



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
FACULDADE DE GEOFÍSICA

JÉSSICA LARISSA DA SILVA PINHEIRO

**INFLUÊNCIA DA BATIMETRIA EM DADOS MCSEM  
*INLINE 3D***

BELÉM  
2017

JÉSSICA LARISSA DA SILVA PINHEIRO

**INFLUÊNCIA DA BATIMETRIA EM DADOS MCSEM  
*INLINE 3D***

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado a 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. Dr. Marcos Welby Correa Silva

BELÉM  
2017

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

---

Pinheiro, Jéssica Larissa da Silva, 1996-  
Influência da batimetria em dados MCSEM *inline* 3D / Jéssica  
Larissa da Silva Pinheiro. – 2017.  
41 f. : il. ; 30 cm

Inclui bibliografias

Orientador: Marcos Welby Correa Silva

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade  
Federal do Pará, Instituto de Geociências, Faculdade de Geofísica,  
Belém, 2017.

1. Prospecção - Métodos geofísicos. 2. Topografia  
submarina. 3. Método dos elementos finitos. 4. Modelagem  
tridimensional. I. Título.

---

CDD 22. ed.: 622.15

JÉSSICA LARISSA DA SILVA PINHEIRO

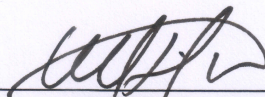
INFLUÊNCIA DA BATIMETRIA EM DADOS MCSEM 3D

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.

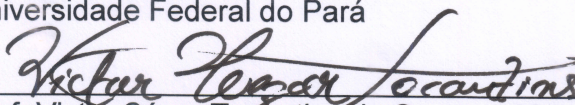
Data da defesa: 27 de março de 2017.

Conceito: Exc

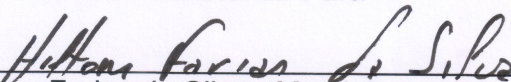
Banca Examinadora:



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



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



Hilton Farias da Silva - Membro  
Mestre em Geofísica  
Universidade Federal do Pará

Aos amores da minha vida:  
Deus que até aqui tem me ajudado;  
meu pai Pinheiro (*in memoriam*) amoroso e cuidador;  
minha mãe Glauci sábia, guerreira e companheira;  
minha irmã Jackline sensível e amiga.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus que se faz presente em todos os momentos da minha vida me abençoando e fortalecendo ao longo dos meus anos colocando pessoas maravilhosas na minha jornada, pessoas que eu terei a honra de levar para sempre em meu coração.

Agradeço também a minha mãe, Glaucirene, que é uma mulher extremamente sábia e amorosa, que sempre me apoiou nas minhas escolhas, pelo suporte financeiro e emocional, pelos conselhos e advertências que continuam me ensinando bastante. "A mulher sábia edifica a sua casa;" (Provérbios 14:1).

Ao meu pai, Sebastião Pinheiro, que mesmo tendo partido tão novo, me deixou valiosas lições sobre família, união, respeito e carinho.

A minha irmã, Jackline, por todos os momentos de felicidade, companheirismo e infinitas gargalhadas, por me fazer feliz quando eu estava triste.

Agradeço as pessoas maravilhosas que Deus colocou em minha vida e que hoje tenho o prazer de chamar de amigos: A minha amiga de colégio, Yasmim Pereira, por toda a palavra amiga quando eu precisei e aos amigos de faculdade Nelson Filho, Tarciana Farias, Karolina Correia, Daniele Pantoja, René Jacob e Vinicius Alexandre, por toda ajuda acadêmica e amparo emocional durante o curso.

Ao meu orientador Prof. Dr. Marcos Welby por todo o aprendizado, não só acadêmico, por toda paciência ao longo desses anos, por todas as palavras de incentivo que são de grande impacto na minha vida.

Ao corpo docente e aos funcionários da Faculdade de Geofísica, em especial à Maria do Socorro Santos Silva, por todo o conhecimento e suporte acadêmico.

Agradeço também aos amigos do grupo de pesquisa de métodos eletromagnéticos.

Ao suporte dado pela bolsa de pesquisa do projeto "Inversão tridimensional de dados MT e MCSEM *inline* e *broadside*", termo de cooperação Petrobras/UFPA/Fadsp e pelo programa de Pós-Graduação em Geofísica da UFPA pela infraestrutura computacional.

Agradeço por fim a todas as pessoas que não foram citadas, mas foram de grande importância nesta etapa da minha carreira profissional.

## RESUMO

O Marine Controlled Source Eletromagnetic (MCSEM) é um método geofísico que vem crescendo e ocupando seu espaço na indústria do petróleo por ser um indicador da presença de hidrocarboneto. Por conta disso, se faz necessário o seu aprimoramento como ferramenta de interpretação através de pesquisas relacionadas à modelagem e inversão. Nesse aspecto, a influência da batimetria é um dos pontos que precisa de atenção, pois o efeito que ela causa no dado MCSEM pode mascarar a presença de corpos resistivos que podem estar relacionados a reservatórios ou indicar falsos positivos e levar interpretações equivocadas. Neste trabalho, utilizamos o método de elementos finitos 3D nodais para modelar respostas do método MCSEM na presença de variação de batimetria. As malhas de elementos finitos foram confeccionadas com o software Tetgen e escolhemos dois modelos de batimetria. Um modelo descreve uma elevações do assoalho oceânico e outro representa uma depressão no mesmo. Analisamos a amplitude e a fase do campo elétrico inline para modelos com e sem a batimetria e analisamos também o efeito da presença do reservatório nessas situações. Observamos as influências também para diferentes frequências. Outro aspecto que deve ser mencionado é a resposta MCSEM 3D para situações sem a presença das ondas aéreas nos dados, aqui representados por modelos com 10 km de lâmina d'água. Estes modelos, por separar a influência do ar, apesar de irrealistas, nos dão uma melhor dimensão dos efeitos que queremos estudar.

Palavras-chave: MCSEM. Batimetria. Elementos finitos. Modelagem 3D.

## ABSTRACT

The Marine Controlled Electromagnetic Source (MCSEM) is a geophysical method that has been occupying its space in the oil industry as an indicator of the presence of hydrocarbons. Because of this, it is necessary to improve it as an interpretation tool through research related to modeling and inversion. In this aspect, the influence of bathymetry is one of the points that needs attention, since the effect it causes in the MCSEM data can mask the presence of resistive bodies that may be related to reservoirs or indicate false positives and lead to misinterpretations. In this work, we used the 3D nodal finite element method to model MCSEM responses in the presence of bathymetry. Finite element meshes were made using Tetgen software and we chose two models of bathymetry. The first one describes an elevation of the ocean floor and the another one represents a depression in it. We analyzed the amplitude and phase of the electrical inline field for both models with and without bathymetry and also analyzed the effect of the reservoir's presence in these situations. We also observe the influences for different frequencies. Another aspect that should be mentioned is the MCSEM 3D response for situations without the air waves in the data, represented here by models with 10 km of water depth. These models, by separating the influence of the air, although unrealistic, give us a better dimension of the effects that we want to study.

Keywords: MCSEM. Bathymetry. Finite Elements. 3D Modeling.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 – Representação da aquisição de dados MCSEM. ....	16
Figura 2.2 – Representação de uma malha com elevação de elementos finitos gerada pelo software Tetgen. ....	19
Figura 2.3 – Representação da elevação no assoalho oceânico por elementos finitos gerados pelo software Tetgen. ....	19
Figura 3.1 – Modelo geoeletrico 3D que representa uma elevação utilizado nos experimentos. (a) Seção transversal x-z; (b) seção transversal y-z; (c) seção transversal x-y da elevação; (d) seção transversal x-y do reservatório. ...	22
Figura 3.2 – Amplitude dos campos elétricos para um modelo com batimetria (vermelho) e sem a batimetria (azul) e lâmina d'água de 10 km e transmissor em -12 km nas frequências de (a) 0.25 Hz, (b) 0.50 Hz, (c) 0.75 Hz e (d) 1 Hz. ..	23
Figura 3.3 – Fase dos campos elétricos para um modelo com batimetria (magenta) e sem a batimetria (azul) e lâmina d'água de 10 km e transmissor em -12 km nas frequências de (a) 0.25 Hz, (b) 0.50 Hz, (c) 0.75 Hz e (d) 1 Hz. ....	24
Figura 3.4 – Amplitude dos campos elétricos para um modelo com batimetria (vermelho) e sem a batimetria (azul) e lâmina d'água de 10 km e transmissor em 0 km nas frequências de (a) 0.25 Hz, (b) 0.50 Hz, (c) 0.75 Hz e (d) 1 Hz. ....	24
Figura 3.5 – Fase dos campos elétricos para um modelo com batimetria (magenta) e sem a batimetria (azul) e lâmina d'água de 10 km e transmissor em 0 km nas frequências de (a) 0.25 Hz, (b) 0.50 Hz, (c) 0.75 Hz e (d) 1 Hz. ....	25
Figura 3.6 – (a) Amplitude e (b) fase do campo elétrico para lâmina d'água de 1,5 km, transmissor em -12 km e frequências de 0,25, 0,50, 0,75 e 1,0 Hz. ....	26
Figura 3.7 – (a) Amplitude e (b) fase do campo elétrico para lâmina d'água de 1,5 km e transmissor em -4 km e frequências de 0,25, 0,50, 0,75 e 1,0 Hz. ....	26
Figura 3.8 – (a) Amplitude e (b) fase do campo elétrico para lâmina d'água de 1,5 km e transmissor em 0 km e frequências de 0,25, 0,50, 0,75 e 1,0 Hz. ....	26
Figura 3.9 – (a) Amplitude e (b) fase do campo elétrico para lâmina d'água de 10 km, transmissor em -12 km e frequências de 0,25, 0,50, 0,75 e 1,0 Hz. ....	27
Figura 3.10 – (a) Amplitude e (b) fase do campo elétrico para lâmina d'água de 10 km, transmissor em -4 km e frequências de 0,25, 0,50, 0,75 e 1,0 Hz. ....	27
Figura 3.11 – (a) Amplitude e (b) fase do campo elétrico para lâmina d'água de 10 km, transmissor em 0 km e frequências de 0,25, 0,50, 0,75 e 1,0 Hz. ....	28
Figura 3.12 – Amplitude dos campos elétricos para os casos 1-D (preto), e para o reservatório com (magenta) e sem (azul) a batimetria para lâmina d'água	

