resposta magnética vertical no plano de um DMV no vácuo (WARD; HOHMANN, 1987) sob a forma de $\frac{H_r}{H_z^o}$ em imagens geradas a partir dos dados do campo em seções de posições de medida versus frequência. A expressão usada para criar esses dados foi:

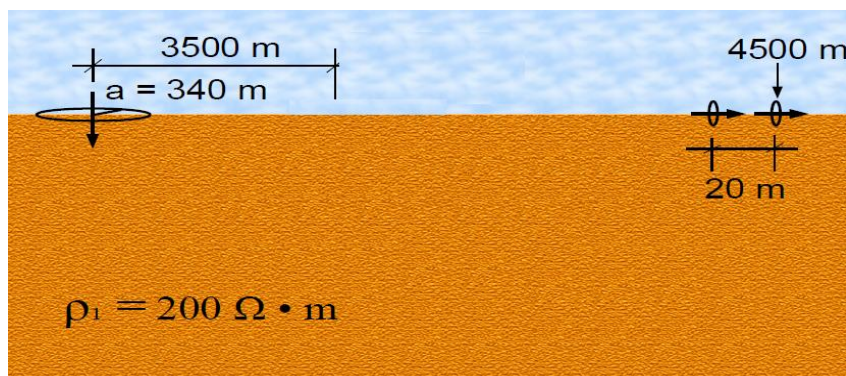
$$H_z^o = \frac{-m_z}{4\pi r^3}$$

$$\frac{H_r}{H_z^o} = -H_r \frac{4\pi r^3}{m_z}$$

3.1 Modelo do espaço homogêneo

O primeiro modelo gerado é referente ao semiespaço homogêneo, neste modelo foi empregada a geometria base com um bloco para o ar, um bloco para a subsuperfície, um ponto para o posicionamento da fonte e uma linha para simular a aquisição e para posterior refinamento da malha. O modelo homogêneo (figura 9) foi retirado da “investigação de largura de um corpo isolado condutivo” presente no trabalho de Silva (2012), porém sem o corpo.

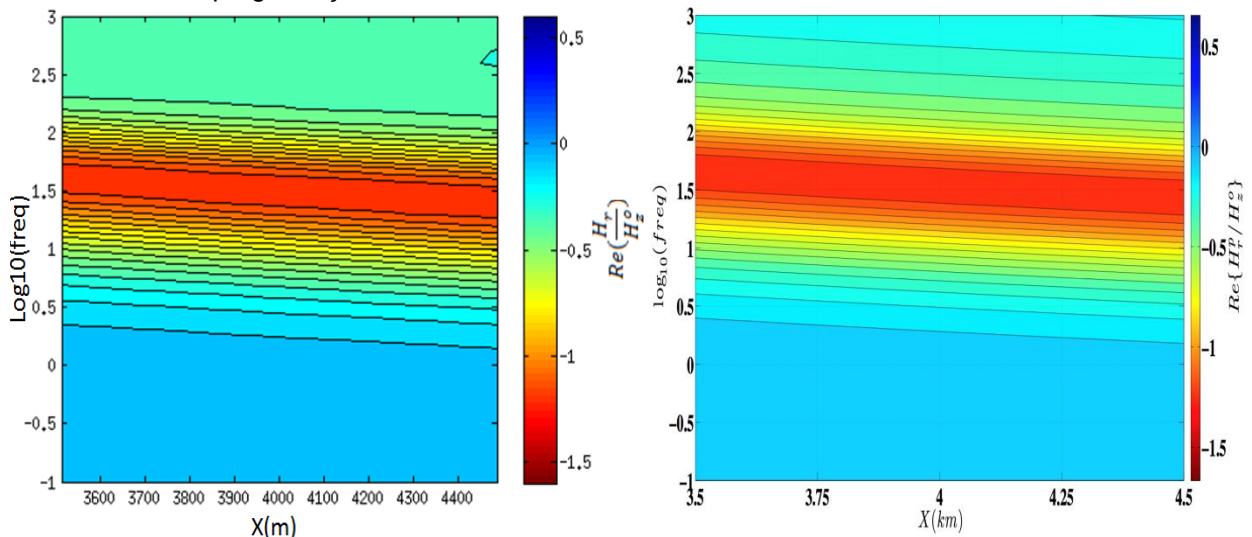
Figura 9 – Modelo homogêneo



Fonte: Silva (2012)

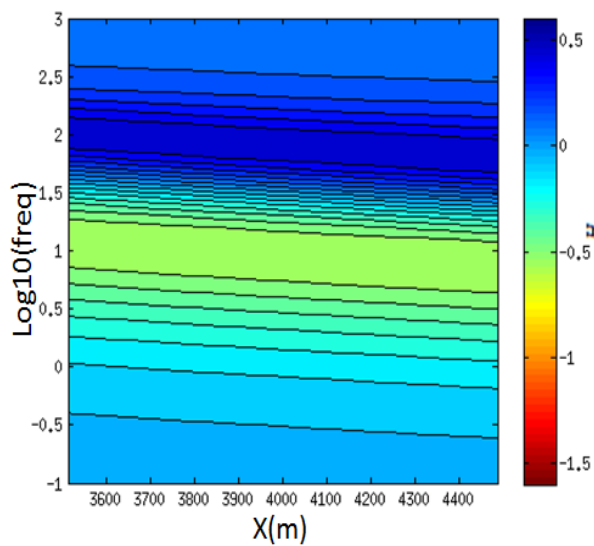
A distância entre a fonte e a borda mais próxima é de 40 quilômetros, a resistividade do semiespaço que representa a subsuperfície é de $200 \Omega \cdot m$. A região da linha que representa o levantamento é de 3500 até 4500 metros de distancia da fonte. E o espaçamento entre os pontos de medida é de 20 metros. As seções do modelo homogêneo estão mostradas na figura 10.

Figura 10 – Seções da parte real e imaginaria do espaço homogêneo comparando o uso do consol com a programação feita em Fortran.

