



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
FACULDADE DE GEOFÍSICA**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**IVALDEVINGLES RODRIGUES DE SOUZA JUNIOR**

**Modelagem do método MCSEM 2.5-D usando  
elementos finitos em c++**

Belém

2015

**IVALDEVINGLES RODRIGUES DE SOUZA JUNIOR**

**Modelagem do método MCSEM 2.5-D usando  
elementos finitos em c++**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Geofísica do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará – UFPA, em cumprimento às exigências para obtenção do grau de Bacharel em Geofísica.

Orientador: Prof. Vicor Cezar Tocantins

Belém  
2015

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

---

Souza Junior, Ivaldevingles Rodrigues de, 1992-  
Modelagem do Método MCSEM 2.5-D usando  
elementos finitos em C++ / Ivaldevingles Rodrigues de  
Souza Junior. – 2015.

38 f : il. ; 30 cm

Inclui bibliografias

Orientador: Victor Cezar Tocantins de Souza  
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) –  
Universidade Federal do Pará, Instituto de Geociências,  
Faculdade de Geofísica, Belém, 2015.

1. Geofísica. 2. Prospecção. 3. Programação orientada  
a objetos (Computação). 4. Método dos elementos finitos. 5.  
C++ (Linguagem de programação de computador). I. Título.

IVALDEVINGLES RODRIGUES DE SOUZA JUNIOR

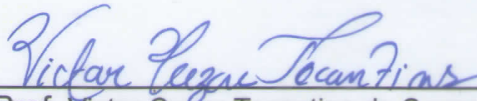
MODELAGEM DO MÉTODO MCSEM 2.5-D USANDO ELEMENTOS FINITOS EM C++

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.

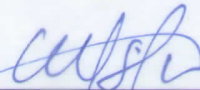
Data da defesa: 25 de fevereiro de 2015.

Conceito: EXC

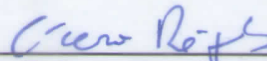
Banca Examinadora:



Prof. Victor Cezar Tocantins de Souza - Orientador  
Doutor em Geofísica  
Universidade Federal do Pará



Prof. Marcos Welby Correa Silva - Membro  
Doutor em Geofísica  
Universidade Federal do Pará



Prof. Cícero Roberto Teixeira Régis - Membro  
Doutor em Geofísica  
Universidade Federal do Pará

A minha familia, principalmente aos meus pais, sr. Ivaldevingles  
Rodrigues de Souza e sra. Katia Silene da Silva Souza,  
por todo apoio que me deram.

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus pela oportunidade de ingressar em um curso de nível superior.

Aos meu pais que estiveram ao meu lado em todos os momentos.

A srta. Elen Fabiane Monteiro de Amorim por todo apoio e paciência.

Ao meu professor e orientador Dr. Vicor Cezar Tocantins por tudo que me ensinou durante esse trabalho.

A todos professores do curso de Geofísica da Universidade Federal do Pará.

A instituição PETROBRAS pelo apoio financeiro.

*“Existem muitas hipóteses em ciência que estão erradas.  
Isso é perfeitamente aceitável, elas são a abertura  
para achar as que estão certas.”  
(Carl Sagan)*

## RESUMO

O Marine Controlled Source Eletromagnético (MCSEM) é um método geofísico desenvolvido na década de 80 para realizar estudos da litosfera oceânica. Atualmente ele é utilizado na indústria do petróleo como uma ferramenta de suporte à sísmica, com o intuito de diminuir os riscos exploratórios. Neste trabalho, realizou-se a modelagem numérica do MCSEM 2.5D utilizando a linguagem de programação C++, a qual propicia a orientação à objetos, diferente da maioria dos trabalhos realizados nessa área, onde a modelagem é realizada com FORTRAN, que não é voltado para esse tipo de programação. Na construção do programa foi aplicada a técnica dos elementos finitos para solucionar as equações diferenciais que descrevem o comportamento físico deste método, isto implicou em dividir o domínio dos modelos geo-elétricos em vários elementos e solucionar localmente o problema, de tal forma que a convergência da solução seja garantida. Além disso, estudou-se o comportamento do sinal deste método, com o intuito de entender como ele é sensível a presença de um reservatório e como a geometria deste influencia nas medidas do MCSEM.

Palavras-chave: Geofísica. Geofísica aplicada. Métodos eletromagnéticos. MCSEM 2.5D. Elementos finitos. C++.

## **ABSTRACT**

The Marine Controlled Source Electromagnetic (MCSEM) is a geophysical method developed in the 80s to carry out studies of oceanic lithosphere. Currently it is used in the oil industry as a seismic support tool, in order to reduce exploration risks. This work presents the numerical modeling of MCSEM 2.5D using the C ++ programming language, that makes possible the orientation to object, unlike most of the work done in this area, where modeling is performed with FORTRAN, that is not facing this type of programming. In the construction of the program was applied the technique of finite elements to solve the differential equations that describe the physical behavior of this method, this resulted in dividing the field of geo-electric models in various elements and locally solve the problem, so that the convergence of solution are guaranteed. In addition, we studied the signal behavior of this method, in order to understand how it is sensitive to the presence of a reservoir and how this geometry influences the MCSEM measurements.

Keywords: Geophysics. Applied geophysics. Electromagnetic methods. MCSEM 2.5D. finite elements. C++.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Representação de um levantamento CSEM. . . . .	12
Figura 2 – Relação do azimute fonte-receptor e a geometria do levantamento. .	13
Figura 3 – Relação entre classe base e classe derivada . . . . .	24
Figura 4 – Modelo para validação . . . . .	25
Figura 5 – Comparação entre a resposta do FORTRAN com as geradas no C++	26
Figura 6 – Primeiro modelo . . . . .	27
Figura 7 – Primeiro modelo- Frequência: 0.125 Hz . . . . .	28
Figura 8 – Primeiro modelo- Frequência: 0.25 Hz . . . . .	28
Figura 9 – Primeiro modelo- Frequência: 0.5 Hz . . . . .	29
Figura 10 – Primeiro modelo- Frequência: 1.0 Hz . . . . .	29
Figura 11 – Segundo Modelo . . . . .	30
Figura 12 – Segundo modelo- Frequência: 0.125 Hz . . . . .	31
Figura 13 – Segundo modelo- Frequência: 0.25 Hz . . . . .	31
Figura 14 – Segundo modelo- Frequência: 0.5 Hz . . . . .	32
Figura 15 – Segundo modelo- Frequência: 1.0 Hz . . . . .	32
Figura 16 – Modelo com heterogeneidade retangula e anticlinal . . . . .	33
Figura 17 – Terceiro modelo- Frequência: 0.125 Hz . . . . .	34
Figura 18 – Terceiro modelo- Frequência: 0.25 Hz . . . . .	34
Figura 19 – Terceiro modelo- Frequência: 0.5 Hz . . . . .	35
Figura 20 – Terceiro modelo- Frequência: 1.0 Hz . . . . .	35

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	10
1.1	OBJETIVOS	10
1.2	METODOLOGIA	11
<b>2</b>	<b>O MÉTODO MCSEM</b>	12
2.1	FUNDAMENTOS MATEMÁTICOS DO MCSEM 2.5-D	14
<b>3</b>	<b>SOLUÇÃO ATRAVÉS DO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS</b>	18
<b>4</b>	<b>C++ E A PROGRAMAÇÃO ORIENTADA À OBJETOS</b>	23
4.1	CARACTERÍSTICAS DA PROGRAMAÇÃO ORIENTADA À OBJETOS	23
<b>5</b>	<b>RESULTADOS</b>	25
5.1	VALIDAÇÃO	25
5.2	ANÁLISE DOS RESULTADOS	28
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES</b>	37
	<b>REFERÊNCIAS</b>	38

## 1 INTRODUÇÃO

A exploração de hidrocarbonetos em águas profundas envolve um alto risco exploratório e elevados investimentos. Esse fato mostra-se um grande problema para a indústria petrolífera, uma vez que ele também implica no aumento dos riscos financeiros.

Por esse motivo os métodos geofísicos são ferramentas importantes para diminuir a possibilidade de prejuízo deste setor, uma vez que eles permitem o estudo da subsuperfície com base nas propriedades físicas do meio, objetivando identificar e mapear estruturas geológicas que apresentam interesse econômico. Dentre tais métodos, a sísmica certamente é a mais aplicada, provavelmente pela sua competência em gerar uma imagem que tenta descrever a geometria dos corpos e camadas rochosos presentes no subsolo.

Todavia, até mesmo a sísmica, mesmo sendo o método geofísico mais bem sucedido, apresenta taxas de erro consideráveis. Segundo [Thirud \(2002\)](#), cerca de 90% dos reservatórios identificados através desse método são preenchidos por água de formação, o que confirma essa afirmativa.

Mediante a tudo isso, as empresas exploradoras de petróleo demandam grandes esforços e investimentos no desenvolvimento e aprimoramento de métodos não-sísmicos. Nesse contexto, o MCSEM é uma ferramenta bastante promissora ([ALMEIDA; RIJO, 2011](#)) e por isso ele vem sendo bastante estudado, seja pela indústria ou pela comunidade acadêmica.

Essa ferramenta, relativamente nova, gera muita expectativa, já que ela é sensível a presença de corpos finos e com resistividade dezenas de vezes maior que o meio encaixante. De maneira que estas também são características comuns de um reservatório de hidrocarboneto, portanto, é justificável o interesse sobre o MCSEM.

### 1.1 OBJETIVOS

A modelagem numérica do Marine Controlled Source Eletromagnético é tradicionalmente realizada com a linguagem de programação FORTRAN. Porém, nesse trabalho se propõem outra abordagem de programação: a orientação à objetos.

Por esse motivo foi necessário utilizar uma linguagem que possibilite tal abordagem. Neste caso, optou-se pelo C++ devido a vasta utilização deste em outras áreas de pesquisa. O intuito disto é, principalmente, verificar se a modelagem do MCSEM com a utilização desta linguagem de programação é satisfatória. Além disso, deseja-

se integrar futuramente o programa desenvolvido à uma interface gráfica, o que é uma tarefa bem mais fácil com a utilização do C++.

Também se objetiva analisar o comportamento do sinal gerado pelo MCSEM, visando entender, principalmente, como esse método responde a diferentes corpos resistivos.

## 1.2 METODOLOGIA

Este trabalho foi realizado em duas etapas principais. A primeira foi a criação dos programas que realizam a modelagem numérica do MCSEM. A segunda consistiu em avaliar as respostas geradas pelo programa para modelos geo-elétricos distintos.

Na primeira etapa foram criados quatro códigos com o C++, os quais são descritos a seguir:

Primeiro programa: discretiza o domínio dos modelos criando uma malha regular composta por triângulos, chamados de elementos, que por sua vez são formados por três nós. sendo que este programa fornece dois arquivos de saída, um contendo a numeração dos elementos e suas resistividade e outro com as coordenadas dos nós.

Segundo programa: realiza a leitura dos dados, incluindo os fornecidos pelo primeiro programa. É também neste que a solução final é escrita em um arquivo de saída.

Terceiro programa: este contém a classe referente a técnica dos elementos finitos, por isso ele possui funções-membro e objetos característicos desse método.

Quarto programa: contém classe responsável pelo cálculo do sinal 1D.