de 10 km e transmissor em -12 km nas frequências de (a) 0.25 Hz, (b) 0.50 Hz, (c) 0.75 Hz e (d) 1 Hz. ....	29
Figura 3.13 – Fase dos campos elétricos para os casos 1-D (preto), e para o reservatório com (magenta) e sem (azul) a batimetria para lâmina d’água de 10 km e transmissor em -12 km nas frequências de (a) 0.25 Hz, (b) 0.50 Hz, (c) 0.75 Hz e (d) 1 Hz. ....	29
Figura 3.14 – Amplitude dos campos elétricos para os casos 1-D (preto), e para o reservatório com (magenta) e sem (azul) a batimetria para lâmina d’água de 10 km e transmissor em 0 km nas frequências de (a) 0.25 Hz, (b) 0.50 Hz, (c) 0.75 Hz e (d) 1 Hz. ....	30
Figura 3.15 – Fase dos campos elétricos para os casos 1-D (preto), e para o reservatório com (magenta) e sem (azul) a batimetria para lâmina d’água de 10 km e transmissor em 0 km nas frequências de (a) 0.25 Hz, (b) 0.50 Hz, (c) 0.75 Hz e (d) 1 Hz. ....	30
Figura 3.16 – Modelo geoeletrico 3D que representa uma depressão utilizado nos experimentos. (a) Seção transversal x-z; (b) seção transversal y-z; (c) seção transversal x-y da elevação; (d) seção transversal x-y do reservatório. ...	31
Figura 3.17 – Amplitude dos campos elétricos para um modelo com a depressão (vermelho) e sem a depressão (azul) e lâmina d’água de 10 km e transmissor em -12 km nas frequências de (a) 0.25 Hz, (b) 0.50 Hz, (c) 0.75 Hz e (d) 1 Hz. ....	33
Figura 3.18 – Fase dos campos elétricos para um modelo com depressão (vermelho) e sem a depressão (azul) e lâmina d’água de 10 km e transmissor em -12 km nas frequências de (a) 0.25 Hz, (b) 0.50 Hz, (c) 0.75 Hz e (d) 1 Hz. ....	33
Figura 3.19 – Amplitude dos campos elétricos para um modelo com depressão (vermelho) e sem a depressão (azul) e lâmina d’água de 10 km e transmissor em 0 km nas frequências de (a) 0.25 Hz, (b) 0.50 Hz, (c) 0.75 Hz e (d) 1 Hz. ....	34
Figura 3.20 – Fase dos campos elétricos para um modelo com depressão (vermelho) e sem a depressão (azul) e lâmina d’água de 10 km e transmissor em 0 km nas frequências de (a) 0.25 Hz, (b) 0.50 Hz, (c) 0.75 Hz e (d) 1 Hz. ....	34
Figura 3.21 – (a) Amplitude e (b) fase do campo elétrico para lâmina d’água de 1,5 km, transmissor em -12 km e frequências de 0,25, 0,50, 0,75 e 1,0 Hz. ....	35
Figura 3.22 – (a) Amplitude e (b) fase do campo elétrico para lâmina d’água de 1,5 km e transmissor em -4 km e frequências de 0,25, 0,50, 0,75 e 1,0 Hz. ....	35
Figura 3.23 – (a) Amplitude e (b) fase do campo elétrico para lâmina d’água de 1,5 km e transmissor em 0 km e frequências de 0,25, 0,50, 0,75 e 1,0 Hz. ....	36
Figura 3.24 – (a) Amplitude e (b) fase do campo elétrico para lâmina d’água de 10 km, transmissor em -12 km e frequências de 0,25, 0,50, 0,75 e 1,0 Hz. ....	36
Figura 3.25 – (a) Amplitude e (b) fase do campo elétrico para lâmina d’água de 10 km, transmissor em -4 km e frequências de 0,25, 0,50, 0,75 e 1,0 Hz. ....	37
Figura 3.26 – (a) Amplitude e (b) fase do campo elétrico para lâmina d’água de 10 km,	

	transmissor em 0 km e frequências de 0,25, 0,50, 0,75 e 1,0 Hz. ....	37
Figura 3.27	–Amplitude dos campos elétricos para os casos 1-D (preto), e para o reservatório com (vermelho) e sem (azul) a batimetria para lâmina d’água de 10 km e transmissor em -12 km nas frequências de (a) 0.25 Hz, (b) 0.50 Hz, (c) 0.75 Hz e (d) 1 Hz. ....	38
Figura 3.28	–Fase dos campos elétricos para os casos 1-D (preto), e para o reservatório com (vermelho) e sem (azul) a batimetria para lâmina d’água de 10 km e transmissor em -12 km nas frequências de (a) 0.25 Hz, (b) 0.50 Hz, (c) 0.75 Hz e (d) 1 Hz. ....	39
Figura 3.29	–Amplitude dos campos elétricos para os casos 1-D (preto), e para o reservatório com (magenta) e sem (azul) a batimetria para lâmina d’água de 10 km e transmissor em 0 km nas frequências de (a) 0.25 Hz, (b) 0.50 Hz, (c) 0.75 Hz e (d) 1 Hz. ....	39
Figura 3.30	–Fase dos campos elétricos para os casos 1-D (preto), e para o reservatório com (magenta) e sem (azul) a batimetria para lâmina d’água de 10 km e transmissor em 0 km nas frequências de (a) 0.25 Hz, (b) 0.50 Hz, (c) 0.75 Hz e (d) 1 Hz. ....	40

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	13
<b>1.1</b>	<b>Motivação</b>	13
<b>1.2</b>	<b>Trabalhos Anteriores</b>	13
<b>1.3</b>	<b>Objetivos</b>	14
<b>2</b>	<b>METODOLOGIA</b>	15
<b>2.1</b>	<b>MCSEM</b>	15
<b>2.2</b>	<b>Elementos Finitos 3D</b>	18
<b>2.3</b>	<b>Solução do Sistema</b>	20
<b>3</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	21
<b>3.1</b>	<b>Modelo 1</b>	21
3.1.1	Efeito da batimetria	22
3.1.2	Variação da frequência	25
3.1.3	Efeito do reservatório na presença da batimetria	28
<b>3.2</b>	<b>Modelo 2</b>	31
3.2.1	Efeito da batimetria	32
3.2.2	Variação da frequência	35
3.2.3	Efeito do reservatório na presença da batimetria	37
<b>4</b>	<b>CONCLUSÕES</b>	41
	<b>REFERÊNCIAS</b>	42

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Motivação

O método eletromagnético marinho de fonte controlada (MCSEM, em inglês) foi formulado inicialmente para auxiliar no estudo da litosfera oceânica rasa e na identificação de minas marinhas (CONSTABLE; SRNKA, 2007; EIDESMO et al., 2002).

Posteriormente, a partir dos anos 2000 foi descoberto o potencial do método MCSEM na detecção e mapeamento de corpos resistivos offshore e a partir daí foi moldado para a exploração de hidrocarbonetos. Desde então, a aplicação do método pela indústria tem crescido bastante, acompanhado pelo desenvolvimento teórico de modelagem e inversão no meio acadêmico e na indústria (STRACK, 2012; EIDESMO et al., 2002).

Um grande proveito tirado da característica do método em detectar corpos resistivos é o incremento de informação na interpretação sísmica (UM; ALUMBAUGH, 2007). Esta característica permite ao interprete diferenciar estruturas com potencial de reservatório de hidrocarboneto daquelas com resistividade comparáveis a resistividade do sedimento, oferecendo uma diminuição do risco exploratório (CONSTABLE; SRNKA, 2007).

Por muito tempo, o efeito de pequenas variações da batimetria nos dados MCSEM era considerado como uma fonte de ruído que não representava relevância na interpretação dos dados (REIS, 2016). Porém, esta idéia aplicada à grandes variações da batimetria pode levar a erros de interpretação a cerca das estruturadas em subsuperfície, resultando em perdas de oportunidades ou poços mal alocados, segundo Li e Constable (2007). Ao ser observado que o efeito da batimetria deve ser estudado pela sua relevância na influência dos dados, muitos trabalhos começaram a ser desenvolvidos, o que serviu de motivação para este trabalho.

## 1.2 Trabalhos Anteriores

Uma tentativa inicial de se compreender o efeito da batimetria pode ser conseguido através da modelagem 2,5-D. Um trabalho recente que relaciona a batimetria na modelagem 2,5-D é o de Reis (2016) da Faculdade de Geofísica da UFPA. Em seu trabalho, ela utiliza modelos de rampa com diferentes alturas para analisar a influência dessa batimetria na presença do reservatório de hidrocarbonetos em dados MCSEM. Foram usadas malhas não-estruturadas de elementos finitos geradas pelo software Triangle. Ela chegou a conclusão de que quanto mais abrupta for a batimetria maior serpa a amplitude do campo, o que pode camuflar o efeito do reservatório. Portanto, para esse tipo de modelo o ideal é usar frequências mais baixas para realçar o efeito do reservatório.

Na modelagem 3D, destacam-se os trabalhos de Souza (2007) e de Almeida e Rijo (2011)

que usa o método dos elementos finitos, de Zhdanov e Lee (2005) e Gribenko e Zhdanov (2007) que fazem uso da técnica de equação integral e de Um e Alumbaugh (2007) que utilizam o método de diferenças finitas. Em trabalhos de modelagem tridimensional que fazem uso da batimetria, podemos citar o de Yoshioka e Zhdanov (2006) que usa o método da equação integral para obter respostas de modelos geoeletricos complexos.

Focando em trabalhos usando o método de elementos finitos para modelos geoeletricos 3D com batimetria usando malhas tetraédricas não estruturadas, podemos citar Schwarzbach et al. (2009) e Yi-Xin et al. (2016). Em seu trabalho, Schwarzbach concluiu que a batimetria pode ser facilmente incluída na simulação através da resolução do problema de limites de bordas em malhas tetraédricas não estruturadas. O refinamento da malha reduz o erro a um nível aceitável e a aproximação numérica melhora a precisão da solução global. A abordagem feita por Yi-Xin está voltada ao refinamento da malha através da restrição de volume. Essa restrição é usada em locais onde os elementos estão perto do receptor e nas áreas irregulares. Nos dois trabalhos citados, ambos os autores enfatizam a importância do estudo do modelo de batimetria, pois a influência que a topografia do fundo do mar causa no dado precisa ser reproduzida por modelagem numérica para evitar a má interpretação das medições.

### 1.3 Objetivos

Este trabalho tem como objetivo analisar o efeito da batimetria na geometria *inline* em modelos geoeletricos com a presença de reservatório de hidrocarbonetos. Para essa análise, foram criados dois modelos com batimetria, o modelo 1 que possui uma elevação e o modelo 2 que representa uma depressão. Em geral, variações de batimetria perturbam as anomalias MCSEM quando analisadas na forma de amplitude e fase normalizadas do campo elétrico. Analisamos não só a batimetria como também as diferentes respostas da amplitude e da fase do campo elétrico com a variação da frequência.

## 2 METODOLOGIA

### 2.1 MCSEM

O MCSEM é usado na exploração de hidrocarbonetos em ambientes de águas profundas e ultraprofundas (EDWARDS, 2005) por ser sensível a diferença de resistividade elétrica entre o reservatório de hidrocarbonetos (mais resistivo) e as rochas sedimentares encaixantes.

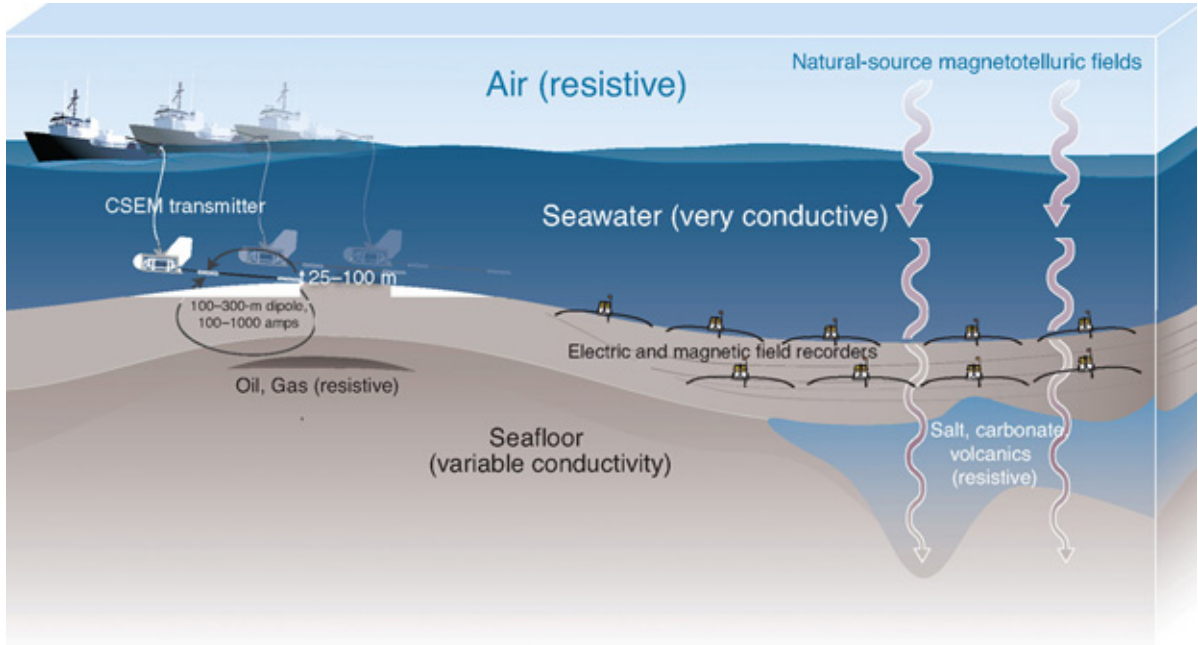
Este método utiliza como fonte um dipolo elétrico horizontal (DEH) que é movido na direção inline e/ou broadside a alguns metros acima do assoalho oceânico, emitindo um sinal de baixa frequência que pode variar entre 0.01 Hz e 10 Hz (ANDRÉIS; MCGREGOR, 2008). O sinal se propaga em todas as direções sofrendo influência das propriedades geoelétricas da água do mar, dos sedimentos e, quando for o caso, de corpos resistivos localizados em maiores profundidades.