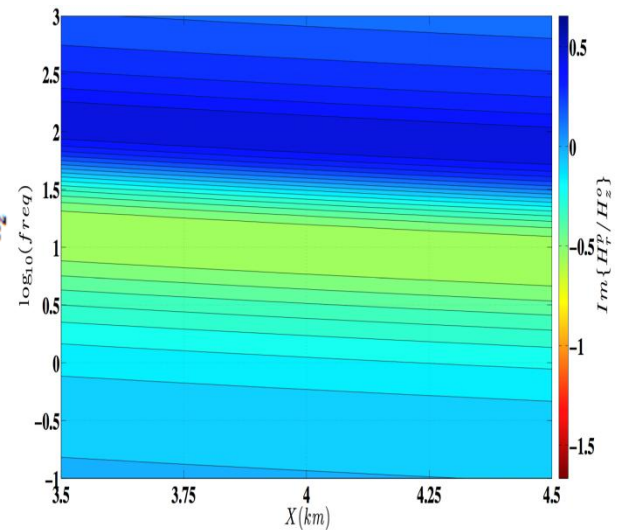


Fonte: Elaborada pelo autor

Fonte: Silva (2012)



Fonte: Elaborada pelo autor



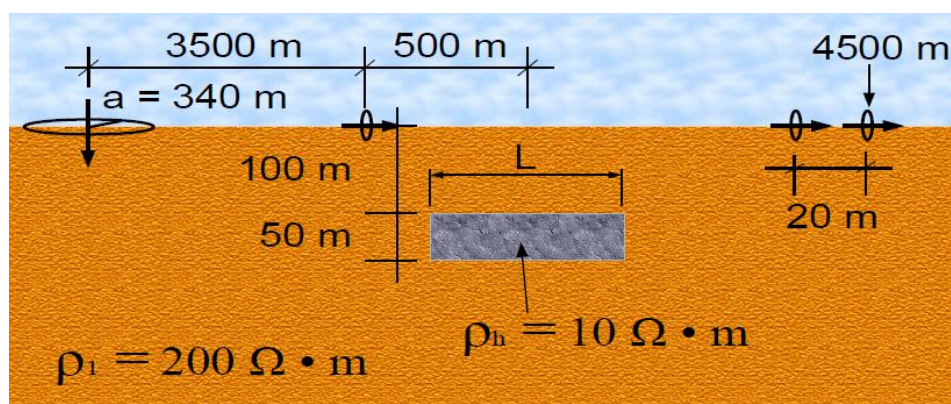
Fonte: Silva (2012)

O Modelo homogêneo levou 1303 s (21 minutos e 43 segundos) para ser executado. E usou memória física de 1.32 Gb e memória virtual de 1.44 Gb.

3.2 Modelos com um corpo condutivo

Nestes modelos foram inseridos corpos condutivos, recriando a simulação feita por Silva (2012) dentro do teste de variação da largura (figura 11). Foi adicionado dentro da geometria um bloco para o corpo, e uma configuração diferenciada dentro da malha chamada “size” para este bloco a fim de obter melhor refinamento.

Figura 11 – Modelo com um corpo condutivo

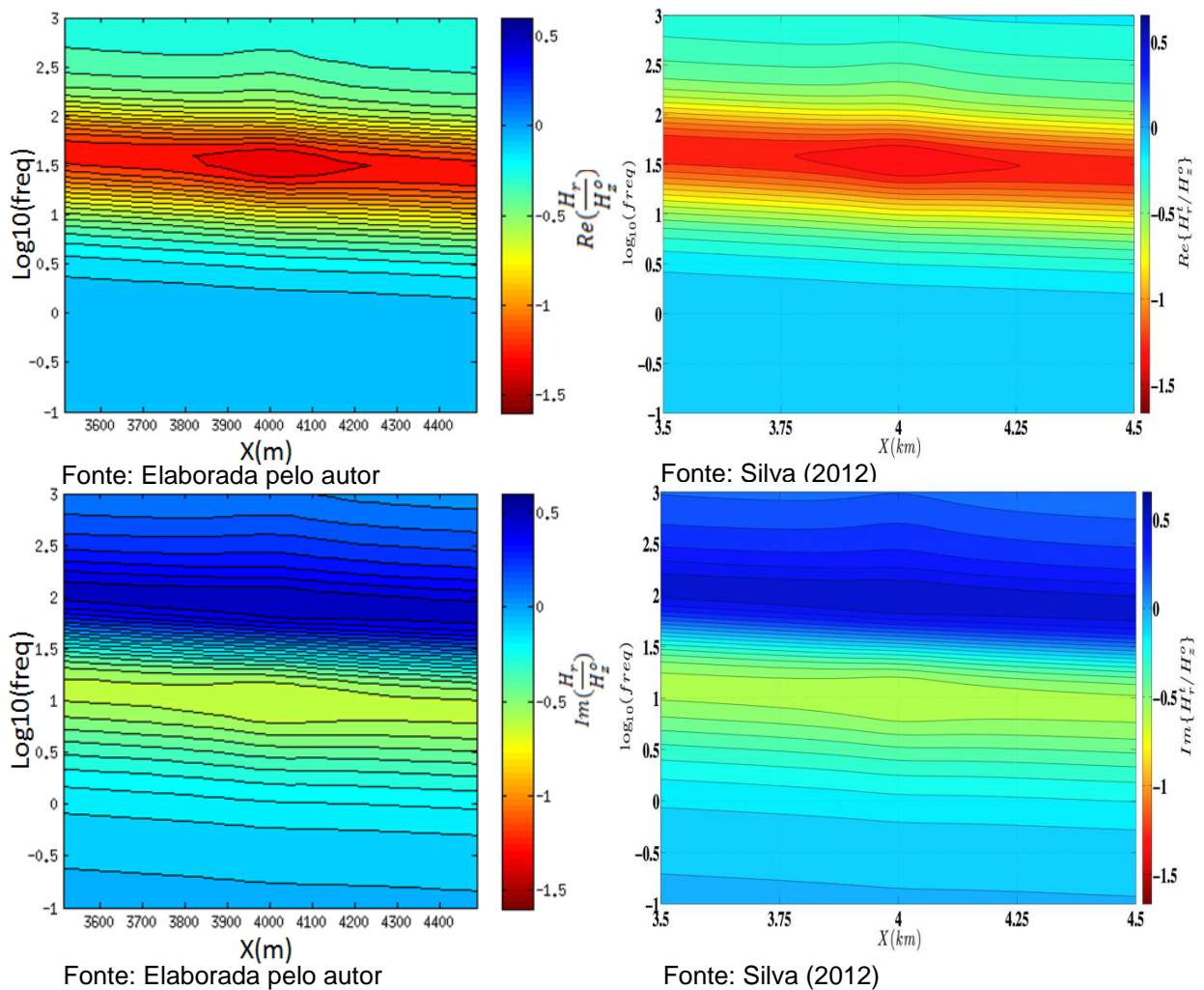


Fonte: Silva (2012)