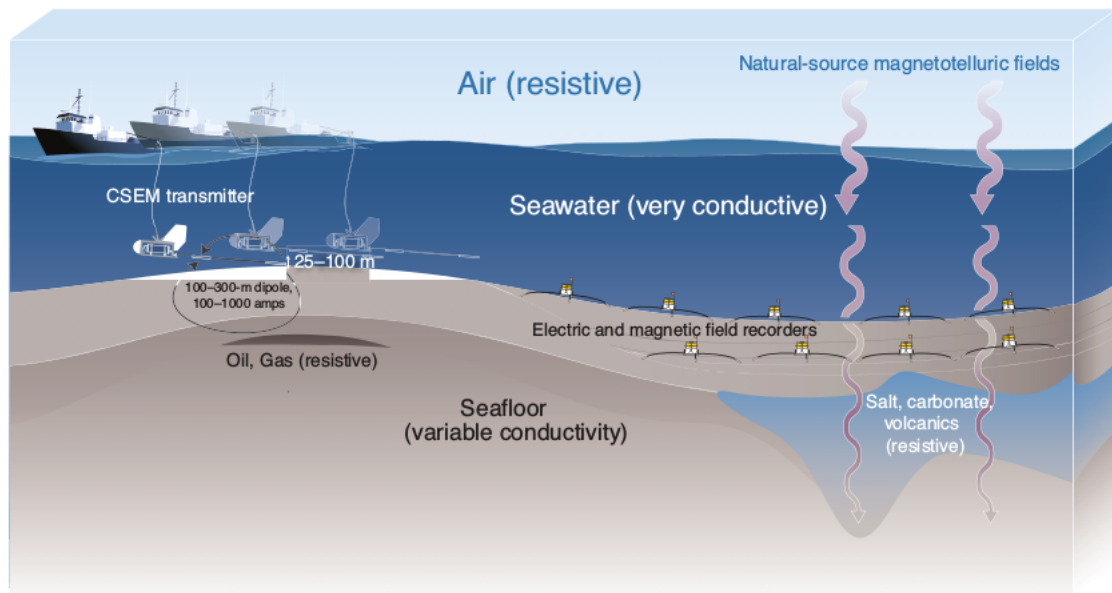
Finalmente, na segunda etapa os resultados fornecidos pelos programas descritos acima são analisados, tentando-se, desta forma estender o comportamento dos sinais gerados.

## 2 O MÉTODO MCSEM

O MCSEM é um método eletromagnético geofísico que surgiu na década de 80 para ser aplicado nos estudos da litosfera oceânica (COX, 1981 apud CONSTABLE; SRNKA, 2007, p. 3). Entretanto, nos últimos anos ele vem ganhando seu espaço na indústria petrolífera. Isso se deve, principalmente, aos desafios enfrentados na exploração em águas profundas, o que aumentou a necessidade de utilizar novas ferramentas para adicionar informações sobre o subsolo e, assim, diminuir os riscos exploratórios (CONSTABLE; SRNKA, 2007).

Esse método utiliza um dipolo elétrico horizontal (DEH) e um arranjo de receptores elétricos para estudar a resistividade da subsuperfície, com o intuito de identificar corpos resistivos que podem ser interpretados como reservatórios de hidrocarboneto. Nele o DEH é rebocado próximo ao fundo oceânico por um navio e, concomitantemente, gera um sinal eletromagnético de baixa frequência que se propaga em todas as direções. Este sinal atinge as camadas sedimentares abaixo do mar, onde induz campos secundários nas estruturas geológicas, os quais refletem e são detectados pelos receptores fixados no fundo do mar (Figura 1).

Figura 1 – Representação de um levantamento CSEM.



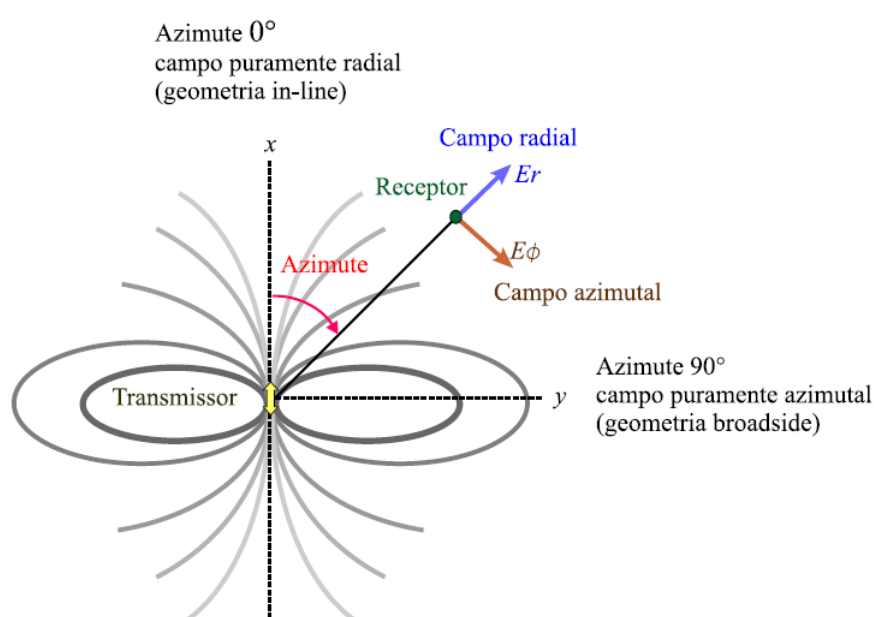
Fonte: Constable (2010).

Entretanto, os receptores não medem somente os campos induzidos na subsuperfície, uma vez que o sinal captado é o resultado da interação entre três ondas distintas, são elas: as ondas advindas da subsuperfície, aquelas que refletem na inter-

face ar-água (*airwave*) e as que vem diretamente da fonte, propagando-se apenas pela lamina d'água. Deste modo, a análise do sinal deve considerar a influência destas três ondas, com o intuito de evitar interpretações incorretas dos dados (LUZ, 2007).

Os levantamentos MCSEM possuem duas configurações principais, que estão relacionadas com a posição do conjunto de receptores em relação ao transmissor. Quando o azimute entre os receptores e o transmissor é  $0^\circ$  a configuração é denominada de geometria radial ou *inline*, quando esse azimute for  $90^\circ$  a geometria é chamada de azimutal ou *broadside* (Figura 2).

Figura 2 – Relação do azimute fonte-receptor e a geometria do levantamento.



Fonte: Souza (2007).

As geometrias descritas na figura acima constituem um fator importante no MCSEM, uma vez que o sinal varia com a mudança do azimute fonte-receptor. Isso se deve principalmente a dois fenômenos físicos relacionados com a propagação da corrente elétrica, são eles: efeito indutivo e efeito galvânico. O primeiro diz respeito à formação de campos elétricos, que são induzidos por campos elétricos horizontais. O segundo é uma acumulação de carga gerada sobre a superfície superior e inferior do corpo resistivo, provocada por campos elétricos verticais (EIDESMO et al., 2002).

De acordo com Um e Alumbaugh (2007) a ocorrência apenas do efeito indutivo não é suficiente para detectar corpos resistivos finos, por esse motivo o método Magnetotelúrico não é eficiente na identificação de camadas resistivas. Para isto é necessário gerar componentes de corrente normais à superfície do corpo ou camada, ou seja, necessita-se do efeito galvânico, o que ocorre com quando se utiliza o dipolo elétrico horizontal.

Portanto, o Marine Controlled Source Eletromagnético pode detectar corpos finos com alta resistividade. Contudo, deve-se levar em consideração que o mesmo é susceptível à ambiguidade geofísica e a ruídos, como por exemplo a arwave, fatores que devem ser considerados na interpretação do sinal.

## 2.1 FUNDAMENTOS MATEMÁTICOS DO MCSEM 2.5-D

Os levantamentos MCSEM fornecem um sinal eletromagnético, cujo comportamento está relacionado com a interação entre os campos (gerados pelo DEH) e os corpos de diferentes propriedades elétricas presentes no subsolo. Deste modo, para tentar interpretar as estruturas de uma região através do sinal é necessário primeiro compreender os embasamentos teóricos dos fenômenos físicos relacionados ao comportamento dos campos elétricos e magnéticos.

Sendo que, estes campos são descritos pelas equações de Maxwell, as quais são dadas a seguir, no domínio da frequência e no regime quase-estacionário para uma dependência temporal de  $e^{i\omega t}$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -i\omega\mu\mathbf{H} \quad (2.1)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \sigma\mathbf{E} + \mathbf{J}_s \quad (2.2)$$

Onde  $\mathbf{E}$  é o campo elétrico total,  $\mathbf{H}$  o campo magnético total,  $\omega$  a frequência angular,  $\mu$  a permeabilidade elétrica,  $\sigma$  a condutividade elétrica e  $\mathbf{J}_s$  a densidade de corrente representando uma fonte eletromagnética. De modo que, pode-se decompor os campos totais, a condutividade e a permeabilidade em componentes primárias e secundárias, ou seja:

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}^p + \mathbf{E}^s \quad (2.3)$$

$$\mathbf{H} = \mathbf{H}^p + \mathbf{H}^s \quad (2.4)$$

$$\sigma = \sigma^p + \Delta\sigma \quad (2.5)$$

$$\mu = \mu^p + \Delta\mu \quad (2.6)$$

É importante ressaltar que as componentes primárias fazem alusão a um meio homogêneo com camadas horizontais, que neste trabalho é chamado de modelo pri-

mário. Para esse meio as equações (2.1) e (2.2) podem ser reescritas da seguinte maneira:

$$\nabla \times \mathbf{E}^p = -i\omega\mu^p\mathbf{H}^p \quad (2.7)$$

$$\nabla \times \mathbf{H}^p = \sigma^p\mathbf{E}^p + \mathbf{J} \quad (2.8)$$

Além disso, as componentes secundárias são consequentes do contraste de resistividade em relação ao meio primário (RIJO, 1996), ou seja, elas representam as heterogeneidades. Sendo assim, substituindo (2.3), (2.4), (2.5) e (2.6) em (2.1) e (2.2), obtêm-se:

$$\nabla \times (\mathbf{E}^p + \mathbf{E}^s) = -i\omega(\mu^p + \Delta\mu)(\mathbf{H}^p + \mathbf{H}^s) \quad (2.9)$$

$$\nabla \times (\mathbf{H}^p + \mathbf{H}^s) = (\sigma^p + \Delta\sigma)(\mathbf{E}^p + \mathbf{E}^s) + \mathbf{J} \quad (2.10)$$

Levando em consideração as equações (2.7) e (2.8) pode-se reescrever (2.9) e (2.10) da seguinte maneira:

$$\nabla \times \mathbf{E}^s = -i\omega\mu\mathbf{H}^s - i\omega\Delta\mu\mathbf{H}^p \quad (2.11)$$

$$\nabla \times \mathbf{H}^s = \sigma\mathbf{E}^s + \Delta\sigma\mathbf{E}^p \quad (2.12)$$

As expressões logo acima são denominadas de equações de Maxwell para o campo secundário. Comparando estas com as equações de Maxwell para o campo primário (2.7 e 2.8), verifica-se que nesta última as fontes energizantes são as correntes do transmissor, enquanto que na primeira as fontes energizantes são correntes da heterogeneidade, que dependem do campo primário (RIJO, op. cit.).

Como neste trabalho consideramos que as propriedades elétricas não variam na direção do eixo cartesiano  $y$  é possível decompor o problema tridimensional em uma sequência de problemas bidimensionais (RIJO, op. cit.), o que pode ser feito através da transformada de Fourier, definida logo abaixo:

$$\hat{F}(x, k_y, z) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} f(x, y, z) e^{-ik_y y} dy \quad (2.13)$$

Aplicando essa transformada na equação (2.11) e separando as componentes do rotacional, obtêm-se as expressões abaixo:

$$ik_y \hat{E}_z^s - \frac{\partial \hat{E}_y^s}{\partial z} = -i\omega\mu \hat{H}_x^s \quad (2.14)$$

$$\frac{\partial \hat{E}_x^s}{\partial z} - \frac{\partial \hat{E}_z^s}{\partial x} = -i\omega\mu \hat{H}_y^s \quad (2.15)$$

$$\frac{\partial \hat{E}_y^s}{\partial x} - ik_y \hat{E}_x^s = -i\omega\mu \hat{H}_z^s \quad (2.16)$$

Fazendo o mesmo com a equação (2.12), tem-se:

$$ik_y \hat{H}_z^s - \frac{\partial \hat{H}_y^s}{\partial z} = \sigma \hat{E}_x^s + \Delta\sigma \hat{E}_x^p \quad (2.17)$$

$$\frac{\partial \hat{H}_x^s}{\partial z} - \frac{\partial \hat{H}_z^s}{\partial x} = \sigma \hat{E}_y^s + \Delta\sigma \hat{E}_y^p \quad (2.18)$$

$$\frac{\partial \hat{H}_y^s}{\partial x} - ik_y \hat{H}_x^s = \sigma \hat{E}_z^s + \Delta\sigma \hat{E}_z^p \quad (2.19)$$

As componentes  $\hat{E}_y^s$  e  $\hat{H}_y^s$  são linearmente independentes, em contrapartida as componentes  $\hat{E}_x^s$ ,  $\hat{E}_z^s$ ,  $\hat{H}_x^s$  e  $\hat{H}_z^s$  são linearmente dependentes das componentes do campo que estão na direção  $y$ . Desta forma, essas é possível escrever as componentes linearmente dependentes em função de  $\hat{E}_y^s$ ,  $\hat{H}_y^s$  e dos campos primários (SILVA, 2012).