Um conjunto de receptores dispostos no fundo oceânico captam o campo elétrico que por sua vez depende da geometria do arranjo transmissor-receptor e da resistividade das estruturas presentes em subsuperfície. A geometria do arranjo transmissor-receptor simulada neste trabalho é a inline, onde o transmissor está sendo movido na direção do eixo x assim como os receptores e a componente elétrica medida é puramente radial. E também pode ser definida como broadside quando o transmissor é movido na direção perpendicular a direção dos receptores sendo assim a componente elétrica medida é puramente azimutal. A Figura 2.1 exemplifica como é realizado uma aquisição de dados MCSEM.

O algoritmo utilizado para realizar a modelagem do MCSEM foi o software fem3Dmcsem desenvolvido por Hilton Silva, do CPGf/UFGA. O programa utiliza o método de elementos finitos 3D para malhas formadas por tetraedros (estrutura nodal). Nos experimentos, usamos malhas com no máximo 300.000 nós, pois estávamos limitados à uma estação de Dell T3500 com 24GB de memória. Usando o pacote Pardiso e o compilador Intel Fortran, cada experimento demandava 1,5 horas de processamentos de 3 transmissores ocupando uma memória de aproximadamente 20 GB.

Neste método, os campo elétricos são resolvidos em suas componentes secundárias através de um potencial vetorial magnético e escalar elétrico seguindo o trabalho de Souza (2007). Uma das vantagens da formulação em termos de potenciais é a sua estabilidade numérica através do espectro de frequência comparado a outros métodos.

Figura 2.1 – Representação da aquisição de dados MCSEM.



Fonte: Annetts et al. (2012)

Para resolver em termos de potenciais, primeiramente definimos as equações de Maxwell no domínio da frequência para um meio isotrópico e livre de cargas, como sendo

$$\nabla \cdot (\epsilon_0 E) = 0, \quad (2.1a)$$

$$\nabla \times H - \sigma E = J_0, \quad (2.1b)$$

$$\nabla \cdot (\mu_0 H) = 0, \quad (2.1c)$$

$$\nabla \times E + i\omega\mu_0 H = 0. \quad (2.1d)$$

onde  $J_0$  na equação 2.1b é a densidade de corrente externa, o  $\epsilon_0$  é a permissividade elétrica do vácuo, o  $\mu_0$  é a permeabilidade magnética do vácuo e o  $\omega$  é a frequência.

sabendo que os campos elétrico  $[E]$  e magnético  $[H]$  são a soma de uma componente primária  $[E^p, H^p]$  mais uma componente secundária  $[E^s, H^s]$  e que a condutividade do meio  $\sigma$  é dada pela condutividade do modelo primário estratificado  $\sigma^p$  mais uma parcela anômala  $\Delta\sigma$  em uma determinada região. Substituindo nas equações (2.1a) - (2.1d), teremos

$$\nabla \cdot [\epsilon_0(E^p + E^s)] = 0, \quad (2.2a)$$

$$\nabla \times (H^p + H^s) - (\sigma^p + \Delta\sigma)(E^p + E^s) = J_0, \quad (2.2b)$$

$$\nabla \cdot [\mu_0(H^p + H^s)] = 0, \quad (2.2c)$$

$$\nabla \times (E^p + E^s) + i\omega\mu_0(H^p + H^s) = 0. \quad (2.2d)$$

As equações de Maxwell são satisfeitas para os campos primários. Para os campos secundários, podemos escrever as seguintes relações

$$\nabla \cdot [\epsilon_0 E^s] = 0, \quad (2.3a)$$

$$\nabla \times H^s - (\sigma^p + \Delta\sigma)E^s = J_0, \quad (2.3b)$$

$$\nabla \cdot [\mu_0 H^s] = 0, \quad (2.3c)$$

$$\nabla \times E^s + i\omega\mu_0 H^s = 0. \quad (2.3d)$$

Considerando um meio linear, podemos definir o potencial magnético secundário  $A^s$  e o potencial elétrico secundário  $\Phi^s$  a partir das equações (2.3c) e (2.3d)

$$H^s = \nabla \times A^s, \quad (2.4a)$$

$$E^s = -i\omega\mu_0 A^s - \nabla\Phi^s. \quad (2.4b)$$

A equação (2.3b) escrita em termos de potenciais eletromagnéticos, torna-se

$$\nabla \times \nabla \times A^s + i\omega\mu_0\sigma A^s + \sigma\nabla\Phi^s = J^s, \quad (2.5)$$

em que  $J^s$  pode ser escrito como  $\Delta\sigma E^p$ . Aplicando a identidade vetorial

$$\nabla \times \nabla \times A^s = -\nabla_2 A^s + \nabla(\nabla \cdot A^s).$$

Para o calibre de Coulomb  $\nabla \cdot A^s = 0$  e buscando garantir a simetria da equação (2.5), definimos o potencial escalar reduzido  $\Phi^s = i\omega\mu_0\phi^s$ . Com isso, teremos a equação (2.5) reescrita na seguinte forma:

$$\nabla \cdot A^s - i\omega\mu_0\sigma(A^s + \nabla\phi^s) = -\Delta\sigma E^p. \quad (2.6)$$

Aplicando o divergente na equação (2.3b), assumindo a propriedade  $\nabla \cdot \nabla \times H^s = 0$  e determinamos  $\Phi^s = i\omega\mu_0\phi^s$ , como anteriormente, obtemos:

$$i\omega\mu_0\nabla\cdot(\sigma A^s) + i\omega\mu_0\nabla\cdot(\sigma\nabla\phi^s) = \nabla\cdot(\Delta\sigma E^p). \quad (2.7)$$

As equações (2.6) e (2.7) formam um sistema de equações simétrico. Resolvido este sistema, podemos calcular os campos eletromagnéticos secundários através de derivadas numéricas. Tendo em mãos os campos eletromagnéticos primário e secundário iremos somá-los para a obtenção dos campos elétrico e magnético totais.

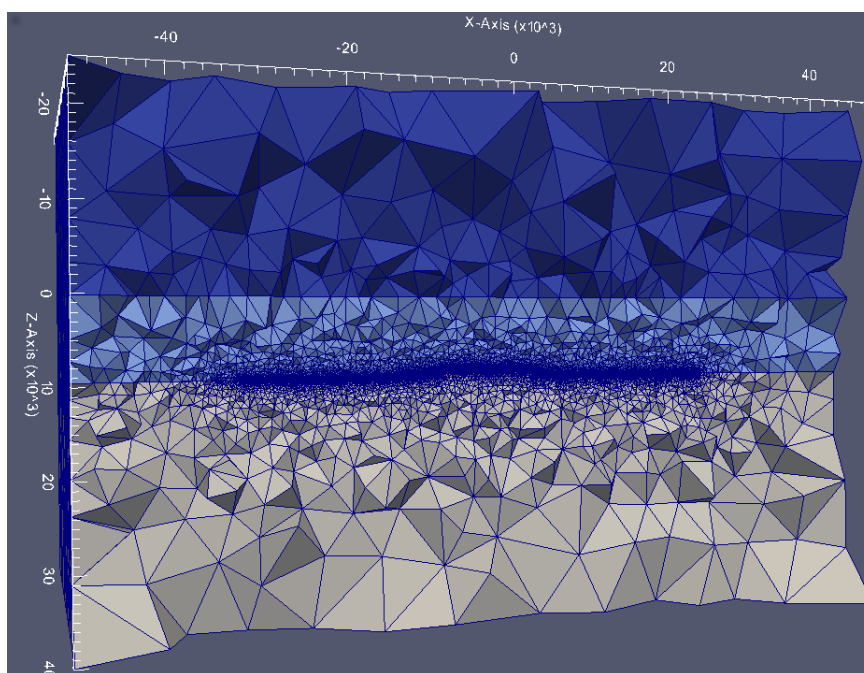
## 2.2 Elementos Finitos 3D

Desenvolvido nos anos 40, o método dos elementos finitos é uma ferramenta numérica que tem crescido em conjunto com o desenvolvimento computacional e tem ganhado força nos últimos 20 anos, período de grandes avanços computacionais (TEIXEIRA, 2008). Sua principal limitação está no elevado custo computacional na obtenção das soluções dos grandes e esparsos sistemas de equações gerados para grandes modelos geoeletricos. Esse esforço computacional é considerado o maior entre as principais ferramentas numéricas usadas no modelamento eletromagnético (SOUZA, 2007).

O método de elementos finitos consiste em resolver numericamente equações diferenciais de difícil resolução reduzindo-as em várias equações mais simples e de fácil resolução (OLIVEIRA, 2013) para os campos eletromagnéticos secundários gerados por modelos com geometria complexa. Neste trabalho, essa geometria é dividida em malhas 3D não-estruturadas de elementos finitos tetraédricos que foram geradas usando o software TetGen.

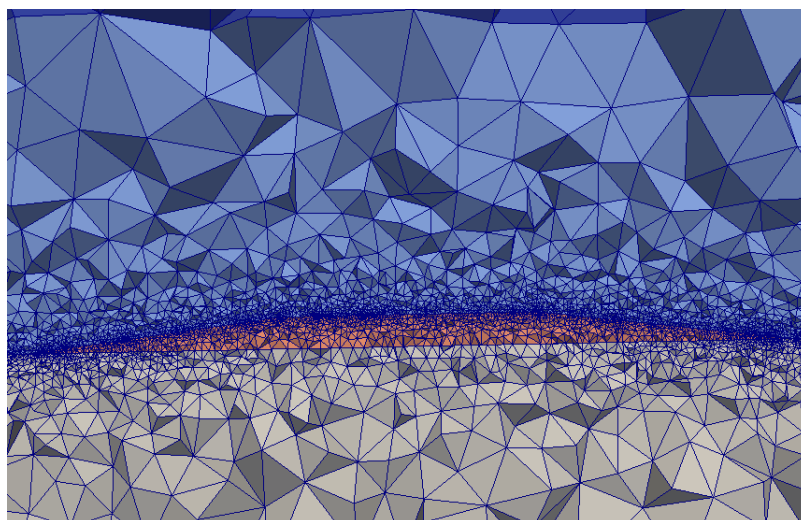
As malhas podem ser tanto tetraédricas como hexaédricas. Escolhemos as malhas tetraédricas pois, além de se adaptarem melhor a discretização de estruturas com formatos arbitrários, possuem maior precisão, pelo fato de que o seu volume é menor em comparação as hexaédricas (OLIVEIRA, 2013). Porém ao discretizarmos cada vez mais a malha o número de elementos também aumenta o que significa um maior esforço computacional, pois isso implica em mais memória e mais tempo para o processamento.

Figura 2.2 – Representação de uma malha com elevação de elementos finitos gerada pelo software Tetgen.



Fonte: do autor

Figura 2.3 – Representação da elevação no assoalho oceânico por elementos finitos gerados pelo software Tetgen.