O corpo condutivo tem resistividade de 10 Ω .m., estando dentro de um semi espaço de 200 Ω .m. com 4000 metros de distancia entre a posição de seu centro

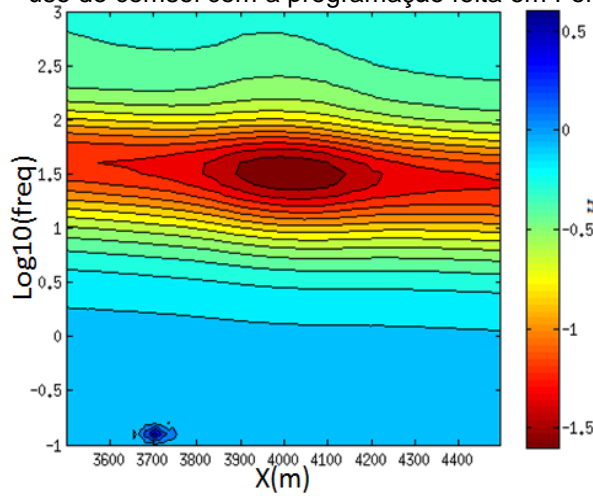
horizontal com a fonte, e está a uma profundidade de 100 metros da superfície, até a sua borda superior com 50 metros de espessura. Dos cinco modelos deste tópico a diferença entre eles consiste da largura L do corpo. Com 50, 250, 500, 1000 e 2000 metros de largura, e suas respectivas seções (figura 12), (figura 13), (figura 14), (figura 15), e (figura 16). A linha de aquisição também é de 3500 a 4500 metros de distancia da fonte.

Figura 12 - Seções da parte real e imaginária do modelo com um corpo de 50 metros comparando o uso do comsol com a programação feita em Fortran.

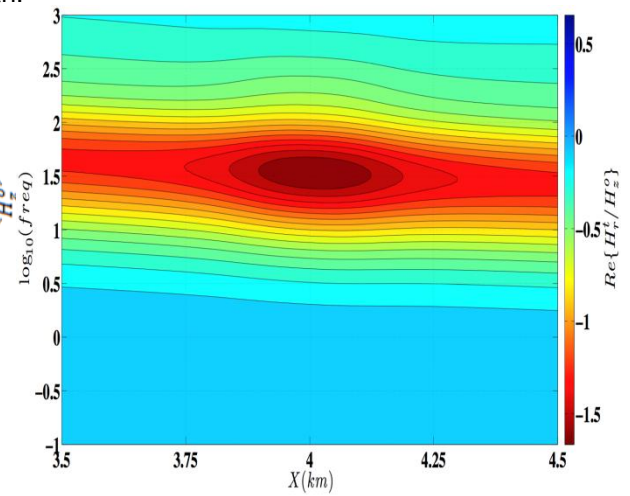


O modelo com corpo de 50 metros levou 5046 s (1 hora, 24 minutos e 6 segundos) para ser executado. E usou memória física de 2.57 Gb e memória virtual de 2.82 Gb.

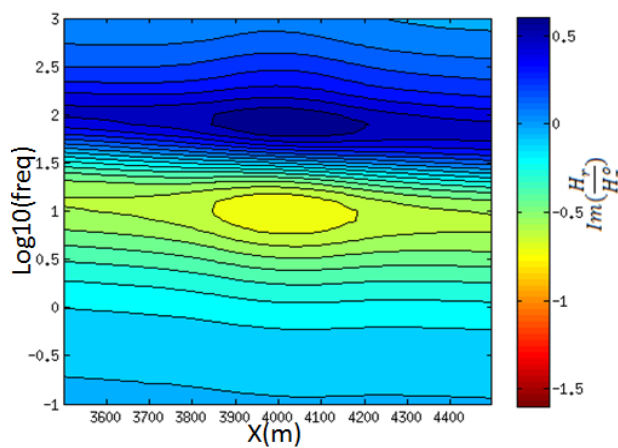
Figura 13- Seções da parte real e imaginária do modelo com um corpo de 250 metros comparando o uso do consol com a programação feita em Fortran.



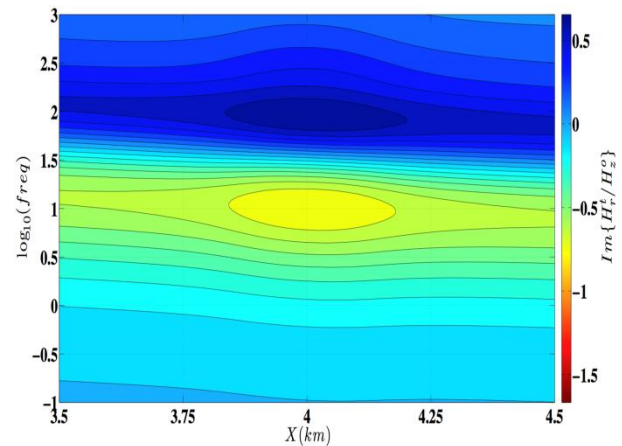
Fonte: Elaborada pelo autor



Fonte: Silva (2012)