Sendo assim, substituindo (2.16) em (2.17) e (2.14) em (2.19), sabendo que a constante de propagação ( $u$ ) para uma determinada camada é dada por

$$u = \sqrt{k_y^2 + i\omega\mu\sigma},$$

então, encontra-se, respectivamente, as equações dadas a seguir:

$$\hat{E}_x^s = -\frac{ik_y}{u^2} \frac{\partial \hat{E}_y^s}{\partial x} - \frac{i\omega\mu}{u^2} \frac{\partial \hat{H}_y^s}{\partial z} - \frac{i\omega\mu}{u^2} \Delta\sigma \hat{E}_x^p \quad (2.20)$$

$$\hat{E}_z^s = -\frac{ik_y}{u^2} \frac{\partial \hat{E}_y^s}{\partial z} + \frac{i\omega\mu}{u^2} \frac{\partial \hat{H}_y^s}{\partial x} - \frac{i\omega\mu}{u^2} \Delta\sigma \hat{E}_z^p \quad (2.21)$$

Seguindo com as operações matemáticas, para obter as componentes  $\hat{H}_x^s$  e  $\hat{H}_z^s$ , é necessária substituir (2.21) em (2.19) e (2.20) em (2.16), o resultado disto será, respectivamente:

$$\hat{H}_x^s = \frac{\sigma}{u^2} \frac{\partial \hat{E}_y^s}{\partial z} - \frac{ik_y}{u^2} \frac{\partial \hat{H}_y^s}{\partial x} + \frac{ik_y}{u^2} \Delta \sigma \hat{E}_z^p \quad (2.22)$$

$$\hat{H}_z^s = -\frac{\sigma}{u^2} \hat{E}_y^s - \frac{ik_y}{u^2} \frac{\partial \hat{H}_y^s}{\partial z} - \frac{ik_y}{u^2} \Delta \sigma \hat{E}_x^p \quad (2.23)$$

Finalmente, substituindo (2.20) e (2.21) em (2.15), encontra-se

$$\begin{aligned} & -\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{i\omega\mu}{u^2} \frac{\partial \hat{H}_y^s}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{i\omega\mu}{u^2} \frac{\partial \hat{H}_y^s}{\partial z} \right) + i\omega\mu \hat{H}_y^s + ik_y \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{1}{u^2} \frac{\partial \hat{E}_y^s}{\partial z} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{1}{u^2} \frac{\partial \hat{E}_y^s}{\partial x} \right) \right] = \\ & \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{i\omega\mu\Delta\sigma}{u^2} \hat{E}_x^p \right) - \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{i\omega\mu\Delta\sigma}{u^2} \hat{E}_z^p \right) \end{aligned} \quad (2.24)$$

e substituindo (2.22) e (2.23) em (2.18), obtem-se:

$$\begin{aligned} & -\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\sigma}{u^2} \frac{\partial \hat{E}_y^s}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\sigma}{u^2} \frac{\partial \hat{E}_y^s}{\partial z} \right) + \sigma \hat{E}_y^s - ik_y \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{1}{u^2} \frac{\partial \hat{H}_y^s}{\partial z} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{1}{u^2} \frac{\partial \hat{H}_y^s}{\partial x} \right) \right] = \\ & ik_y \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\Delta\sigma}{u^2} \hat{E}_x^p \right) - \Delta\sigma \hat{E}_y^p + ik_y \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\Delta\sigma}{u^2} \hat{E}_z^p \right) \end{aligned} \quad (2.25)$$

As equações diferenciais acima (2.24 e 2.25) formam um sistema linear, cuja solução fornece as componentes  $\hat{E}_y^s$  e  $\hat{H}_y^s$  para uma dada condição de contorno. Entretanto, obter essa solução não é uma tarefa fácil. Para isto é necessário utilizar métodos numéricos para resolver este sistema, sendo que neste trabalho será utilizado o método dos elementos finitos para calcular a solução.

### 3 SOLUÇÃO ATRAVÉS DO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

O método dos elementos finitos é uma técnica que fornece soluções aproximadas para sistemas de equações diferenciais (BECKER; CAREY; ODEN, 1981), como por exemplo, as equações (2.24) e (2.25). Esse método se caracteriza por dividir o domínio do problema em vários subdomínios e aplicar em cada um desses o método de Galerkin, que consiste em solucionar as equações através de uma combinação linear de funções bases (SILVA, 2012).

Neste trabalho os subdomínios são bidimensionais e triangulares, por isso são constituídos por três nós. De modo que, cada um deles é denominado de elemento, cuja dimensão depende das coordenadas de seus vértices, chamados de nós. Estes, por sua vez, possuem duas numerações, uma global, que classifica os nós com relação a todo domínio, e outra numeração local, que varia de 1 a 3 e classifica os nós pertencentes a um determinado elemento.

Desta forma, de acordo com a técnica numérica dos elementos finitos, para se obter a solução aproximada dos campos  $\hat{E}_y^s$  e  $\hat{H}_y^s$  é necessário aplicar o método de Galerkin nas equações (2.24) e (2.25), considerando um elemento genérico  $\Omega_e$  e uma função base  $\varphi_m$ , sendo assim:

$$\begin{aligned} & \int_{\Omega_e} \varphi_m \left[ -\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{i\omega\mu}{u^2} \frac{\partial \hat{H}_y^s}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{i\omega\mu}{u^2} \frac{\partial \hat{H}_y^s}{\partial z} \right) + i\omega\mu \hat{H}_y^s \right] dx dz + \\ & ik_y \int_{\Omega_e} \varphi_m \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{1}{u^2} \frac{\partial \hat{E}_y^s}{\partial z} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{1}{u^2} \frac{\partial \hat{E}_y^s}{\partial x} \right) \right] dx dz - \\ & \int_{\Omega_e} \varphi_m \left[ \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{i\omega\mu\Delta\sigma}{u^2} \hat{E}_x^p \right) - \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{i\omega\mu\Delta\sigma}{u^2} \hat{E}_z^p \right) \right] dx dz = 0 \end{aligned} \quad (3.1)$$

$$\begin{aligned} & \int_{\Omega_e} \varphi_m \left[ -\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\sigma}{u^2} \frac{\partial \hat{E}_y^s}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\sigma}{u^2} \frac{\partial \hat{E}_y^s}{\partial z} \right) + \sigma \hat{E}_y^s \right] dx dz - \\ & ik_y \int_{\Omega_e} \varphi_m \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{1}{u^2} \frac{\partial \hat{H}_y^s}{\partial z} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{1}{u^2} \frac{\partial \hat{H}_y^s}{\partial x} \right) \right] dx dz - \\ & ik_y \int_{\Omega_e} \varphi_m \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\Delta\sigma}{u^2} \hat{E}_x^p \right) - \Delta\sigma \hat{E}_y^p + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\Delta\sigma}{u^2} \hat{E}_z^p \right) \right] dx dz = 0 \end{aligned} \quad (3.2)$$

Para enfatizar a contribuição das integrais nas fronteiras dos elementos usa-se o teorema de Green (RIJO, 1996). Com isso, aplicando esse teorema, sabendo que

$$\hat{E}_y^s = \sum_{m=1}^3 \varphi_m \hat{E}_{ym}^s$$

$$\hat{H}_y^s = \sum_{m=1}^3 \varphi_m \hat{H}_{ym}^s$$

se chega nas seguintes expressões:

$$\begin{aligned} & \sum_{m=1, n=1}^3 \int_{\Omega_e} \frac{i\omega\mu}{u^2} \hat{H}_{yn} \left[ \frac{\partial\varphi_m}{\partial z} \frac{\partial\varphi_n}{\partial z} + \frac{\partial\varphi_m}{\partial x} \frac{\partial\varphi_n}{\partial x} + u^2 \varphi_m \varphi_n \right] dx dz - \\ & \sum_{m=1, n=1}^3 \int_{\Omega_e} \frac{ik_y}{u^2} \hat{E}_{yn} \left[ \frac{\partial\varphi_m}{\partial x} \frac{\partial\varphi_n}{\partial z} - \frac{\partial\varphi_m}{\partial z} \frac{\partial\varphi_n}{\partial x} \right] dx dz = \\ & - \frac{i\omega\mu}{u^2} \Delta\sigma \int_{\Omega_e} \hat{E}_{xn}^p \frac{\partial\varphi_m}{\partial z} \varphi_n dx dz - \frac{i\omega\mu}{u^2} \Delta\sigma \int_{\Omega_e} \hat{E}_{zn}^p \frac{\partial\varphi_m}{\partial x} \varphi_n dx dz \end{aligned} \quad (3.3)$$

$$\begin{aligned} & \sum_{m=1, n=1}^3 \int_{\Omega_e} \frac{\sigma}{u^2} \hat{E}_{yn} \left[ \frac{\partial\varphi_m}{\partial z} \frac{\partial\varphi_n}{\partial z} + \frac{\partial\varphi_m}{\partial x} \frac{\partial\varphi_n}{\partial x} + u^2 \varphi_m \varphi_n \right] dx dz + \\ & \sum_{m=1, n=1}^3 \int_{\Omega_e} \frac{ik_y}{u^2} \hat{H}_{yn} \left[ \frac{\partial\varphi_m}{\partial x} \frac{\partial\varphi_n}{\partial z} - \frac{\partial\varphi_m}{\partial z} \frac{\partial\varphi_n}{\partial x} \right] dx dz = \\ & - \frac{ik_y}{u^2} \Delta\sigma \int_{\Omega_e} \hat{E}_{xn}^p \frac{\partial\varphi_m}{\partial x} \varphi_n dx dz - \frac{ik_y}{u^2} \Delta\sigma \int_{\Omega_e} \hat{E}_{zn}^p \frac{\partial\varphi_m}{\partial z} \varphi_n dx dz - \\ & \Delta\sigma \int_{\Omega_e} \hat{E}_{yn}^p \varphi_m \varphi_n dx dz \end{aligned} \quad (3.4)$$

As equações acima podem ser escritas na forma matricial, contudo, é necessário antes definir as funções bases, que para este problema serão dadas, para um elemento qualquer, por:

$$\varphi_m = \frac{a_m + b_m x + c_m z}{2A_e}$$

Onde  $m$  representa a numeração local dos nós, por isso ele varia de 1 a 3,  $A_e$  é área de um dado elemento e as variáveis  $a_m$ ,  $b_m$  e  $c_m$ , são determinadas pelas expressões dadas a seguir:

$$a_1 = x_2 z_3 - x_3 z_2, \quad b_1 = z_2 - z_3, \quad c_1 = x_3 - x_2$$

$$a_2 = x_3 z_1 - x_1 z_3, \quad b_2 = z_3 - z_1, \quad c_2 = x_1 - x_3$$

$$a_3 = x_1 z_2 - x_2 z_1, \quad b_3 = z_1 - z_2, \quad c_3 = x_2 - x_1$$

Para escrever (3.3 e 3.4) na forma matricial é necessário também definir os seguintes parâmetros.