Fonte: do autor

## 2.3 Solução do Sistema

Em uma malha de elementos finitos 3D com elementos tetraedrais, cada elemento apresenta 4 nós que estão associados a inteiros que irão identificá-los. Para cada nó são adquiridos valores de potenciais vetor magnéticos e escalar elétricos, sendo três componentes do vetor magnético e uma componente do escalar elétrico, definindo assim quatro variáveis para cada nó da malha (SILVA, 2012). Com isso, temos que a dimensão do sistema gerado será quatro vezes o número  $N$  de nós ( $4N$ ).

O sistema global será solucionado através do método de eliminação gaussiana com a matriz global na ordem de  $4N$ , assim como a dimensão do vetor fonte global. O vetor fonte do sistema também possui a mesma dimensão do vetor fonte global,  $4N$ .

A matriz global é caracterizada por ser uma matriz complexa, bandeda e simétrica. Para resolver esse sistema linear, usamos o pacote matemático Pardiso, implementado como biblioteca do compilador Intel, que é um software robusto, de alto desempenho, eficiente em uso de memória e de fácil uso que resolve grandes e esparsos sistemas de equações lineares através de decomposição LU com pivoteamento total.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste trabalho, utilizamos dois modelos para análise. O modelo 1 representa uma elevação no assoalho oceânico e o modelo 2 representa uma depressão no fundo oceânico. Usamos lâminas d'água de 1.500 metros (L1) e de 10.000 metros (L2) para cada modelo. As quatro frequências usadas para o DEH foram 0.25Hz, 0.5 Hz, 0.75Hz e 1.0 Hz. Para estes modelos, a resistividade do ar vale  $10^{12}\Omega m$ , a do mar tem o valor de  $0.3 \Omega m$ , a resistividade da rocha sedimentar encaixante é de  $5.0 \Omega m$  e quando há o reservatório, ele tem resistividade de  $100 \Omega m$ .

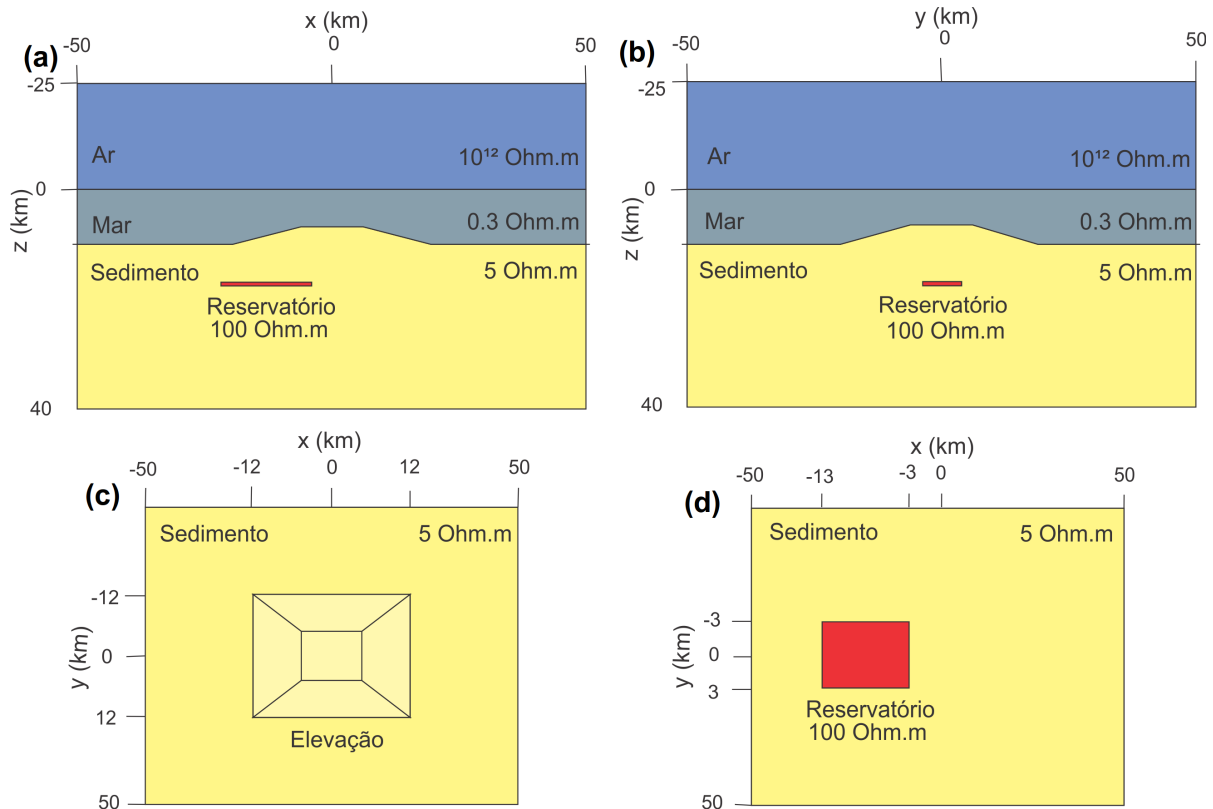
Ao realizarmos a modelagem numérica, substituímos o transmissor móvel localizado no fundo oceânico por transmissores fixos dispostos em diferentes posições e 150 receptores distribuídos de -30 a 30 km no assoalho oceânico. Além disso, usaremos transmissores em três diferentes posições ao longo da direção inline:  $x = -12$  km (Tx1);  $x = -4$  km (Tx2); e no ponto central  $x = 0$  km (Tx3). Esses transmissores estão localizados 30 metros acima do fundo oceânico.

#### 3.1 Modelo 1

O modelo geoeletrico tridimensional 1 desenvolvido para este trabalho foi feito com a presença do reservatório de hidrocarboneto (Hc) e sem a presença do reservatório (Nohc), tanto para experimentos sem batimetria (Nobat) e com batimetria (Bat). Para o modelo 1, a batimetria é definida como uma elevação. O modelo do experimento mais complexo (Hc e Bat) está representado em seções x-z, y-z e x-y pelas Figuras 3.1 – (a), 3.1 – (b), 3.1 – (c) e 3.1 – (d). Os outros modelos usados seguem o da Figura 3.1 – , mudando apenas a lâmina d'água, a presença da elevação e do reservatório.

A Figura 3.1 – (a) mostra a seção transversal x-y do modelo que apresenta elevação, cuja sua base está definida entre -12 km e 12 km e o topo entre -4 km e 4 km no eixo x e no eixo y, com espessura de 1 km. Já na Figura 3.1 – (d) temos a seção x-y do modelo com a representação do reservatório de hidrocarboneto disposto em eixo x entre -13 km e -3 km e no eixo y entre -3 km e 3 km a 1 km de distância entre a interface mar-sedimento e o seu topo, com 100 m de espessura.

Figura 3.1 – Modelo geoeétrico 3D que representa uma elevação utilizado nos experimentos. (a) Seção transversal x-z; (b) seção transversal y-z; (c) seção transversal x-y da elevação; (d) seção transversal x-y do reservatório.



Fonte: do autor

### 3.1.1 Efeito da batimetria

Para o modelo geoeétrico da Figura 3.1, porém sem o reservatório de hidrocarbonetos e com a lâmina d'água de 10 km, analisaremos a influência apenas da batimetria na amplitude e da fase do campo elétrico para as quatro frequências usadas nesse trabalho e para as posições de transmissores iguais a -12 km e 0 km: no primeiro caso temos duas regiões distintas no offset, uma com receptores na parte plana do assoalho oceânico e à esquerda do transmissor e a outra à direita, com receptores localizados na elevação. A comparação será tomada em relação à resposta de um modelo sem batimetria, que servirá de referência.

As Figuras 3.2 e 3.3 que representam a amplitude do campo e a fase, respectivamente, foram adquiridas com o transmissor na posição -12 km. Observa-se uma assimetria na amplitude dos campos que se dá pela presença da batimetria e pela geometria do arranjo transmissor-receptor, porém o efeito não varia com a frequência, apesar que amplitude do campo diminui com o aumento da frequência em um mesmo offset, como era de se esperar. Na fase o efeito é similar, principalmente para offsets de no máximo 12 km.

As Figuras 3.4 e 3.5, que representam a amplitude do campo e a fase, respectivamente, foram adquiridas com o transmissor na posição  $x = 0$  km. Observa-se um ligeiro aumento na amplitude dos campos quando comparados com a resposta sem batimetria. Essa diferença de amplitude se dá pela presença da batimetria e pela geometria do arranjo transmissor-receptor. A mesma análise pode ser feita para a fase. Observamos ainda a delimitação das bordas da elevação com mais clareza nas frequências mais baixas (0.25 Hz e 0.50 Hz).

Nestas simulações, ocorreram algumas respostas instáveis no final do offset, podendo o erro numérico ser atribuído à discretização da malha de elementos finitos.

Figura 3.2 – Amplitude dos campos elétricos para um modelo com batimetria (vermelho) e sem a batimetria (azul) e lâmina d'água de 10 km e transmissor em -12 km nas frequências de (a) 0.25 Hz, (b) 0.50 Hz, (c) 0.75 Hz e (d) 1 Hz.

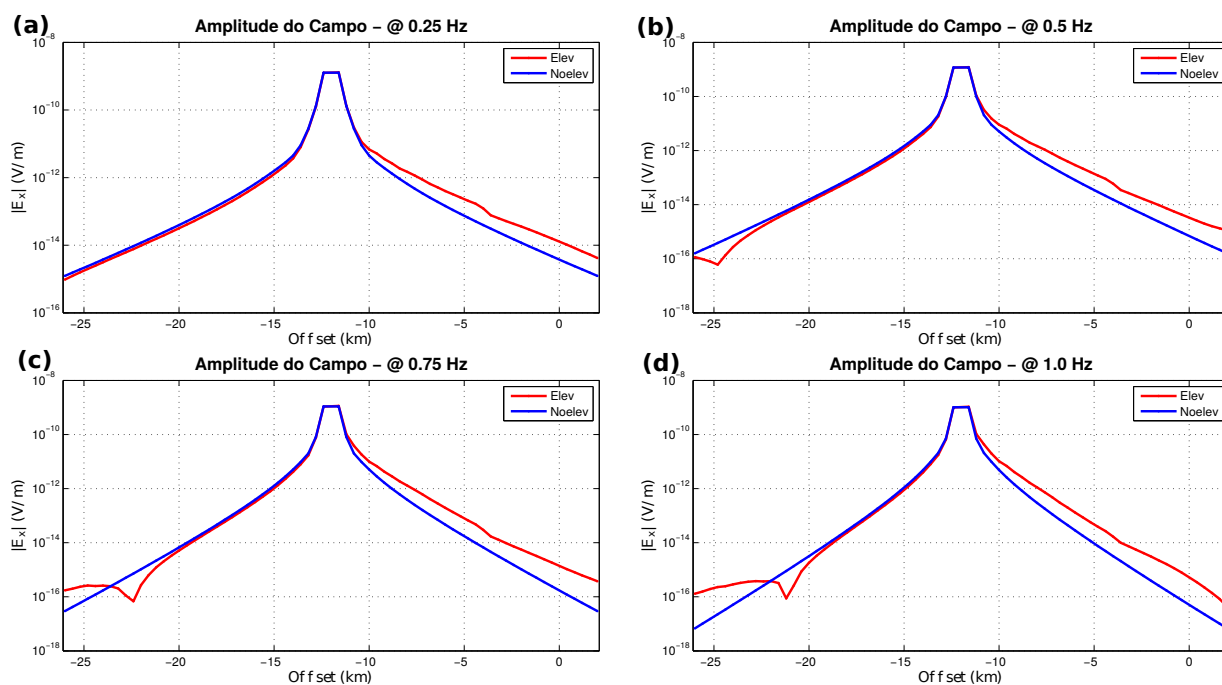


Figura 3.3 – Fase dos campos elétricos para um modelo com batimetria (magenta) e sem a batimetria (azul) e lâmina d'água de 10 km e transmissor em -12 km nas frequências de (a) 0.25 Hz, (b) 0.50 Hz, (c) 0.75 Hz e (d) 1 Hz.