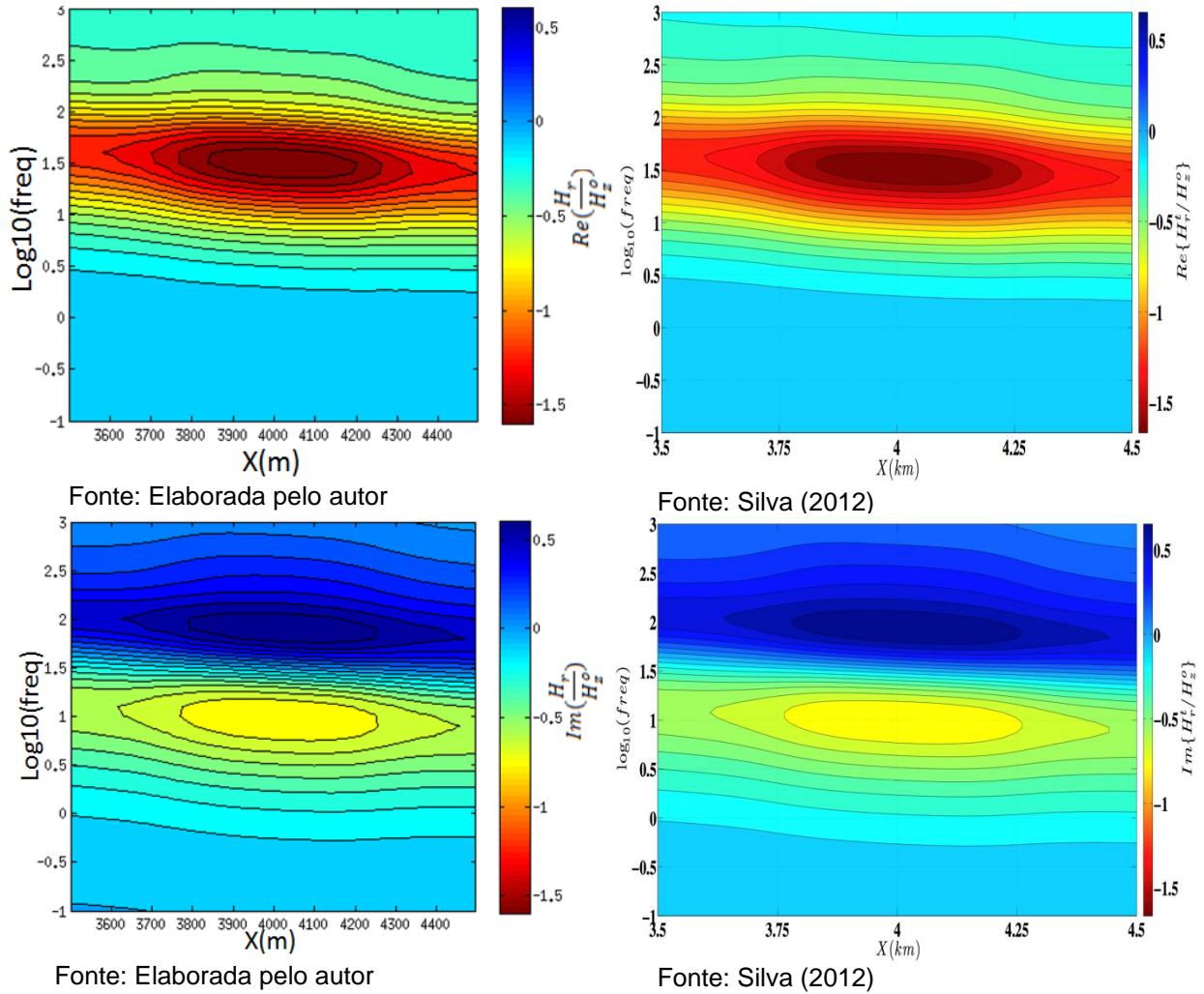
Fonte: Elaborada pelo autor



Fonte: Silva (2012)

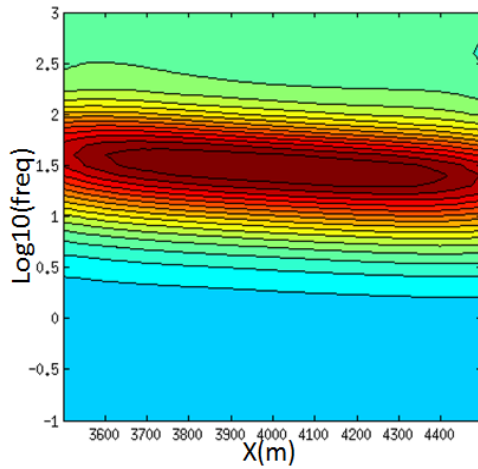
O modelo com corpo de 250 metros levou 3938 s (1 hora, 5 minutos e 38 segundos) para ser executado. Usou memória física de 2.3 Gb e memória virtual de 2.42 Gb. Também podemos observar duas anomalias. A primeira surge nas baixas frequências podendo ser eliminada com maior refino e maior número de frequências, e a segunda nas altas frequências necessitando de mais frequências nesta região diminuindo a distancia entre elas garantindo mais informações para a formação da imagem.

Figura 14- Seções da parte real e imaginária do modelo com um corpo de 500 metros comparando o uso do consol com a programação feita em Fortran.

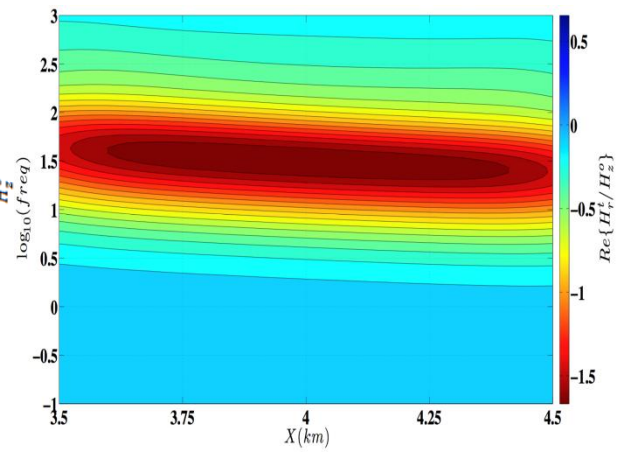


O modelo com corpo de 500 metros levou 4915 s (1 hora, 21 minutos e 55 segundos) para ser executado. E usou memória física de 2.39 Gb e memória virtual de 2.54 Gb.

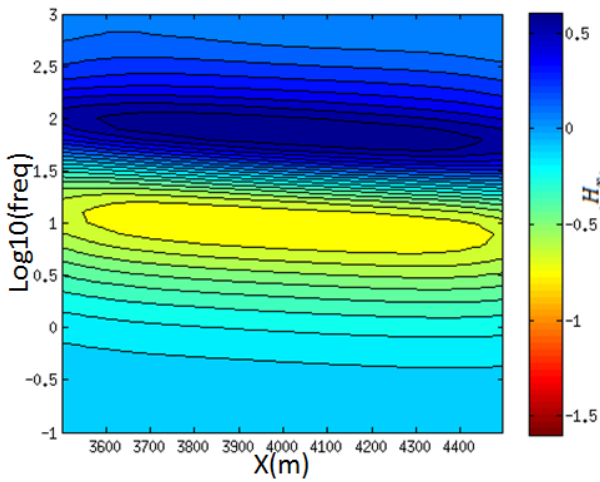
Figura 15 – Seções da parte real e imaginária do modelo com um corpo de 1000 metros comparando o uso do consol com a programação feita em Fortran.