$$K_{mn}^{TM} = \frac{i\omega\mu}{u^2} \int_{\Omega_e} \left[ \frac{\partial\varphi_m}{\partial z} \frac{\partial\varphi_n}{\partial z} + \frac{\partial\varphi_m}{\partial x} \frac{\partial\varphi_n}{\partial x} + u^2 \varphi_m \varphi_n \right] dx dz \quad (3.5)$$

$$K_{mn}^{TE} = \frac{\sigma}{u^2} \int_{\Omega_e} \left[ \frac{\partial\varphi_m}{\partial z} \frac{\partial\varphi_n}{\partial z} + \frac{\partial\varphi_m}{\partial x} \frac{\partial\varphi_n}{\partial x} + u^2 \varphi_m \varphi_n \right] dx dz \quad (3.6)$$

$$K_{mn}^{AC} = \frac{ik_y}{u^2} \int_{\Omega_e} \left[ \frac{\partial\varphi_m}{\partial x} \frac{\partial\varphi_n}{\partial z} - \frac{\partial\varphi_m}{\partial z} \frac{\partial\varphi_n}{\partial x} \right] dx dz \quad (3.7)$$

$$F^{TM} = -\frac{i\omega\mu}{u^2} \Delta\sigma \int_{\Omega_e} \hat{E}_{xn}^p \frac{\partial\varphi_m}{\partial z} \varphi_n dx dz - \frac{i\omega\mu}{u^2} \Delta\sigma \int_{\Omega_e} \hat{E}_{zn}^p \frac{\partial\varphi_m}{\partial x} \varphi_n dx dz \quad (3.8)$$

$$F^{TE} = -\frac{ik_y}{u^2} \Delta\sigma \int_{\Omega_e} \hat{E}_{xn}^p \frac{\partial\varphi_m}{\partial x} \varphi_n dx dz - \frac{ik_y}{u^2} \Delta\sigma \int_{\Omega_e} \hat{E}_{zn}^p \frac{\partial\varphi_m}{\partial z} \varphi_n dx dz -$$

$$\Delta\sigma \int_{\Omega_e} \hat{E}_{yn}^p \varphi_m \varphi_n dx dz \quad (3.9)$$

A partir das expressões (3.5), (3.6), (3.7), (3.8) e (3.9) é possível montar um pequeno sistema linear para cada elemento, com base na numeração local dos mesmos, tal sistema possui a seguinte estrutura.

$$\begin{bmatrix} K_{mn}^{TM} & -K_{mn}^{AC} \\ K_{mn}^{AC} & K_{mn}^{TE} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H_{yn} \\ E_{yn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_n^{TM} \\ F_n^{TE} \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

Contudo, para a implementação numérica ainda se faz necessário aplicar a identidade (RIJO, 1996)

$$\int_{\Omega_e} \varphi_1^a \varphi_2^b \varphi_3^c dx dz = \frac{2a!b!c!A_e}{(a+b+c+2)!}$$

para chegar nas expressões:

$$K^{TM} = \frac{i\omega\mu}{4u^2 A_e} \begin{bmatrix} b_1^2 + c_1^2 & b_1 b_2 + c_1 c_2 & b_1 b_3 + c_1 c_3 \\ b_2 b_1 + c_2 c_1 & b_2^2 + c_2^2 & b_2 b_3 + c_2 c_3 \\ b_3 b_1 + c_3 c_1 & b_3 b_2 + c_3 c_2 & b_3^2 + c_3^2 \end{bmatrix} + \frac{i\omega\mu A_e}{12} \begin{bmatrix} 2 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 2 \end{bmatrix}$$

$$K^{TE} = \frac{\sigma}{4u^2 A_e} \begin{bmatrix} b_1^2 + c_1^2 & b_1 b_2 + c_1 c_2 & b_1 b_3 + c_1 c_3 \\ b_2 b_1 + c_2 c_1 & b_2^2 + c_2^2 & b_2 b_3 + c_2 c_3 \\ b_3 b_1 + c_3 c_1 & b_3 b_2 + c_3 c_2 & b_3^2 + c_3^2 \end{bmatrix} + \frac{\sigma A_e}{12} \begin{bmatrix} 2 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 2 \end{bmatrix}$$

$$K^{AC} = \frac{ik_y}{4u^2 A_e} \begin{bmatrix} 0 & b_1 c_2 - c_1 b_2 & b_1 c_3 - c_1 b_3 \\ b_2 c_1 - c_2 b_1 & 0 & b_2 c_3 - c_2 b_3 \\ b_3 c_1 - c_3 b_1 & b_3 c_2 - c_3 b_2 & 0 \end{bmatrix}$$

$$F_n^{TM} = -\frac{i\omega\mu}{6u^2} \Delta\sigma c_n \sum_n \hat{E}_{xn}^p + \frac{i\omega\mu}{6u^2} \Delta\sigma b_n \sum_n \hat{E}_{zn}^p$$

$$F_n^{TE} = -\frac{ik_y}{6u^2} \Delta\sigma b_n \sum_n \hat{E}_{xn}^p - \frac{i\omega\mu}{6u^2} \Delta\sigma c_n \sum_n \hat{E}_{zn}^p + \frac{\Delta\sigma A_e}{12} \begin{bmatrix} 2\hat{E}_{y1}^p + \hat{E}_{y2}^p + \hat{E}_{y3}^p \\ \hat{E}_{y1}^p + 2\hat{E}_{y2}^p + \hat{E}_{y3}^p \\ \hat{E}_{y1}^p + \hat{E}_{y2}^p + 2\hat{E}_{y3}^p \end{bmatrix}$$

As três primeiras expressões são utilizadas para montar uma matriz que depende da geometria do problema (matriz global), incluindo a forma como o domínio é discretizado. A primeira ( $K^{TM}$ ) representa o modo TM e a segunda ( $K^{TE}$ ) o modo TE. A terceira expressão ( $K^{AC}$ ) representa o acoplamento desses modos, já que no método MCSEM eles são solucionados concomitantemente.

As duas últimas expressões representam, respectivamente, o modo TM e o TE. Estas são utilizadas para montar um vetor que depende das características da fonte, por isso ele é chamado de vetor fonte.

Deste modo, tendo a matriz global e o vetor fonte, pode-se construir o seguinte sistema linear:

$$\begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} & G_{13} & G_{14} & \dots & G_{1(2n)} \\ G_{21} & G_{22} & G_{23} & G_{24} & \dots & G_{2(2n)} \\ G_{31} & G_{32} & G_{33} & G_{34} & \dots & G_{3(2n)} \\ G_{41} & G_{42} & G_{43} & G_{44} & \dots & G_{4(2n)} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ G_{(2n-1)1} & G_{(2n-1)2} & G_{(2n-1)3} & G_{(2n-1)4} & \dots & G_{(2n-1)(2n)} \\ G_{(2n)1} & G_{(2n)2} & G_{(2n)3} & G_{(2n)4} & \dots & G_{(2n)(2n)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{H}_{y1}^s \\ \hat{E}_{y1}^s \\ \hat{H}_{y2}^s \\ \hat{E}_{y2}^s \\ \vdots \\ \hat{H}_{y(n)}^s \\ \hat{E}_{y(n)}^s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \\ F_4 \\ \vdots \\ F_{2n-1} \\ F_{2n} \end{bmatrix}$$

A solução deste sistema é um vetor que fornece os valores aproximados das componentes  $E_y$  e  $H_y$ , a partir das quais é possível obter as outras componentes dos campos elétrico e magnético. Entretanto, encontrar tal solução não é uma tarefa fácil, normalmente esse processo exige muito da máquina onde os cálculos são realizados. Nesse trabalho, utiliza-se o método da eliminação gaussiana para resolver o sistema linear, principalmente pela facilidade de implementação dessa técnica.

## 4 C++ E A PROGRAMAÇÃO ORIENTADA A OBJETOS

A linguagem de programação C++ foi desenvolvida no início da década de 80 por Bjarne Stroustrup, que projetou esta para acrescentar ferramentas características da programação orientada a objetos (POO) na linguagem C (SAVITCH, 2004). Em relação a esta última, o C++ oferece recursos flexíveis e eficientes para definição de novos tipos, os quais podem ser definidos de acordo com a necessidade do programador.

O principal conceito de C++ é a classe (STROUSTUP, 2002), que pode ser definida como um conjunto de objetos semelhantes. Estes últimos, por sua vez, possuem funções próprias (funções-membro) que estão relacionadas com as particularidades dos mesmos. Por exemplo, pode-se criar uma classe chamada Geofísica, deste modo, os prováveis objetos dessa classe seriam os métodos sísmicos, potenciais, elétricos e potenciais, da mesma maneira uma provável função do objeto chamado Método Sísmico seria a migração.

Nota-se, portanto, que a classe é responsável por gerenciar os objetos e suas respectivas funções-membro. Além disso, elas possibilitam a ocultação de dados, conversão implícita de tipos padrões para novos tipos definidos pelo programador, tipagem dinâmica e mecanismos para sobrecarga de operadores.

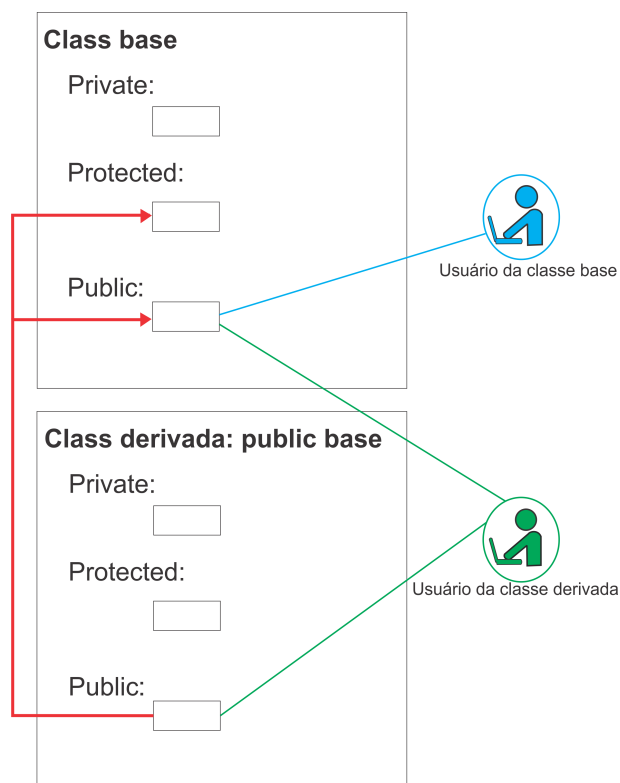
### 4.1 CARACTERÍSTICAS DA PROGRAMAÇÃO ORIENTADA A OBJETOS

A POO é uma abordagem de programação que visa representar, o mais semelhante possível, as situações reais através de sistemas computacionais. Nesse sentido, esse tipo de programação permite ao programador raciocinar e solucionar problemas em termos de objetos, os quais estão diretamente relacionados com entidades ou "coisas" reais. As principais características da POO são: encapsulamento, herança e polimorfismo.

**Encapsulamento:** consiste em ocultar do usuário informações que não são do interesse dele. Analisando dessa forma, o objeto atua como uma "caixa preta", realizando tarefas que não são do conhecimento de quem usa o programa.

**Herança:** é uma característica da POO relacionada com as hierarquias e com as relações entre objetos. Ela permite que uma classe derive da outra, a qual herda características e funções da classe que a originou (classe base). A figura a seguir facilita o entendimento da relação existente entre classe base e derivada, além de mostrar como isso influencia no acesso do usuário.

Figura 3 – Relação entre classe base e classe derivada



Fonte: Elaborado pelo autor

A figura mostra que a classe base tem acesso as funções e variáveis daquela que a originou, ou seja, ela herdou características da classe derivada. Por esse motivo o usuário da dessa classe (identificado pela cor verde) tem acesso, direto ou indireto, a sua base, o que não vale para o usuária da classe base (identificado pela cor azul). É interessante notar também, que tudo declarado como "private" não pode ser acessado por nenhum dos usuários, pois esses dados estão encapsulados.

Polimorfismo: é a característica que descreve a habilidade de um objeto se comportar como outro. Isso está relacionado com o conceito de herança, por exemplo, na figura 3 verifica-se que um objeto da classe derivada tem acesso a maioria dos objetos da classe base. Sendo assim, eles podem ter as mesmas características em termos de funcionalidade.