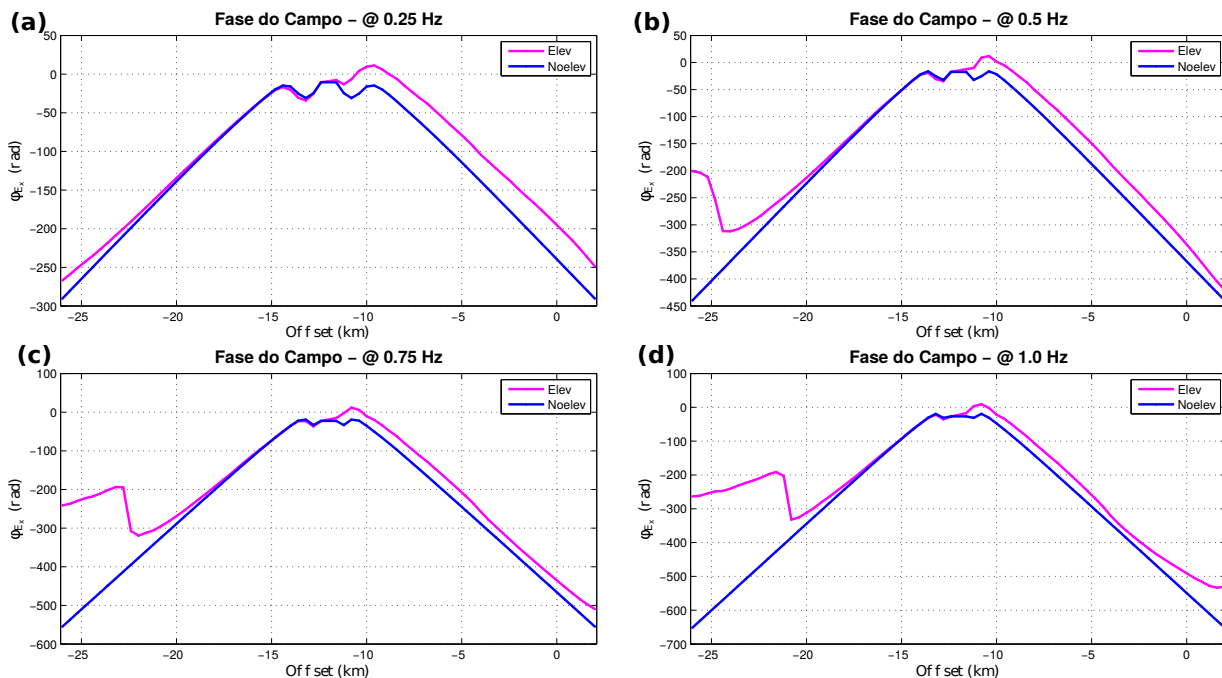


Figura 3.4 – Amplitude dos campos elétricos para um modelo com batimetria (vermelho) e sem a batimetria (azul) e lâmina d'água de 10 km e transmissor em 0 km nas frequências de (a) 0.25 Hz, (b) 0.50 Hz, (c) 0.75 Hz e (d) 1 Hz.

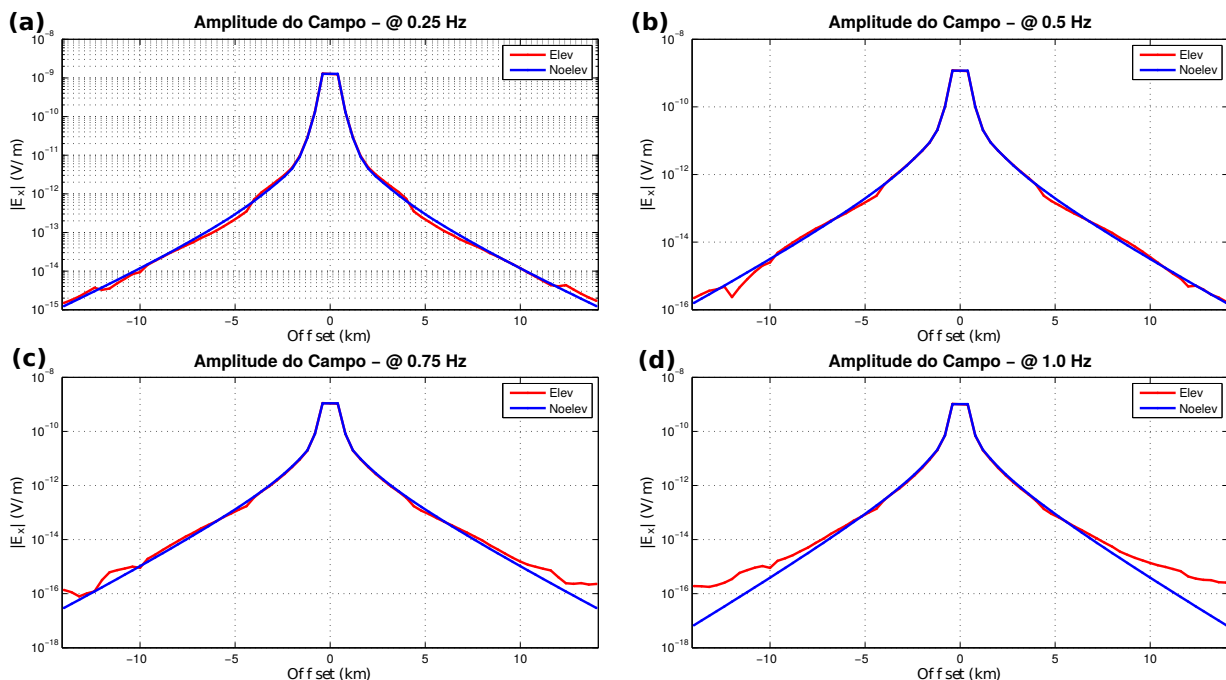
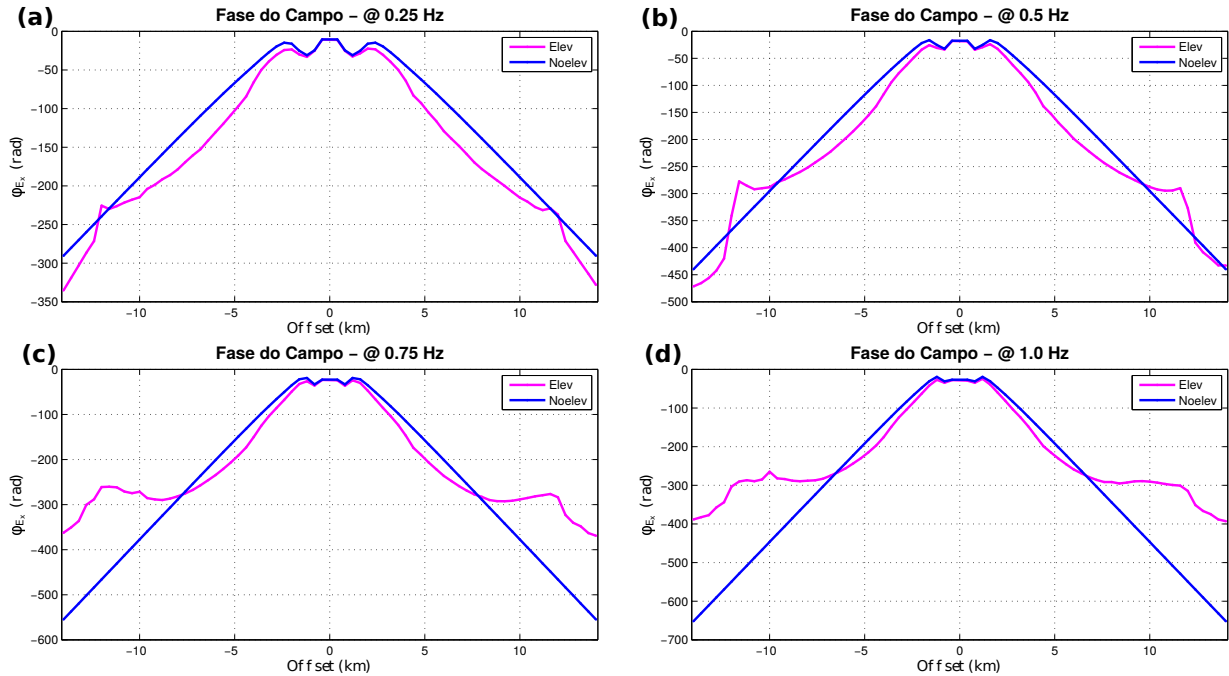


Figura 3.5 – Fase dos campos elétricos para um modelo com batimetria (magenta) e sem a batimetria (azul) e lâmina d’água de 10 km e transmissor em 0 km nas frequências de (a) 0.25 Hz, (b) 0.50 Hz, (c) 0.75 Hz e (d) 1 Hz.



### 3.1.2 Variação da frequência

Para o modelo geológico da Figura 3.1, com lâmina d’água de 1.500 metros na presença da elevação e do reservatório, realizamos o experimento 1 para analisarmos o comportamento da amplitude e da fase do campo elétrico com a variação da frequência nas três posições de transmissores definidas anteriormente.

Observamos nas Figuras 3.6, 3.7 e 3.8 que a amplitude do campo elétrico diminui com o aumento da frequência em um mesmo offset, que pode ser explicado pela relação frequência e profundidade de investigação (skin-depth). Quanto menor a frequência usada maior é a influência do corpo que está em profundidade e esse efeito é observado no aumento da amplitude do campo. A relação com a fase se dá de forma similar à da amplitude.

Outro ponto a ser destacado é a assimetria dos gráficos, mais evidente na Figura 3.8, onde para  $x > 0$  temos a influência apenas da batimetria na resposta e para  $x < 0$  se dá também a resposta do reservatório. Nos levantamentos MCSEM o noise-floor se dá em torno de  $10^{-15}$  V/m para medidas de campo elétrico, o que limita o off-set a no máximo 12 km.

Figura 3.6 – (a) Amplitude e (b) fase do campo elétrico para lâmina d'água de 1,5 km, transmissor em -12 km e frequências de 0,25, 0,50, 0,75 e 1,0 Hz.

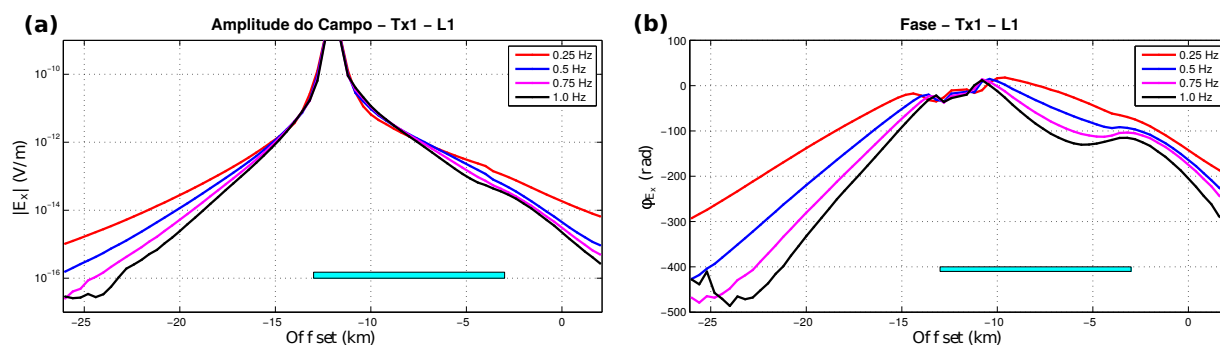


Figura 3.7 – (a) Amplitude e (b) fase do campo elétrico para lâmina d'água de 1,5 km e transmissor em -4 km e frequências de 0,25, 0,50, 0,75 e 1,0 Hz.