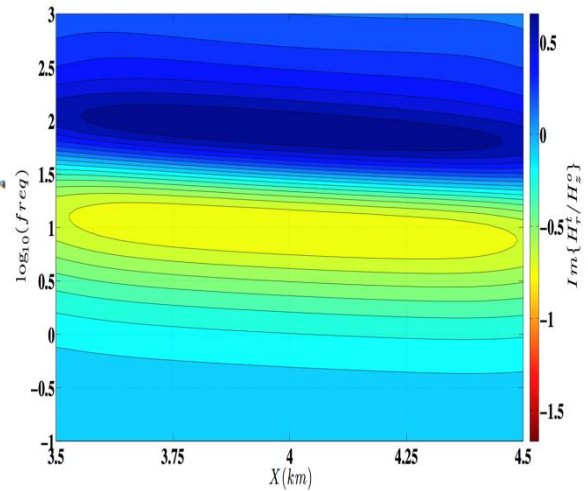
Fonte: Elaborada pelo autor



Fonte: Silva (2012)



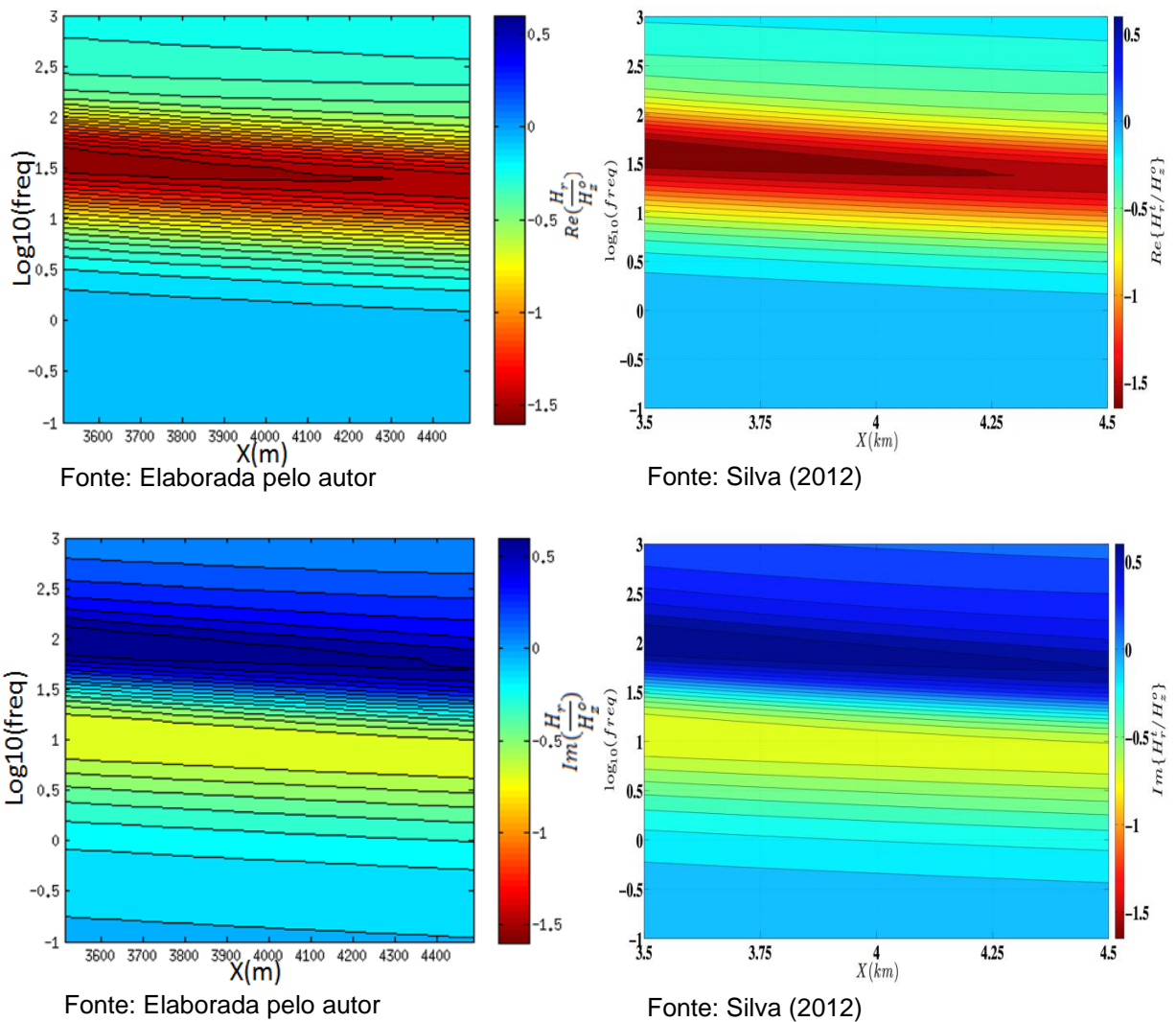
Fonte: Elaborada pelo autor



Fonte: Silva (2012)

O modelo com corpo de 1000 metros levou 5140 s (1 hora, 25 minutos e 40 segundos). E usou memória física de 2.58 Gb e memória virtual de 2.74 Gb.

Figura 16 – Seções da parte real e imaginária do modelo com um corpo de 2000 metros comparando o uso do consol com a programação feita em Fortran.