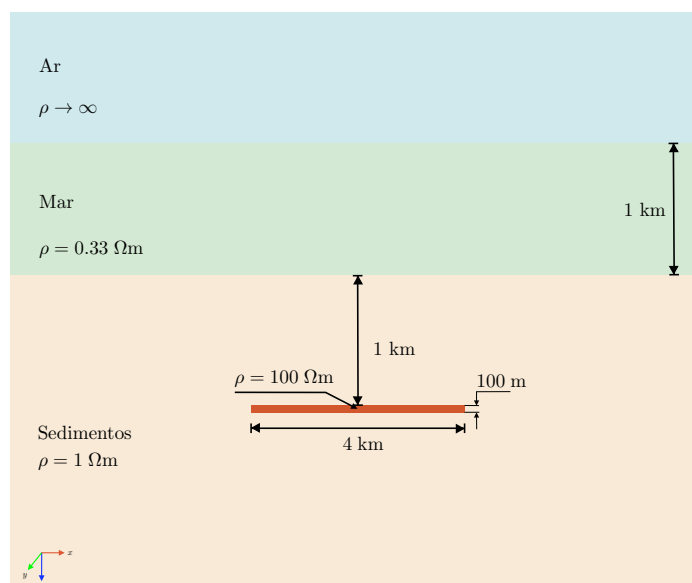
## 5 RESULTADOS

Este capítulo se subdivide em duas partes, a primeira objetiva validar o programa desenvolvido em c++ e a segunda tem por finalidade avaliar as respostas do MCSEM, com ênfase na detecção de corpos resistivos que representam reservatórios de hidrocarboneto. A validação será feita através da comparação entre os sinais gerados por dois programas, um escrito em c++, produzido nesse trabalho, e o outro escrito em FORTRAN, elaborado pelo professor Kerry Key da Universidade de Sandiego (Estados Unidos). A segunda parte será realizada com base na resposta produzida por alguns modelos.

### 5.1 VALIDAÇÃO DO PROGRAMA

Para validar o programa de modelagem 2.5-D do método MCSEM, utilizou-se o modelo simples ilustrado na Figura 4, que possui uma camada entre dois semi-espacos. O semi-espaco superior representa o ar, por esse motivo ele possui uma resistividade alta ( $10^{+12} \Omega.m$ ). A única camada possui 1 km de espessura, resistividade igual a  $0.33 \Omega.m$  e representa a lamina d'água. Por último, o semi-espaco inferior apresenta resistividade igual a  $1.0 \Omega.m$ . Além disso, esse modelo possui um corpo resistivo ( $100 \Omega.m$ ) fino de 4 km de comprimento e 100 m de espessura, o qual simula a presença de um reservatório.

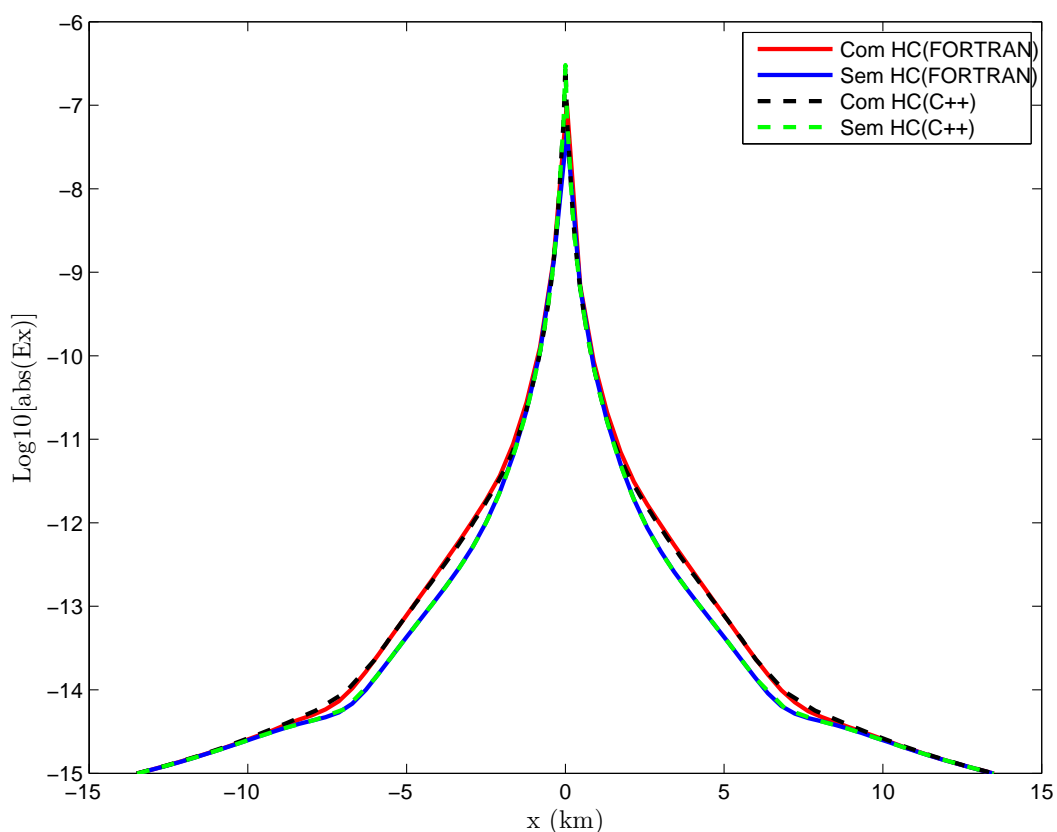
Figura 4 – Modelo para validação



Fonte: Elaborado pelo autor

As respostas obtidas utilizando o modelo acima, para a frequências 0.25 Hz com o DEH posicionado na coordenada (0 Km, 0.95 Km) , estão dispostas no gráfico a seguir:

Figura 5 – Comparação entre a resposta do FORTRAN com as geradas no C++



Fonte: Elaborado pelo autor

Analisando os sinais, constata-se que as curvas praticamente coincidem, tanto para o sinal com reservatório quanto para a resposta sem reservatório. Isso indica que o programa escrito em C++ está gerando respostas corretas.

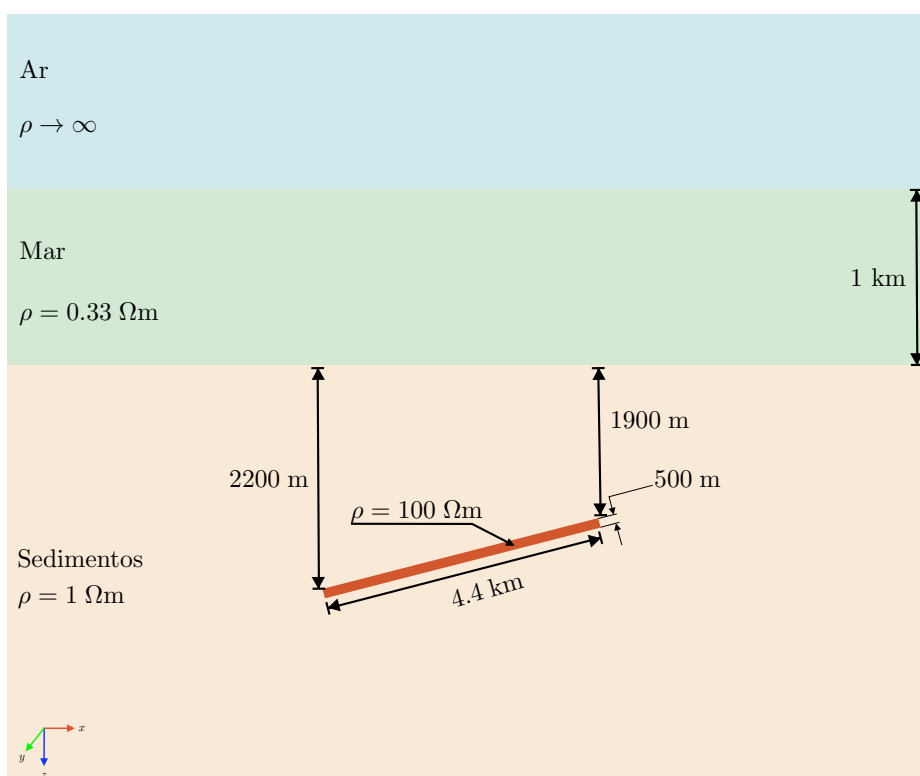
Além disso, as duas curvas que representam o sinal com hidrocarboneto mostram um aumento na amplitude, em relação aos sinais sem hidrocarboneto, na zona acima do corpo. Deste modo, foi verificado que o programa escrito em C++ fornece respostas corretas, não somente pela comparação com resultado do fortran, mas também pelo sinal coerente para um modelo com reservatório.

## 5.2 ANÁLISE DOS RESULTADOS

A análise do sinal gerado pela modelagem numérica do MCSEM será feita com base nas respostas de três modelos, que estão representados e descritos a seguir. Estes são semelhantes, pois todos apresentam uma camada limitada por dois semi-espacos e também possuem um corpo com resistividade cem vezes maior que o meio encaixante. Entretanto, eles se diferem pela forma como a heterogeneidade está distribuída no plano  $xz$ . O objetivo disto é avaliar como a geometria do reservatório influencia na resposta do método MCSEM, de modo que esse estudo será realizado para quatro frequências (0.125 Hz, 0.25 Hz, 0.5 Hz e 1.0 Hz).

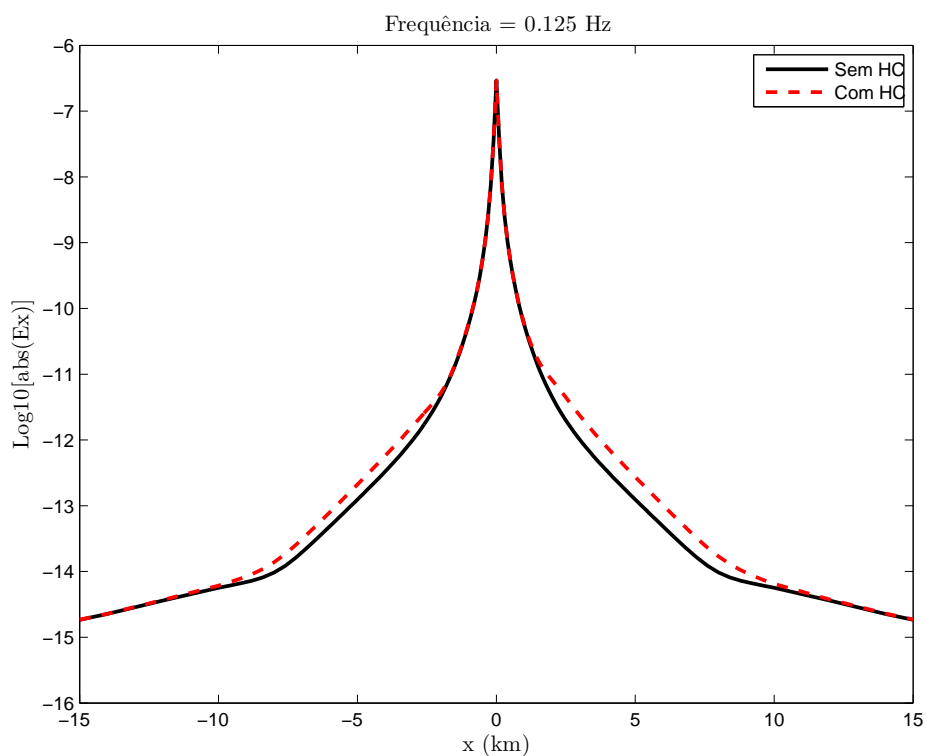
O primeiro modelo utilizado nesse estudo está ilustrado na figura 6, nele a heterogeneidade possui 4.4 km de extensão, 500 m de espessura e está inclinada, de tal forma que o ponto mais alto dela está situado no lado direito do modelo.