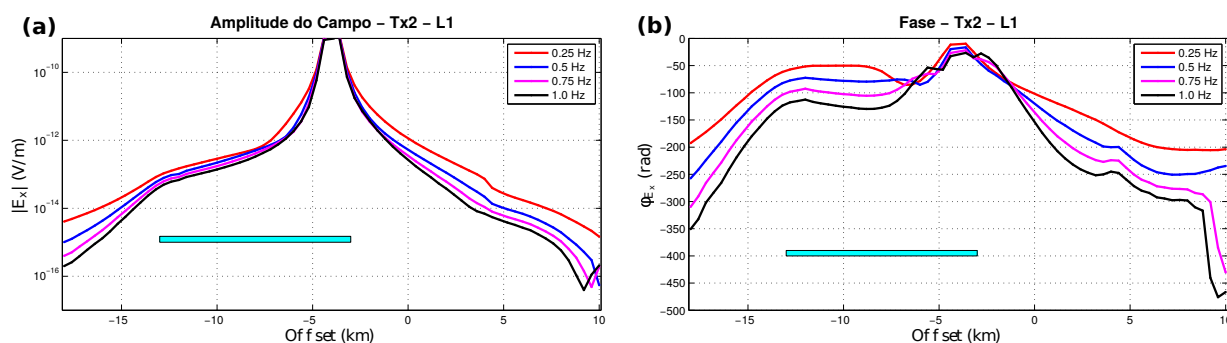
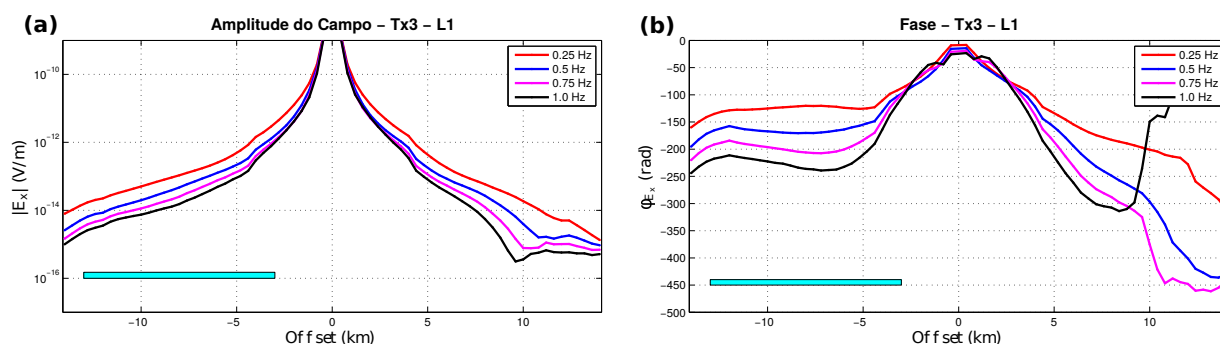


Figura 3.8 – (a) Amplitude e (b) fase do campo elétrico para lâmina d'água de 1,5 km e transmissor em 0 km e frequências de 0,25, 0,50, 0,75 e 1,0 Hz.



No experimento 2 usamos a lâmina d'água do modelo geológico igual a 10 km a fim de eliminar a interação entre a onda-aérea e a batimetria, numa menor lâmina d'água como ocorre para 1.500 m. Ressaltamos que esta é uma condição hipotética de levantamento MCSEM. Analisamos o comportamento do modelo para as três posições de transmissores

relativas à elevação da Figura 3.1 vemos que nas respostas das Figuras 3.9, 3.10 e 3.11 a amplitude do campo elétrico também diminui com o aumento da frequência.

As curvas chegam a delimitar, de forma sutil, onde começa e onde termina a elevação, exemplificado na Figura 3.11 com mais clareza na coordenada  $x = -12$  km (início da elevação) e  $x = -4$  km (fim da elevação), especialmente na frequência de 1 Hz. A relação com a fase se dá de forma similar a da amplitude. Podemos ver esse mesmo comportamento para todos os transmissores. Comparando as Figuras 3.8 e 3.11, podemos perceber a influência da onda aérea, que é bastante acentuada no receptor em  $x = 0$  km, no alto da elevação (onde há apenas 500 m de lâmina d'água).

Figura 3.9 – (a) Amplitude e (b) fase do campo elétrico para lâmina d'água de 10 km, transmissor em -12 km e frequências de 0,25, 0,50, 0,75 e 1,0 Hz.

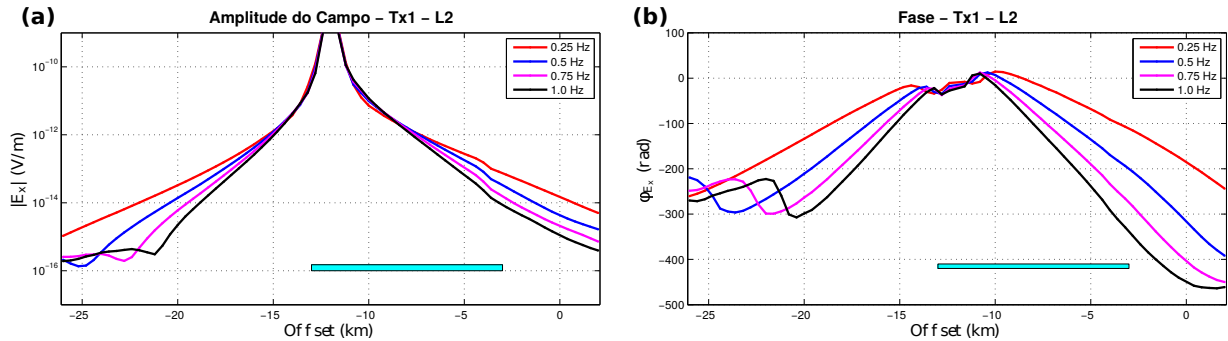


Figura 3.10 – (a) Amplitude e (b) fase do campo elétrico para lâmina d'água de 10 km, transmissor em -4 km e frequências de 0,25, 0,50, 0,75 e 1,0 Hz.

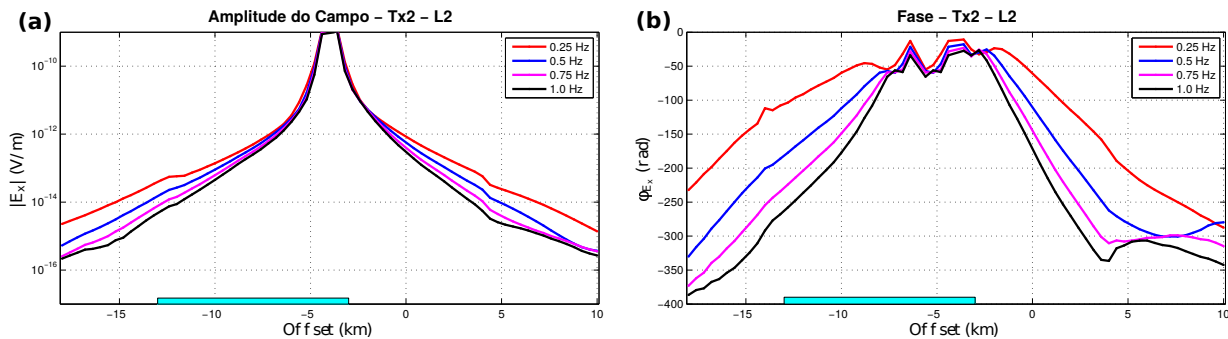
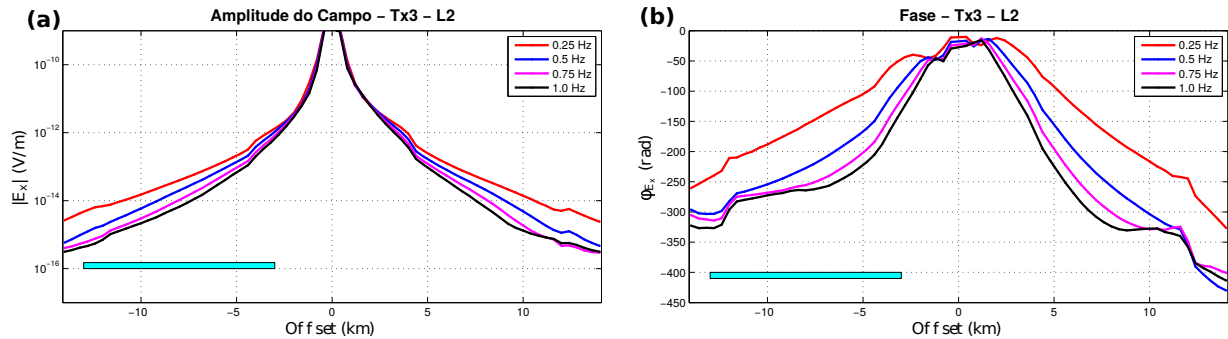


Figura 3.11 – (a) Amplitude e (b) fase do campo elétrico para lâmina d’água de 10 km, transmissor em 0 km e frequências de 0,25, 0,50, 0,75 e 1,0 Hz.



### 3.1.3 Efeito do reservatório na presença da batimetria

Com o objetivo de caracterizar um reservatório na presença de batimetria, tomamos o modelo geológico da Figura 3.1 e simulamos o reservatório de hidrocarbonetos (Hc) em duas situações na mesma lâmina d’água de 10 km: com batimetria (Bat) e sem batimetria (Nobat). Além disso, para servir de referencial, comparamos com a resposta 1-D (Nohc/Nobat). Os resultados são mostrados tanto para a amplitude quanto para a fase do campo elétrico. Assim, adotaremos as três legendas: Nohc/Noelev (preto), Hc/Noelev (azul) e Hc/Elev (vermelho).

As Figuras 3.12 e 3.13, que representam a amplitude e a fase do campo elétrico, respectivamente, foram adquiridas com o transmissor na posição -12 km nas frequências de 0.25 Hz, 0.50 Hz, 0.75 Hz e 1 Hz. Nos gráficos observamos uma assimetria nas curvas pela posição relativa do reservatório e da batimetria. O efeito é maior com o aumento da frequência, sobressaindo a anomalia gerada pela batimetria junto com o reservatório, quando comparados ao caso 1-D.

Comportamento análogo se dá na fase, de maneira ainda mais evidente quanto à presença do reservatório e da batimetria. Nas figuras citadas acima, verificamos que novamente ocorreu instabilidade numérica para grandes offsets.

As Figuras 3.14 e 3.15, que representam a amplitude do campo e a fase, respectivamente, foram adquiridas com o transmissor na posição zero. Nos gráficos, a assimetria se dá pela posição do reservatório que torna o campo anômalo bem maior no lado esquerdo do transmissor, onde está localizado. De maneira geral repete-se o comportamento das curvas com a frequência, onde as curvas diminuem de valor com o aumento da frequência, em um mesmo offset.

Figura 3.12 – Amplitude dos campos elétricos para os casos 1-D (preto), e para o reservatório com (magenta) e sem (azul) a batimetria para lâmina d'água de 10 km e transmissor em -12 km nas frequências de (a) 0.25 Hz, (b) 0.50 Hz, (c) 0.75 Hz e (d) 1 Hz.