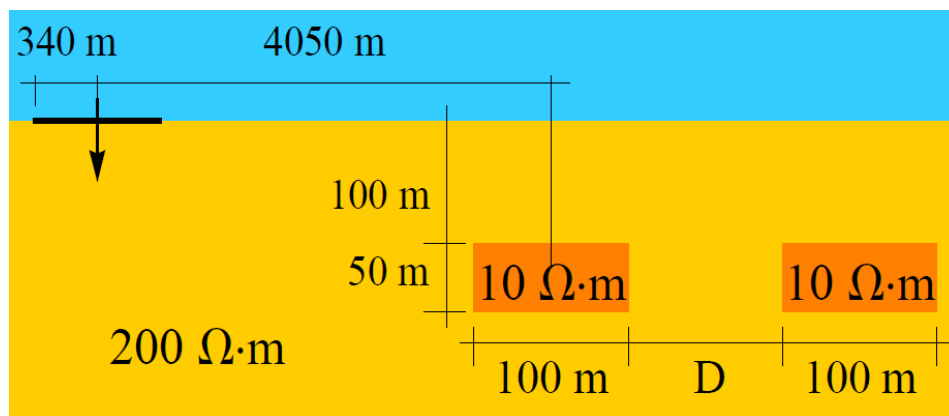


O modelo com corpo de 2000 metros levou 5103 s (1 hora, 25 minutos e 3 segundos). Usou memória física de 3.05 Gb e memória virtual de 3.35 Gb.

3.3 Modelos com dois corpos condutivos

Os modelos com dois corpos condutivos foram desenvolvidos a partir do teste de dois corpos isolados (figura 17) proposto por Silva (2012). No Comsol devido à proximidade dos corpos o refinamento da malha teve maior atenção, pois mesmo não demonstrando erro pode não alcançar a tolerância relativa no gráfico de convergência e assim não encontrando uma resposta satisfatória para o problema.

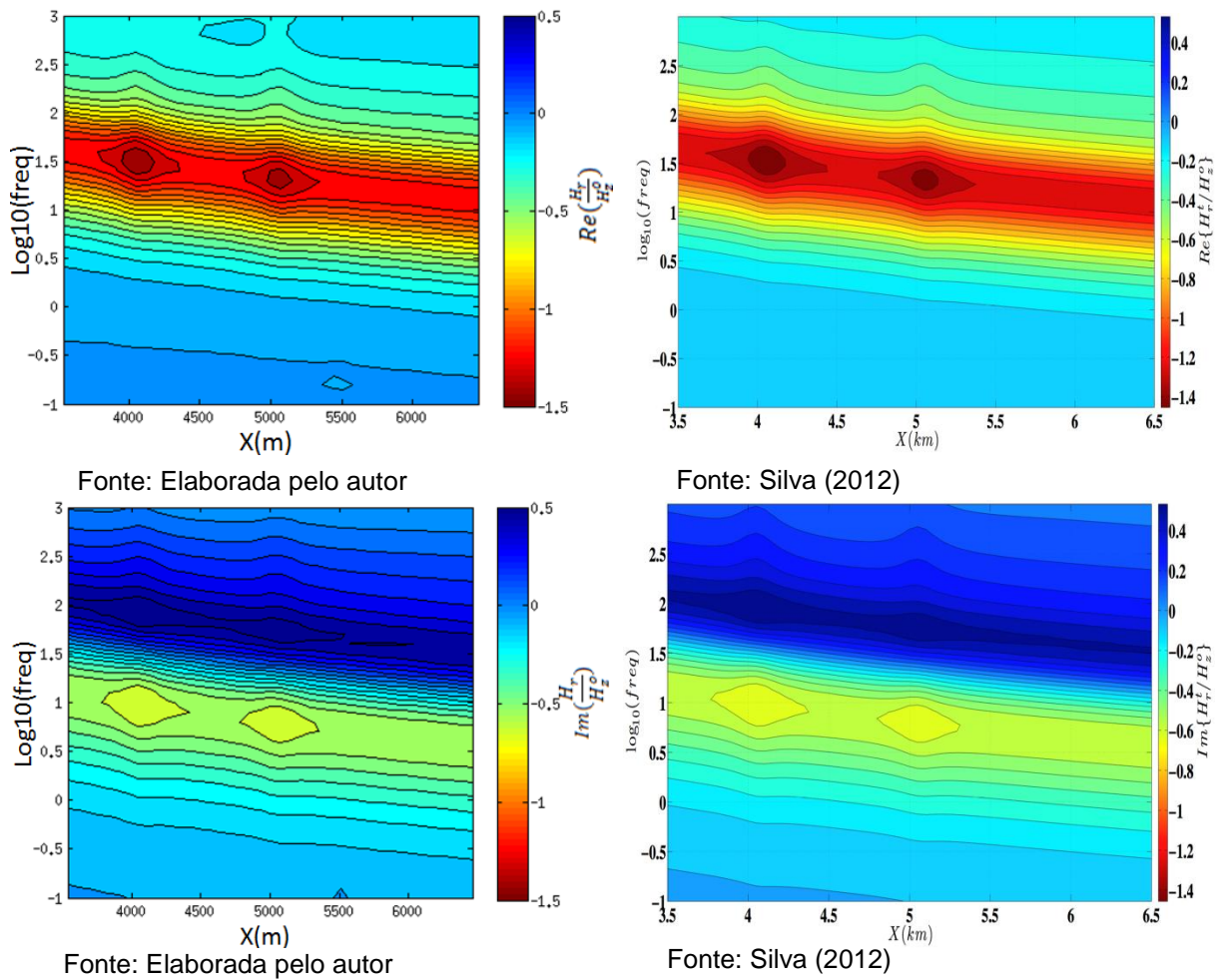
Figura 17 – Modelo com dois corpos condutivos



Fonte:Silva (2012)