Figura 6 – Primeiro modelo



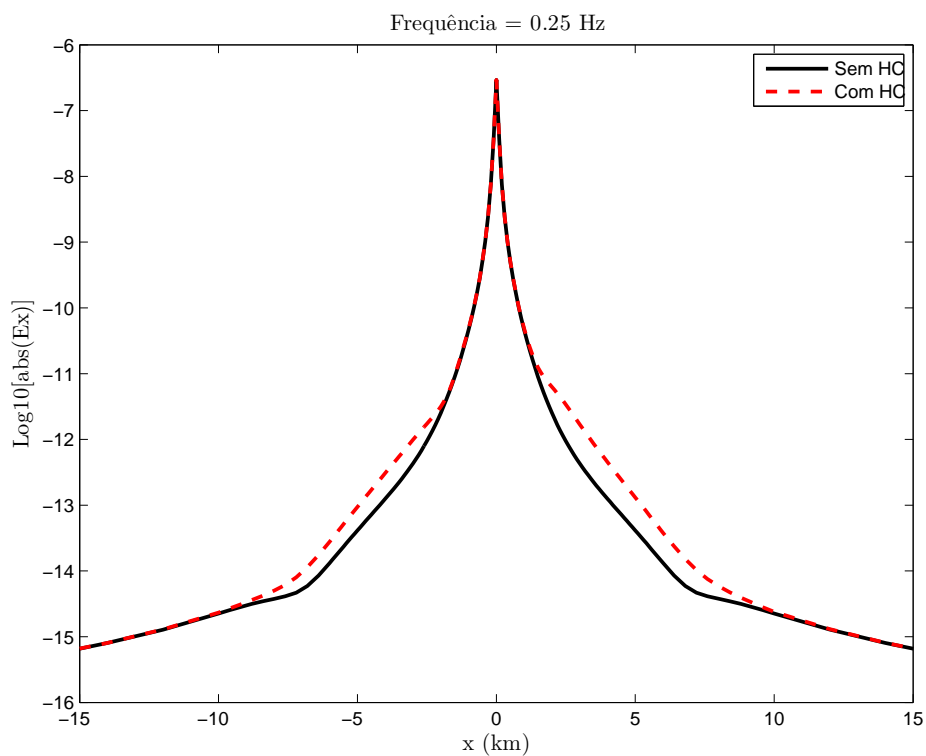
Os sinais obtidos para esse modelo estão dispostos nos gráficos a seguir, onde as linhas pretas representam a resposta sem a presença do reservatório e a curva vermelha tracejada mostra o sinal com a presença de hidrocarboneto (HC).

Figura 7 – Primeiro modelo- Frequência: 0.125 Hz



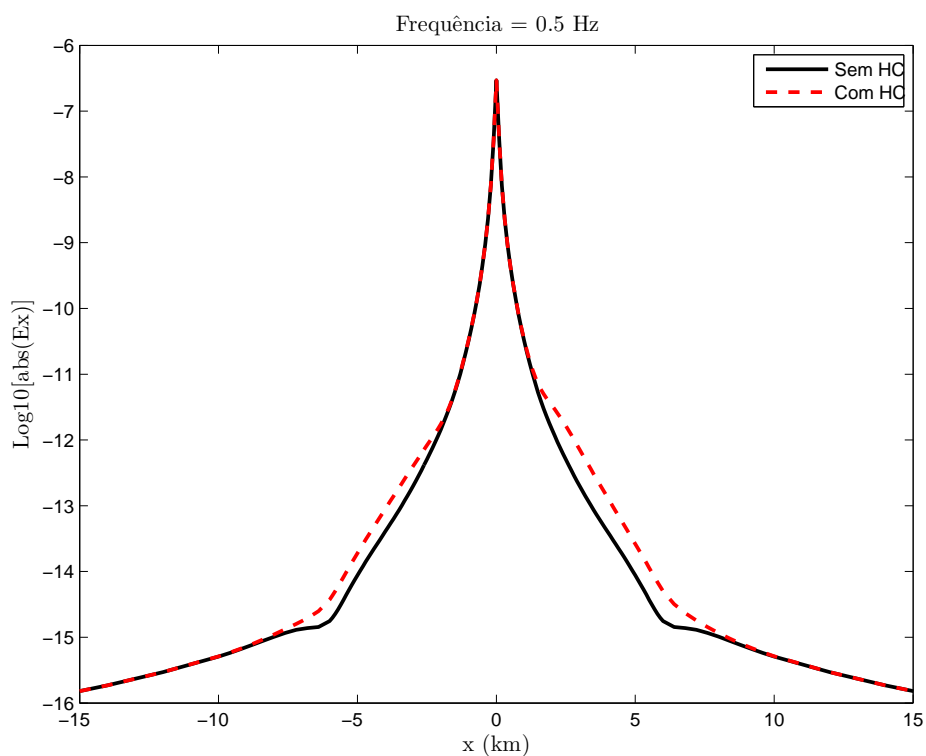
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 8 – Primeiro modelo- Frequência: 0.25 Hz



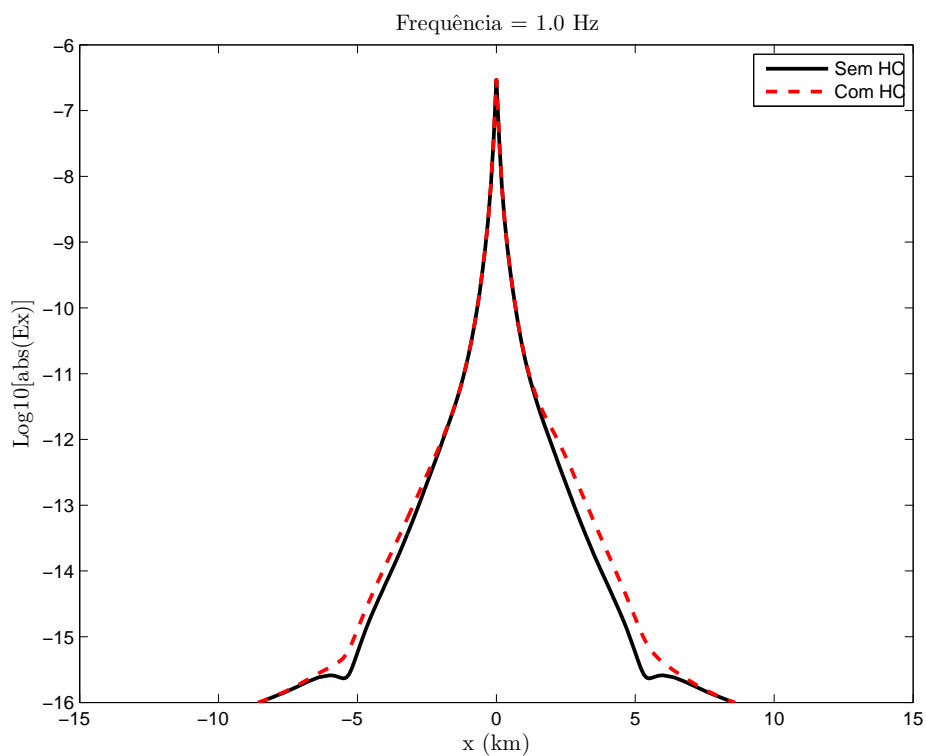
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 9 – Primeiro modelo- Frequência: 0.5 Hz



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 10 – Primeiro modelo- Frequência: 1.0 Hz



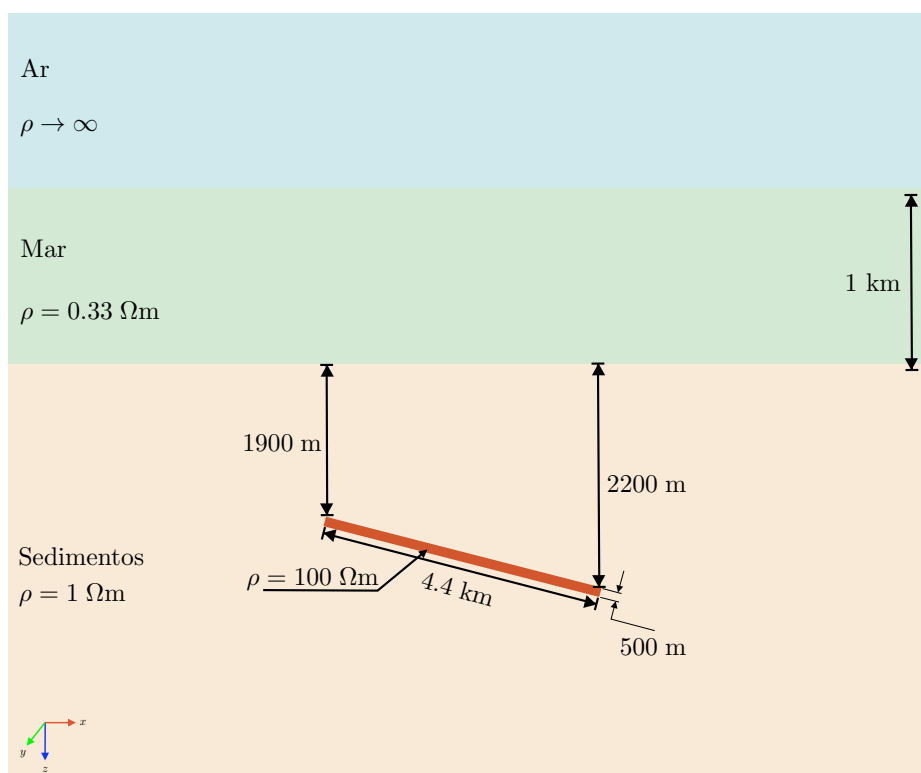
Fonte: Elaborado pelo autor

A partir da análise dos gráficos acima se nota que o sinal apresenta seu ponto máximo em  $x = 0$ , onde a curva se aproxima de  $10^{-6}$  para todas as frequências. Isto se deve à presença do dipolo neste ponto, o que também explica porque o sinal decai bastante para os pontos mais afastados desse local.

Entretanto, o fato mais importante verificado nos gráfico é a diferença que existe entre a resposta com hidrocarboneto e a sem hidrocarboneto, pois a primeira apresenta amplitude maior na região acima do corpo. Além disso, nota-se que o lado direito do campo total está mais alto, mostrando que o método é sensível à inclinação do corpo.

O próximo modelo que será estudado possui as mesmas características do anterior, com uma única diferença, a inclinação. Este está representado na figura ( 7), onde constata-se o reservatório inclinado, de tal forma que a parte mais próxima da superfície está localizada no lado esquerdo do modelo.

Figura 11 – Segundo Modelo

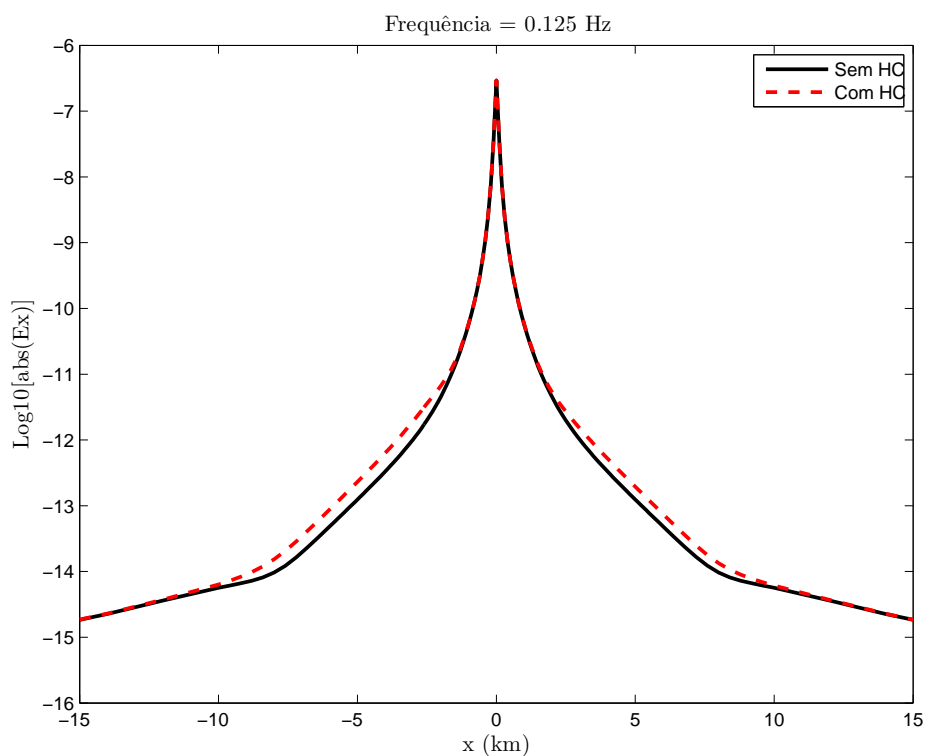


Fonte: Elaborado pelo autor

Essa mudança de inclinação é proposital, pois isso permitirá avaliar se o mesmo efeito que ocorreu nos quatro gráficos anteriores ocorrerá nos próximos. Entretanto, dessa vez se espera que o modulo do campo total seja maior do lado esquerdo da curva, em virtude da mudança na inclinação.