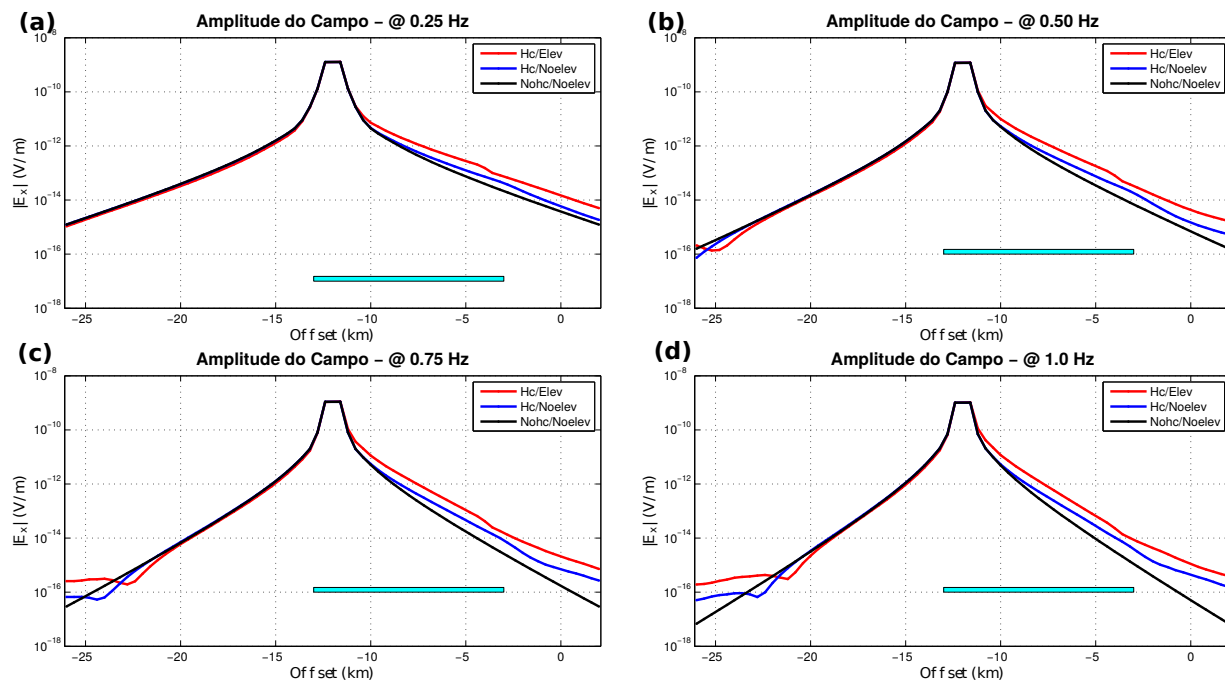


Figura 3.13 – Fase dos campos elétricos para os casos 1-D (preto), e para o reservatório com (magenta) e sem (azul) a batimetria para lâmina d'água de 10 km e transmissor em -12 km nas frequências de (a) 0.25 Hz, (b) 0.50 Hz, (c) 0.75 Hz e (d) 1 Hz.

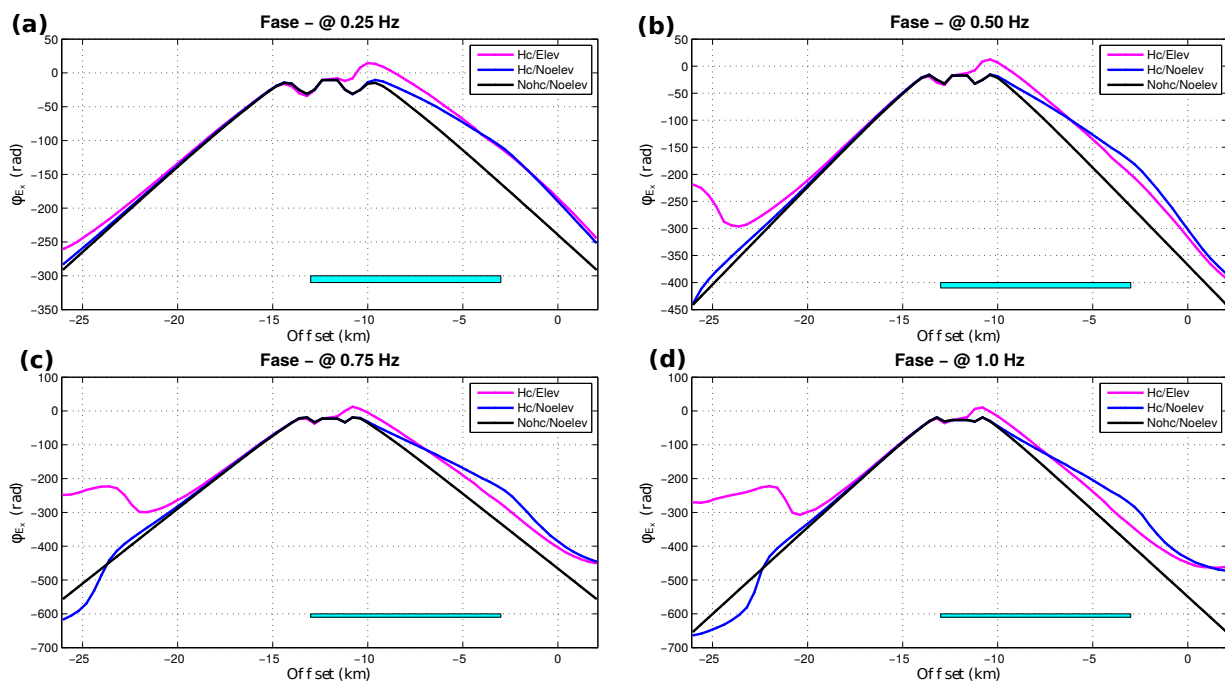


Figura 3.14 – Amplitude dos campos elétricos para os casos 1-D (preto), e para o reservatório com (magenta) e sem (azul) a batimetria para lâmina d'água de 10 km e transmissor em 0 km nas frequências de (a) 0.25 Hz, (b) 0.50 Hz, (c) 0.75 Hz e (d) 1 Hz.

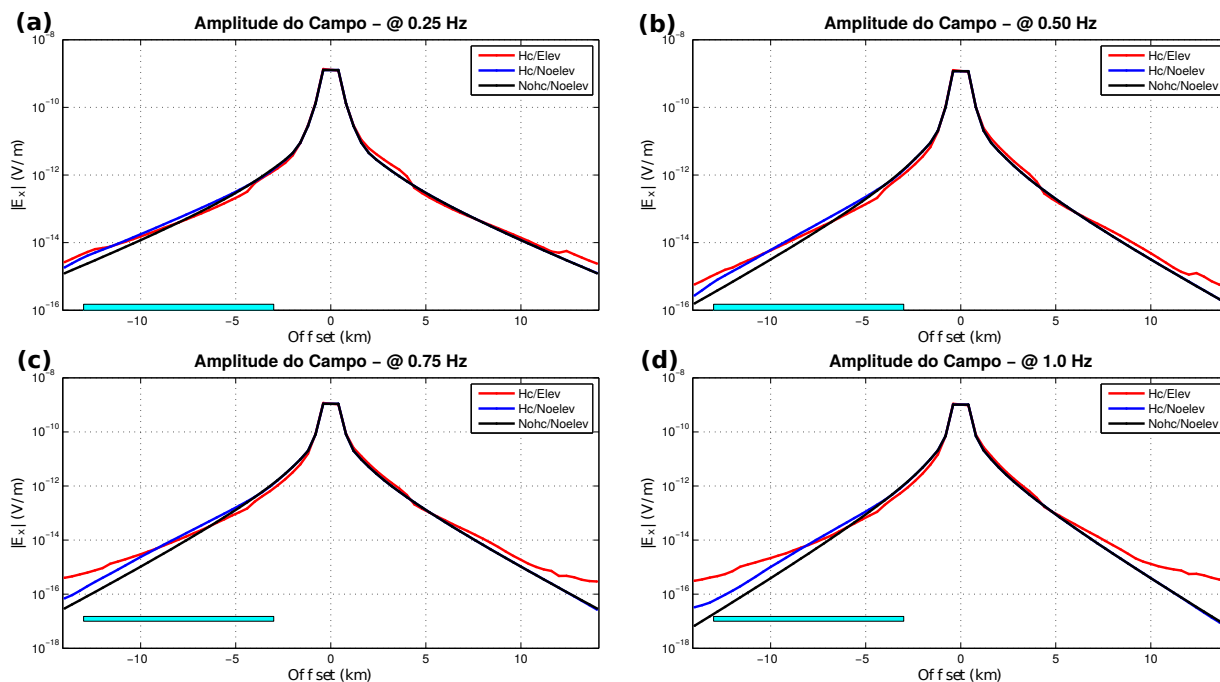
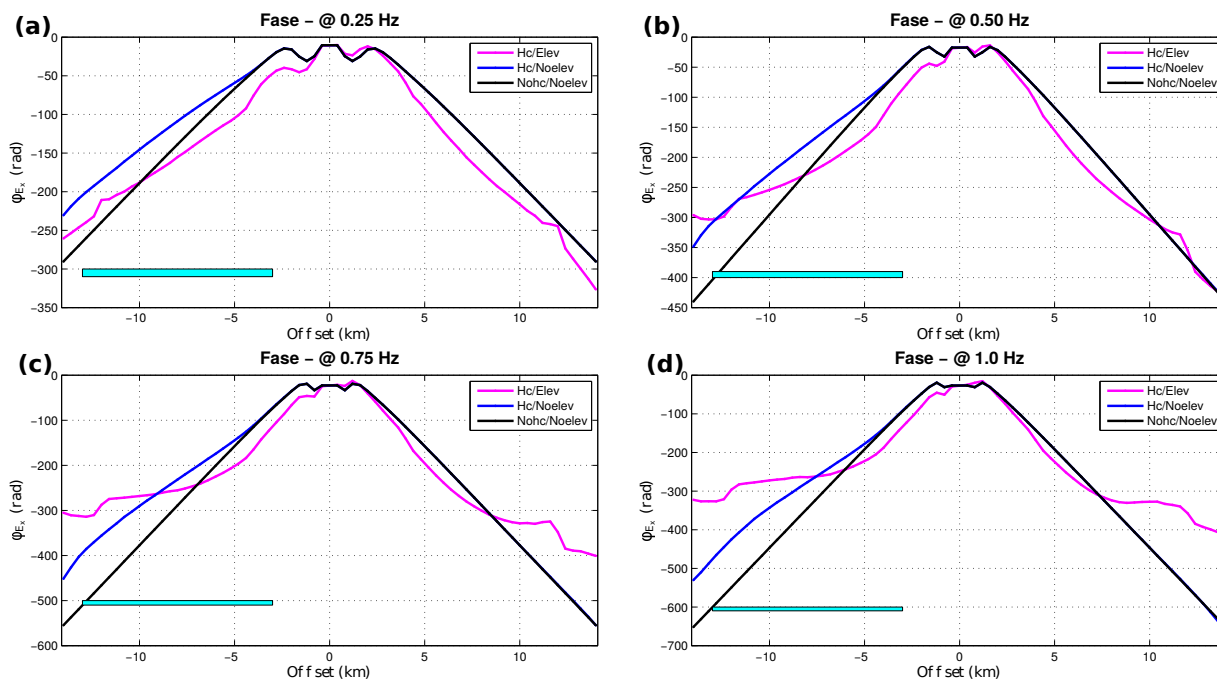


Figura 3.15 – Fase dos campos elétricos para os casos 1-D (preto), e para o reservatório com (magenta) e sem (azul) a batimetria para lâmina d'água de 10 km e transmissor em 0 km nas frequências de (a) 0.25 Hz, (b) 0.50 Hz, (c) 0.75 Hz e (d) 1 Hz.