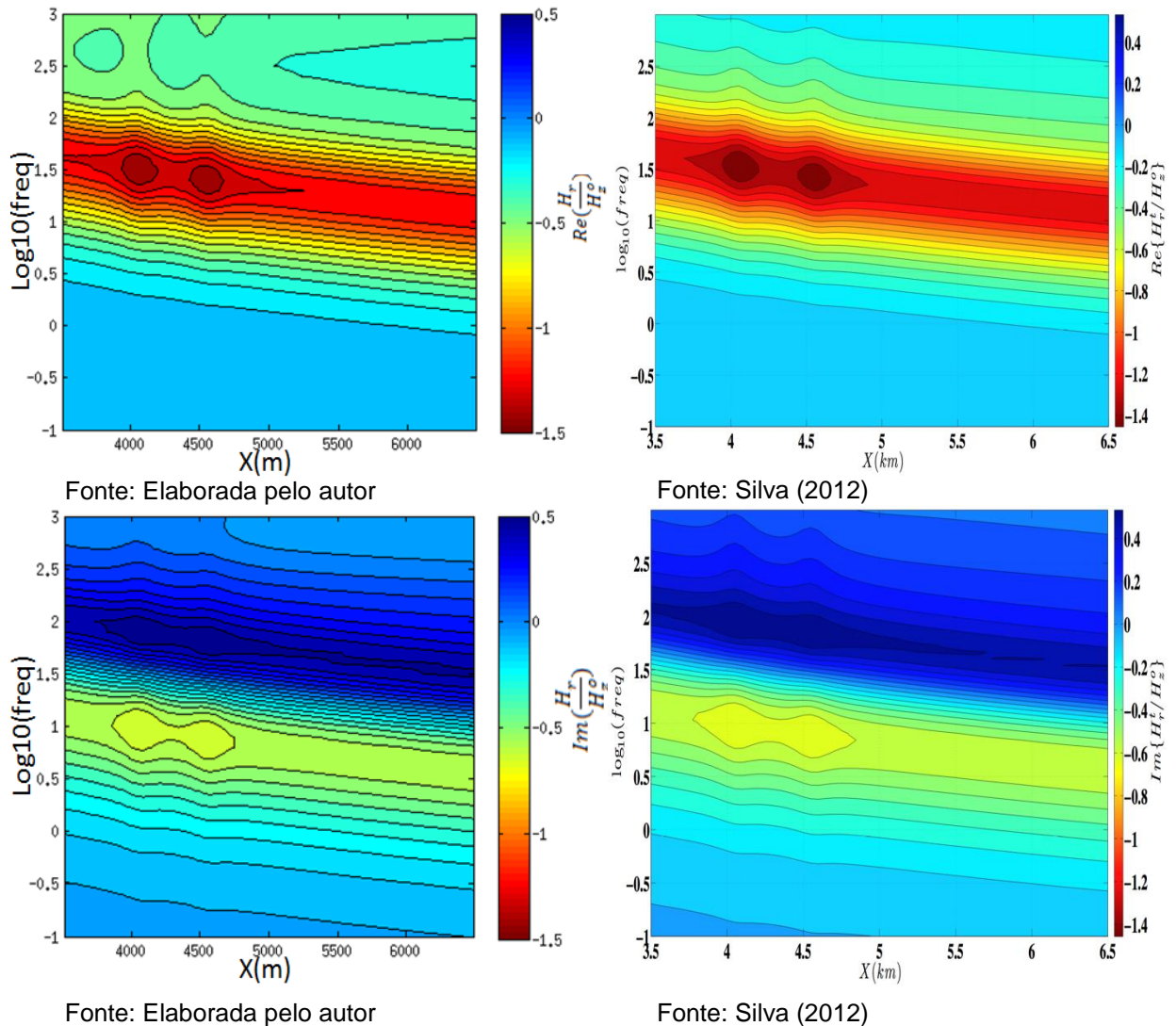
Os dois corpos condutivos tem resistividade de $10 \Omega \cdot m$, com 50 metros de espessura, 100 metros de largura, 100 metros de profundidade entre a superfície e a borda superior, e inseridos em um semi espaço de $200 \Omega \cdot m$. A distancia entre o corpo mais próximo para a fonte é de 4050 metros. Uma pequena diferença do modelo acima apresentado é a distância assumida entre os corpos, aqui entre os centros horizontais dos corpos em vez das bordas mais próximas um do outro, porém não afetando o resultado final. Os três modelos desde tópico diferem na distancia entre os centros horizontais dos dois corpos. Com 1000, 500 e 250 metros para essa distância, e suas respectivas seções (figura 18), (figura 19), (figura 20). Aqui a linha de aquisição é de 3500 até 6500 metros de distancia da fonte.

Figura 18 – Seções da parte real e imaginária do modelo com dois corpos e 1000 metros entre seus centros horizontais comparando o uso do comsol com a programação feita em Fortran.



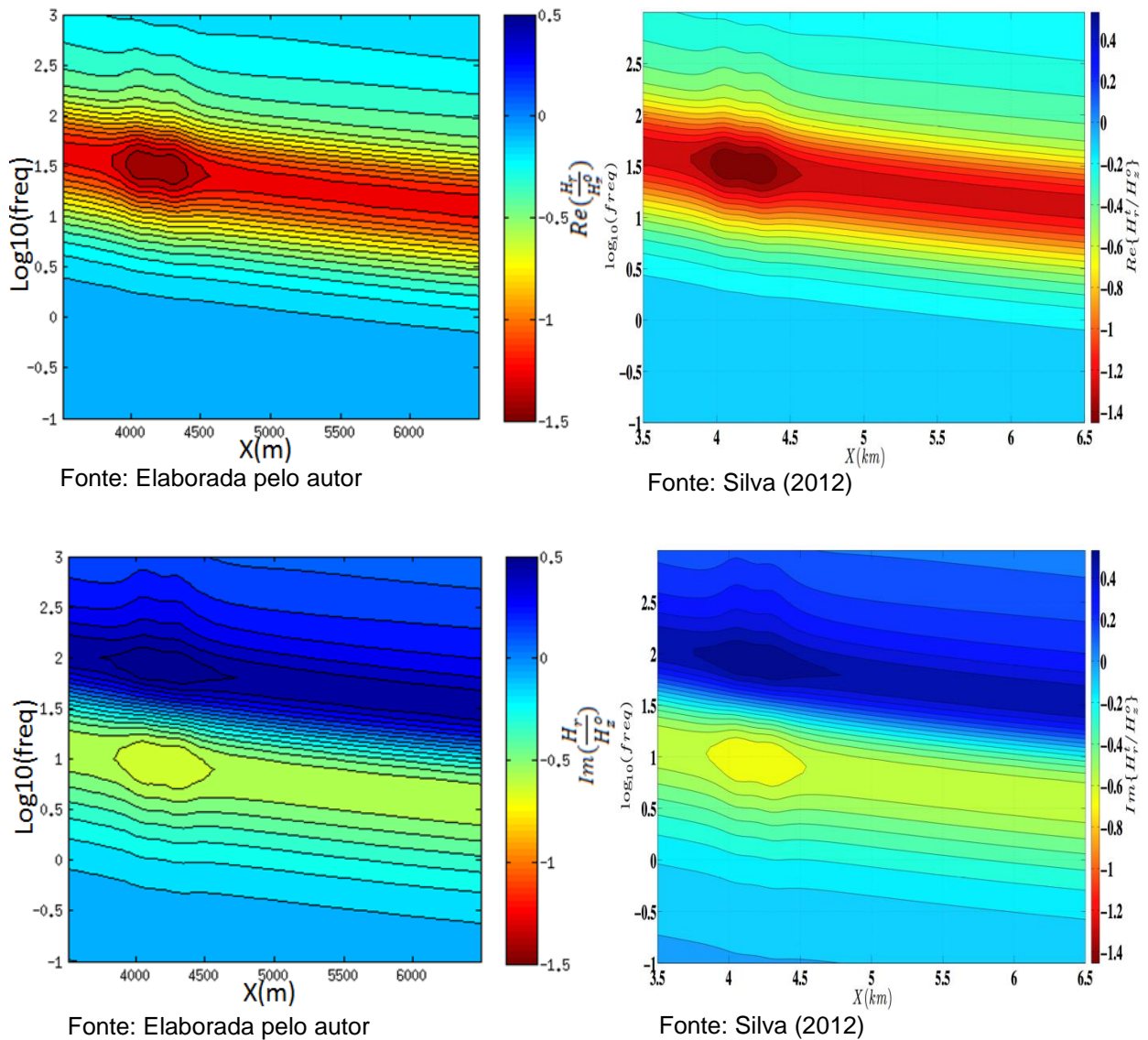
O modelo com dois corpos, com afastamento horizontal de 1000 metros entre os seus centros levou 8062 s (2 horas, 14 minutos e 22 segundos). E usou memória física de 3.3 Gb e memória virtual de 3.71 Gb. Há uma diferença significativa nas altas frequências da parte real, ela se deve a grandes distâncias entre as frequências daquela região, necessitando maior número de frequências e mais refinamento da malha.