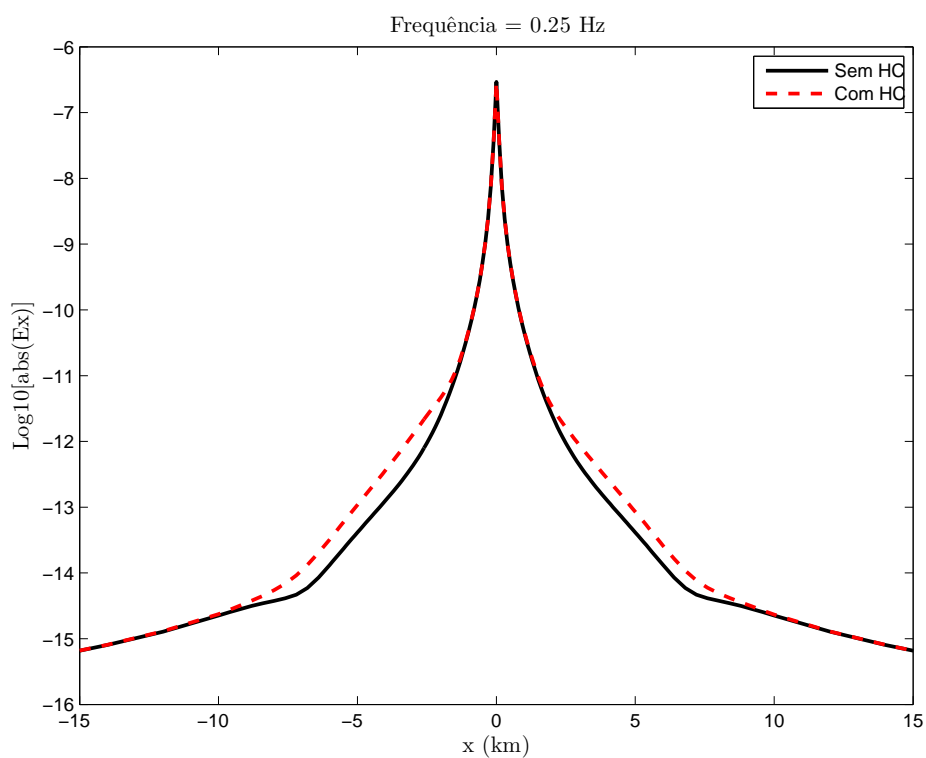
As soluções calculadas para este modelo estão nos quatros gráficos a seguir.

Figura 12 – Segundo modelo- Frequência: 0.125 Hz



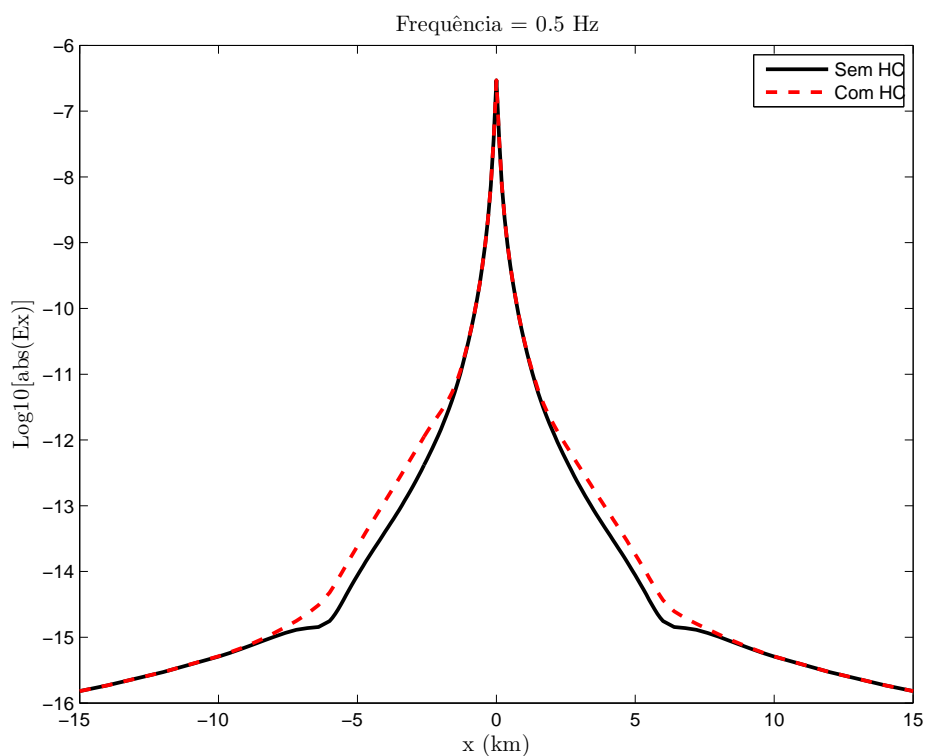
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 13 – Segundo modelo- Frequência: 0.25 Hz



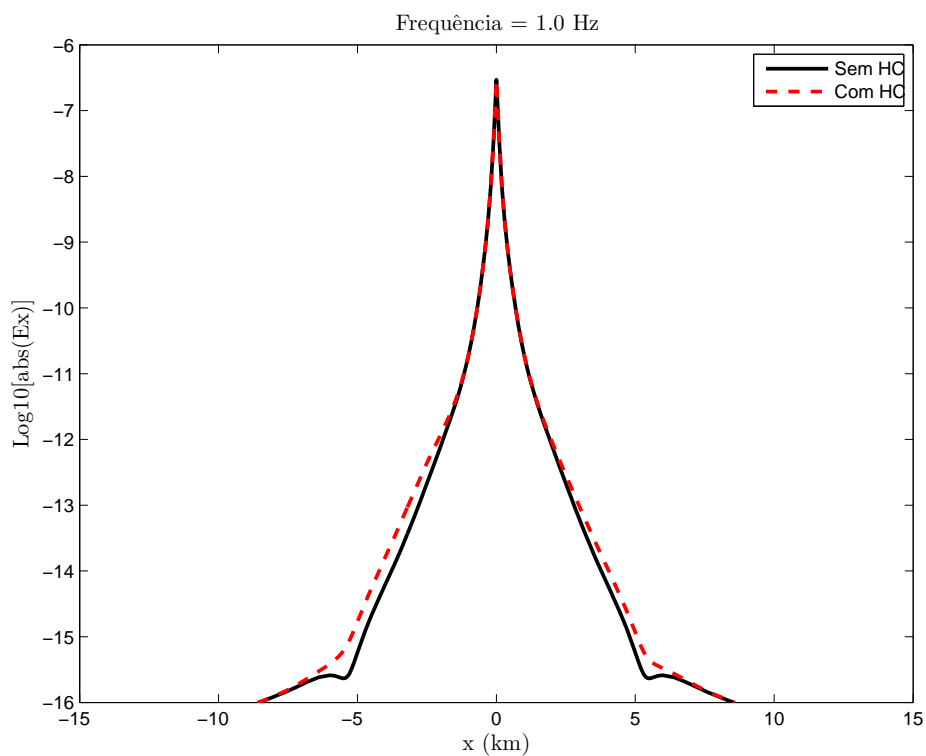
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 14 – Segundo modelo- Frequência: 0.5 Hz



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 15 – Segundo modelo- Frequência: 1.0 Hz



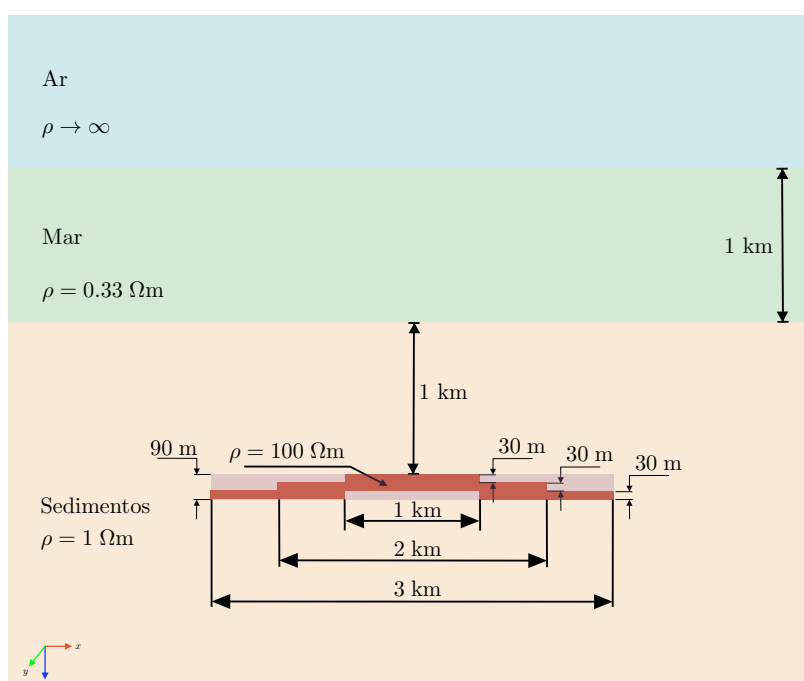
Fonte: Elaborado pelo autor

Analisando as respostas calculadas, percebe-se que a amplitude do sinal passou a ser maior no lado esquerdo do modelo, como já era esperado. Isso ocorreu porque nesse lado o reservatório está mais próximo da superfície. Outro fato, também muito importante, pode ser visto nas respostas referentes aos dois últimos modelos: a variação do sinal com a mudança da frequência.

Agora será feito o estudo em conjunto de dois modelos. Um deles contém um corpo retangular e outro apresenta uma heterogeneidade com formato que se aproxima de um anticlinal. A finalidade deste teste é verificar se as duas respostas serão muito distantes, já que a posição dos corpos resistivos é, praticamente, a mesma.

Isso pode ser melhor compreendido através da figura 8, onde os dois corpos estão ilustrados na mesma figura. Percebe-se que o anticlinal possui 3 km de comprimento e seu topo está a 200 m abaixo do nível do mar. O corpo retangular possui 3 km de comprimento e 90 m de espessura.

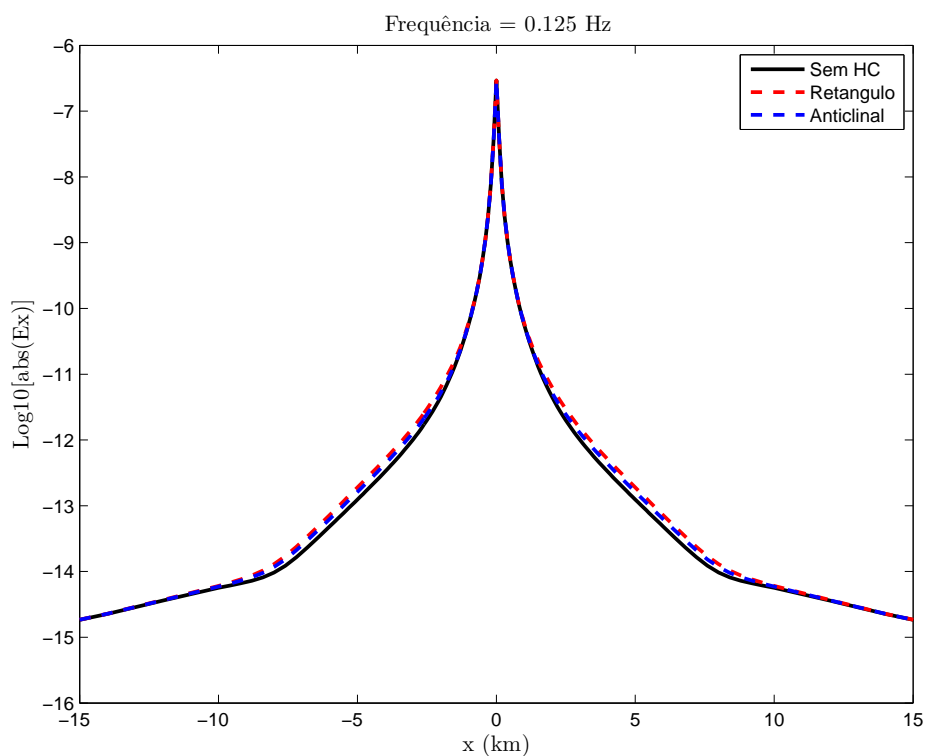
Figura 16 – Modelo com heterogeneidade retangular e anticlinal



Fonte: Elaborado pelo autor

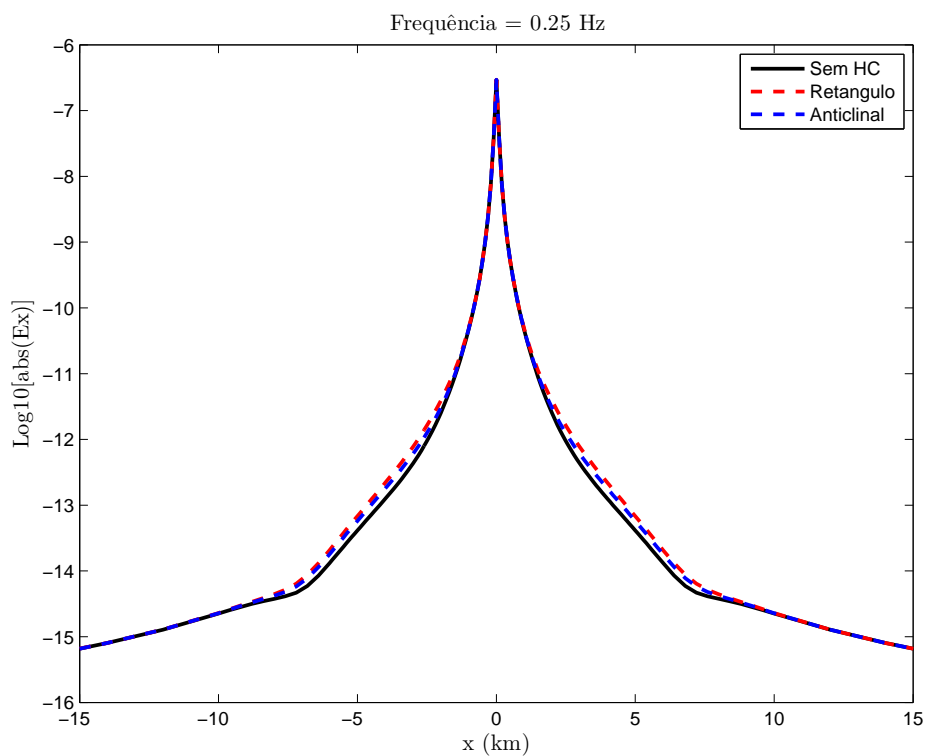
Os sinais obtidos para as duas heterogeneidades estão dispostos nos próximos gráficos, nos quais a curva de cor preta representa o sinal para o meio sem hidrocarboneto, a curva tracejada azul mostra o sinal para o modelo com anticlinal e a curva tracejada vermelha representa o sinal para o modelo com o corpo retangular.

Figura 17 – Terceiro modelo- Frequência: 0.125 Hz



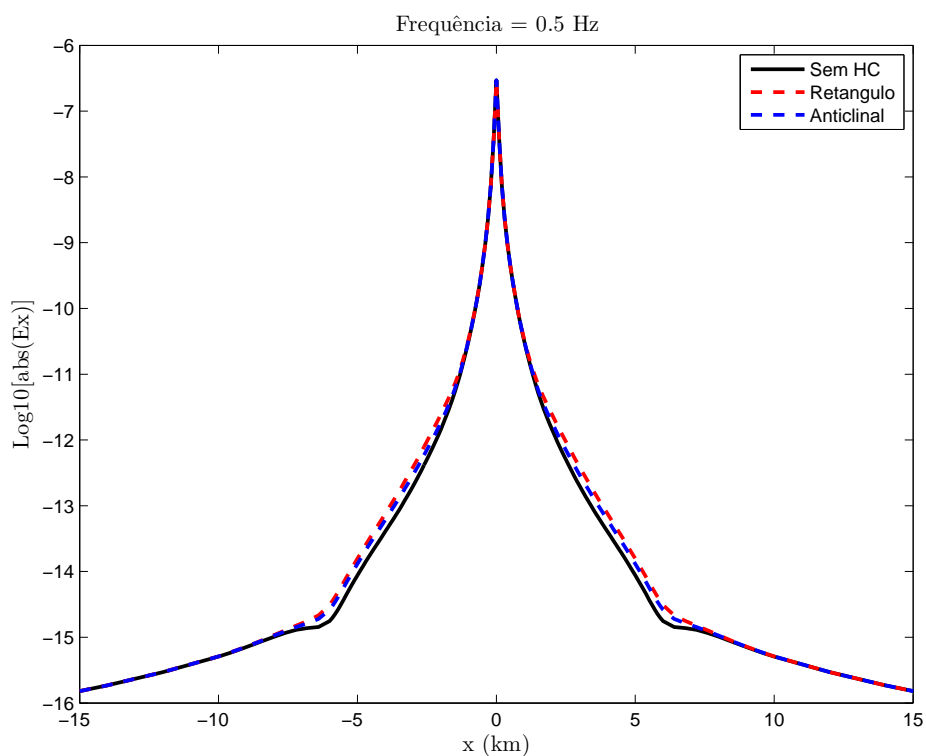
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 18 – Terceiro modelo- Frequência: 0.25 Hz



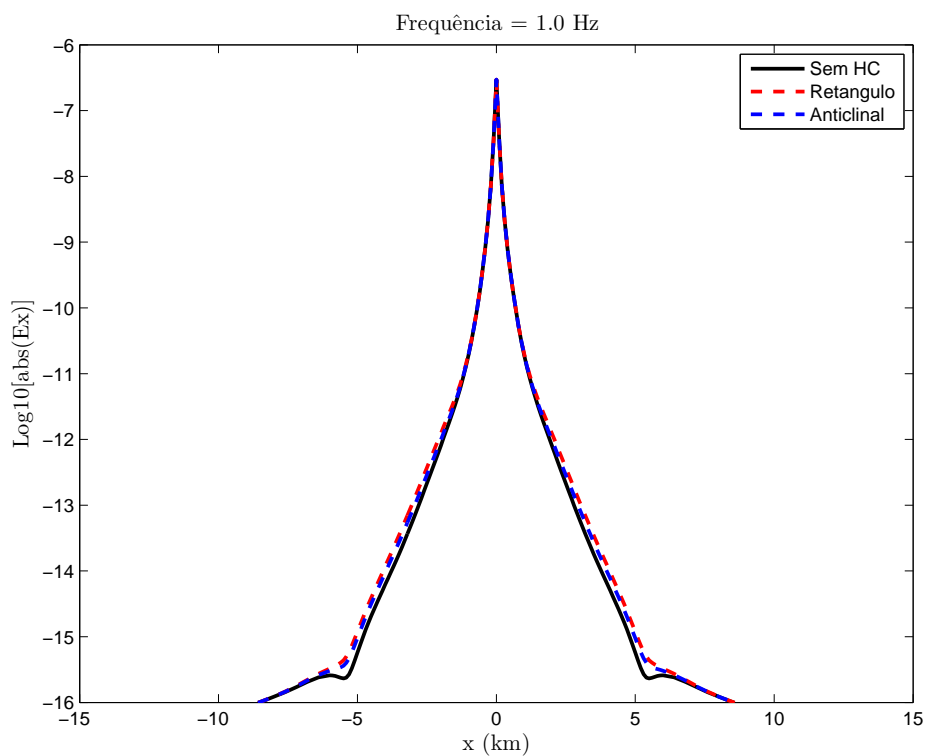
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 19 – Terceiro modelo- Frequência: 0.5 Hz



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 20 – Terceiro modelo- Frequência: 1.0 Hz



Fonte: Elaborado pelo autor

Avaliando os gráficos acima, nota-se que os sinais para o modelo com o corpo retangular se aproxima bastante das respostas para o modelo com anticlinal. Entretanto, para todas as frequências a amplitude do primeiro é maior que o segundo. Isto indica que o método apresentou, mesmo que pouca, sensibilidade para detectar a diferença entre as heterogeneidades. É importante notar que o fato das curvas estarem próximas não representa um grande problema, pois o mais importante é identificar a presença do corpo.

## 6 CONCLUSÕES

Esse trabalho avaliou o desempenho da linguagem de programação C++ na modelagem numérica do MCSEM 2.5-D e realizou estudos sobre o comportamento deste método. Isso foi feito através da construção de programas, fundamentados na orientação à objetos, e também com a análise dos resultados obtidos.

Com relação ao C++, os resultados foram satisfatórios, uma vez que ele apresentou praticamente a mesma resposta de um programa escrito em FORTRAN, o qual já é bastante aplicado na geofísica. Isto mostra que o C++ pode ser utilizado nos problemas de modelagem dos métodos eletromagnéticos, o que facilita a implementação em ambientes gráficos, já que esta linguagem é bastante versátil nesse tipo de aplicação.

Em se tratando do MCSEM, as respostas mostraram que esse método é sensível a presença de corpos resistivos, pois em todos os modelos a resposta para o meio com hidrocarboneto se diferiu, mesmo que pouco, do sinal sem a presença hidrocarbonetos. Esse fato explica o interesse do setor petrolífero no aprimoramento deste método, já que este pode ser uma boa ferramenta de auxílio na detecção de reservatórios de petróleo.

## REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, F. L. de; RIJO, L. Modelagens direta e inversa de dados mCSEM 3D. *Revista Brasileira de Geofísica*, scielo, v. 29, p. 289 – 308, 06 2011. ISSN 0102-261X. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0102-261X2011000200007&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0102-261X2011000200007&nrm=iso)>. Acesso em: 12 ago. 2014.
- BECKER, E. B.; CAREY, G. F.; ODEN, J. T. *Finite elements - an introduction*. New Jersey: Prentice-Hall, 1981. 258 p.
- CONSTABLE, S.; SRNKA, L. J. An introduction to marine controlled-source electromagnetic methods for hydrocarbon exploration. *Geophysics*, v. 72, n. 2, p. WA3–WA12, 2007. Disponível em: <<http://geophysics.geoscienceworld.org/content/72/2/WA3.abstract>>. Acesso em: 17 set. 2014.
- COX, C. S. On the electrical conductivity of the oceanic lithosphere. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, v. 25, n. 3, p. 196 – 201, 1981.
- EIDESMO, T. et al. Sea bed logging (sbl), a new method for remote and direct identification of hydrocarbon filled layers in deepwater areas. *First Break*, v. 20, n. 3, p. 144–152, Março 2002.
- LUZ, E. da C. *Modelagem Unidimensional de Dados MCSEM 3D com Variação na Resistividade da Água do mar e na Orientação dos Sensor*. 2007. Dissertação (Mestrado em Geofísica) - Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 2007.
- RIJO, L. *Respostas Eletromagnéticas de Dimensões 2.5 e 3.5 D*. [S.l.], 1996. Dissertação Apresentada ao Concurso de Professor Titular do Departamento de Geofísica do Centro de Geociências- Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 1996.
- SAVITCH, W. *C++ Absoluto*. São Paulo: Pearson Addison Wesley, 2004.
- SILVA, H. F. da. *Modelagem Numérica de Dados MCSEM 2.5-D*. 2012. Dissertação (Mestrado em Geofísica) - Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 2012.
- STROUSTUP, B. *A linguagem de Programação C++*. 3. ed. Porto Alegre - Brasil: Bookman, 2002.
- THIRUD, A. P. Waves of information. *Scandinavian Oil-Gas*, n. 3/4, 2002.
- UM, E. S.; ALUMBAUGH, D. L. On the physics of the marine controlled-source electromagnetic method. *Geophysics*, v. 72, n. 2, p. WA13–WA26, 2007. Disponível em: <<http://geophysics.geoscienceworld.org/content/72/2/WA13.abstract>>. Acesso em: 02 nov. 2014.