Figura 19 – Seções da parte real e imaginária do modelo com dois corpos e 500 metros entre seus centros horizontais comparando o uso do comsol com a programação feita em Fortran.



O modelo com dois corpos, com afastamento horizontal de 500 metros entre os seus centros levou 5770 s (1 hora, 36 minutos, 10 segundos). E usou memória física de 3.19 Gb e memória virtual de 3.43 Gb. E novamente há uma diferença significativa nas altas frequências da parte real, também necessitando maior número de frequências e melhor refino para melhor aproximação.

Figura 20 – Seções da parte real e imaginária do modelo com dois corpos e 250 metros entre seus centros horizontais comparando o uso do comsol com a programação feita em Fortran.



O modelo com dois corpos, com afastamento horizontal de 250 metros entre os seus centros levou 4935 s (1 hora, 22 minutos e 15 segundos). E usou memória física de 2.91 Gb e memória virtual de 3.26 Gb.

As maiores diferenças entre os modelos gerados neste trabalho e os modelos criados por Silva (2012) se devem principalmente a dois fatores, a discretização e a distancia das bordas podendo ser melhoradas futuramente.

4 CONCLUSÃO

O objetivo central deste trabalho foi alcançado, pois nas comparações com o trabalho de Silva, observamos que os modelos criados no Comsol chegaram a resultados muito aproximados àqueles calculados pelos códigos em FORTRAN, mesmo com as diferenças de metodologia utilizadas.

Levando em conta o que foi observado podemos concluir que a utilização do Comsol é de grande eficiência para análise de modelos 3D de métodos geofísicos eletromagnéticos, podendo ser uma importante ferramenta para acadêmicos e profissionais geofísicos. Portanto, sou levado a crer que esta ferramenta deveria ser mais explorada por estes profissionais.

Por fim, creio que será interessante a utilização do Comsol para modelos de outros métodos geofísicos, tendo em vista que ele proporciona resultados com boa qualidade, e de fácil implementação.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

AMESTOY, Patrick R.; DUFF, Iain S.; L'EXCELLENT, J.-Y. Multifrontal parallel distributed symmetric and unsymmetric solvers. **Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering**. V. 184, p. 501-520, 2000. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com>>. Acesso em: 17/11/2015.

DEVRIES, Byron et. al. Parallel Implementations of FGMRES for Solving Large, Sparse Non-symmetric Linear Systems. **Procedia Computer Science**, v.18, p. 491-500, 2013. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com>>. Acesso em: 20/11/2015.

DIAS, C. A. **A Non-Grounded Method for Measuring Induced Electrical Polarization and Conductivity**. Tese - Universidade da Califórnia, Berkeley, 1968.

ELIS, V. R. Métodos elétricos e eletromagnéticos. **Investigando a terra 2000**. Instituto astronômico e geofísico – USP, São Paulo, 2000. Disponível em: <<http://www.iag.usp.br/siae98/geofisica/geofmetodos.htm>>. Acesso em: 15/10/2015

LUIZ, J. G; SILVA, M. da C. **Geofísica de Prospecção**. Universidade Federal do Pará, Belém. Editora: cetup. p7. 1995.

MACHADO, M. V. B. **Estudo analítico e aplicação do método eletromagnético a multifrequência ao mapeamento e identificação de fluidos e reservatórios continentais de petróleo**. 140 p. Tese (Tese de doutorado) - Universidade Estadual Norte Fluminense Darcy Ribeiro, 2009.

OGILVY, R.D; LEE, A.C., **Interpretation of VLF-EM In-phase Data Using Current Density Pseudosections, Geophysical**. Prospecting, 39, 567-580. 1991.

SATO, H. K. **Método eletromagnético para interpretação de polarização induzida e resistividade, usando o protótipo de um sistema eletromagnético a multi-frequência**. 98p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal da Bahia, Salvador, 1979.

SILVA, V. da S. **Modelagem 2,5D dos campos usados no método eletromagnético a multi-frequência – EMMF**. 66 p. Tese (Tese de doutorado) – Universidade Federal do Pará, Belém, 2012.

WARD, S. H.; HOHMANN, G. W. Electromagnetic theory for geophysical applications. In: NABIGHIAN, M. N. (Ed.). **Electromagnetic Methods in Applied Geophysics**, Vol. 1, Theory. [S.l.]: SEG, 1987, (Investigations in Geophysics, v. 3).