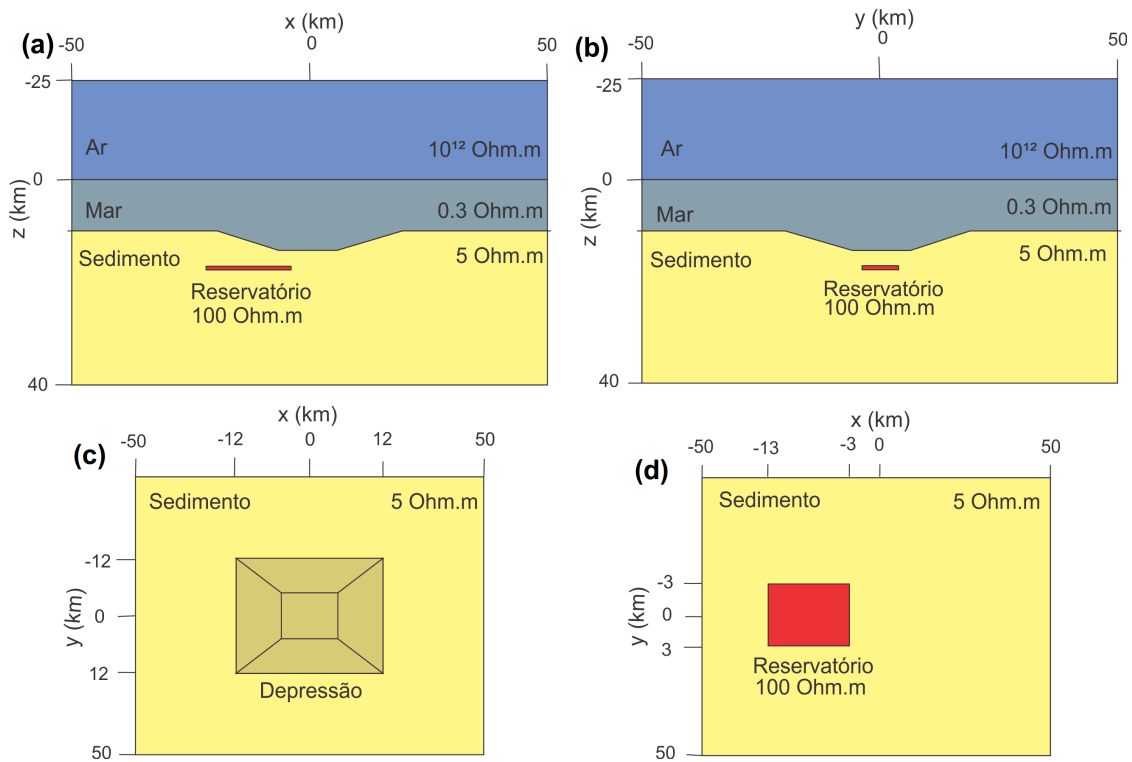


### 3.2 Modelo 2

O modelo geolétrico tridimensional 2 desenvolvido para este trabalho, como dito anteriormente, representa uma depressão. Os experimentos foram realizados com a presença do reservatório de hidrocarboneto (Hc) e sem a presença do reservatório (Nohc), tanto para experimentos sem a depressão (Nodepr) e com a depressão (Depr). O modelo do experimento mais complexo (Hc e Depr) está representado nas seções x-z, y-z e x-y pelas Figuras 3.16 – (a), 3.16 – (b), 3.16 – (c) e 3.16 – (d). Os outros modelos usados seguem o da Figura 3.16, mudando apenas a lâmina d'água, a presença da depressão e do reservatório.

A Figura 3.16 – (a) mostra a seção transversal x-y do modelo que apresenta elevação, cujo seu topo está definido entre -12 km e 12 km e a base entre -4 km e 4 km no eixo x e no eixo y, com espessura de 1 km. Já na Figura 3.1 – (d) temos a seção x-y do modelo com a representação do reservatório de hidrocarboneto disposto em eixo x entre -13 km e -3 km e no eixo y entre -3 km e 3 km a 1 km de distância entre a interface mar-sedimento e o seu topo, com 100 m de espessura.

Figura 3.16 – Modelo geolétrico 3D que representa uma depressão utilizado nos experimentos. (a) Seção transversal x-z; (b) seção transversal y-z; (c) seção transversal x-y da elevação; (d) seção transversal x-y do reservatório.



Fonte: do autor

### 3.2.1 Efeito da batimetria

Levando em consideração o modelo geoeétrico da Figura 3.16, porém sem a presença do reservatório de hidrocarbonetos com a lâmina d'água de 10 km, analisamos a influência apenas da depressão no assoalho oceânico na amplitude e na fase do campo elétrico para as quatro frequências de medida e para duas posições de transmissores iguais a -12 km e 0 km: no primeiro caso temos duas regiões distintas no offset, uma com receptores na parte plana do assoalho oceânico e à esquerda do transmissor e a outra à direita, com receptores localizados na depressão. Iremos comparar as respostas deste modelo com um modelo sem batimetria que servirá de referência.

As Figuras 3.17 e 3.18 representam a amplitude e a fase do campo elétrico, respectivamente, adquiridas na posição -12 km. A presença da batimetria causa uma assimetria na amplitude dos campos, que também são influenciados pelo arranjo transmissor-receptor, como observado. A amplitude do campo diminui com a formação da depressão, delimitando nessas figuras, que posição começa seu ponto mais alto e onde está localizado seu ponto mais baixo. A análise é semelhante para a fase do campo elétrico.

Nas Figuras 3.19 e 3.20, são mostradas a amplitude e a fase do campo elétrico medidas para o transmissor na posição 0 km. Observa-se um ligeiro aumento na amplitude dos campos quando comparados a resposta sem batimetria devido ao efeito que a presença da batimetria causa no dado, além da influência da geometria do arranjo transmissor-receptor. O mesmo comportamento pode ser visto na fase. Outro ponto importante é que podemos observar a delimitação das bordas da depressão com mais clareza nas frequências mais altas.

Figura 3.17 – Amplitude dos campos elétricos para um modelo com a depressão (vermelho) e sem a depressão (azul) e lâmina d'água de 10 km e transmissor em -12 km nas frequências de (a) 0.25 Hz, (b) 0.50 Hz, (c) 0.75 Hz e (d) 1 Hz.

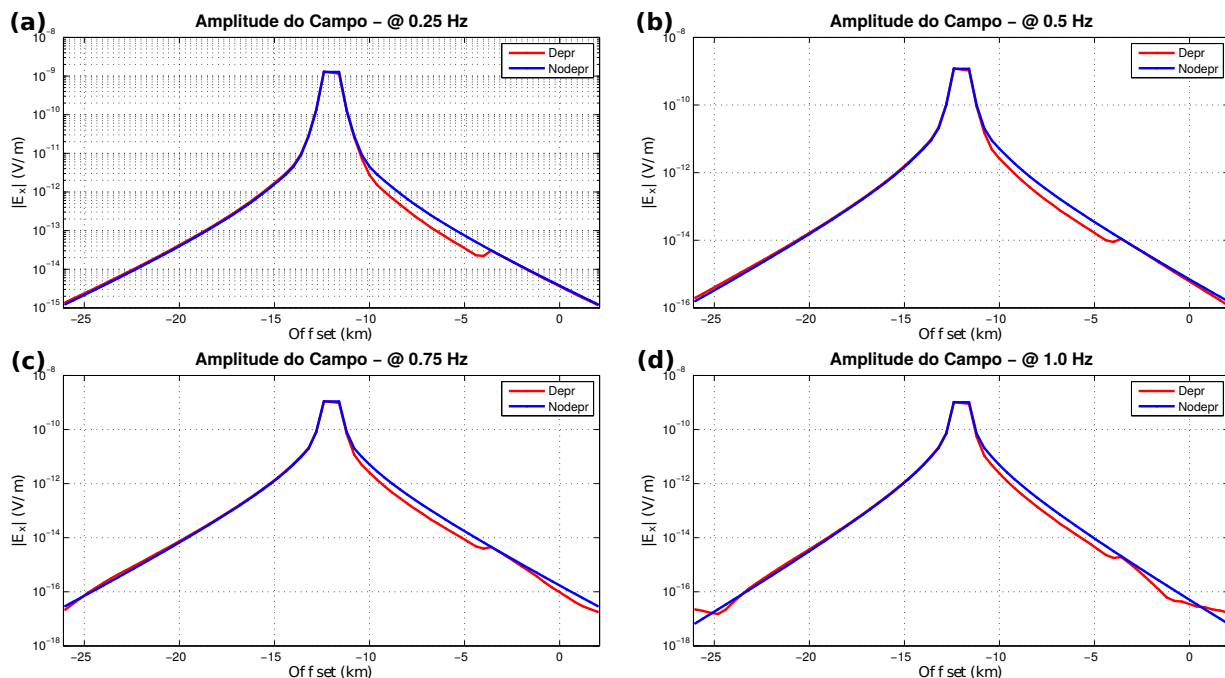


Figura 3.18 – Fase dos campos elétricos para um modelo com depressão (vermelho) e sem a depressão (azul) e lâmina d'água de 10 km e transmissor em -12 km nas frequências de (a) 0.25 Hz, (b) 0.50 Hz, (c) 0.75 Hz e (d) 1 Hz.

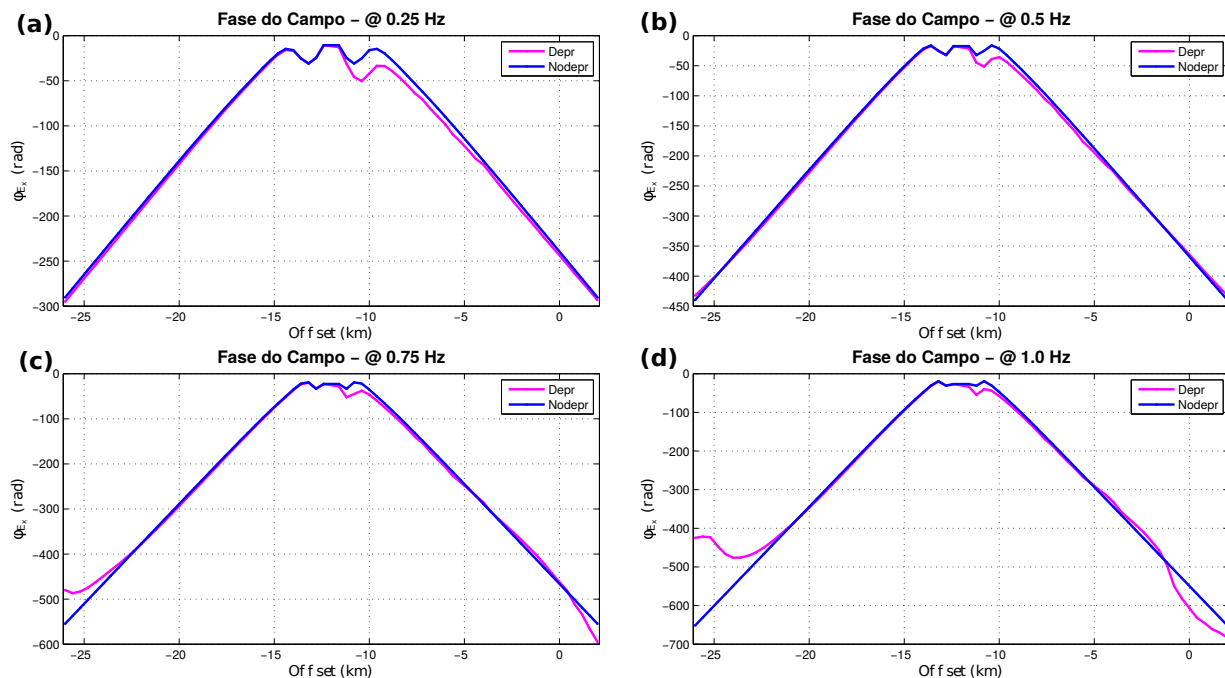


Figura 3.19 – Amplitude dos campos elétricos para um modelo com depressão (vermelho) e sem a depressão (azul) e lâmina d'água de 10 km e transmissor em 0 km nas frequências de (a) 0.25 Hz, (b) 0.50 Hz, (c) 0.75 Hz e (d) 1 Hz.

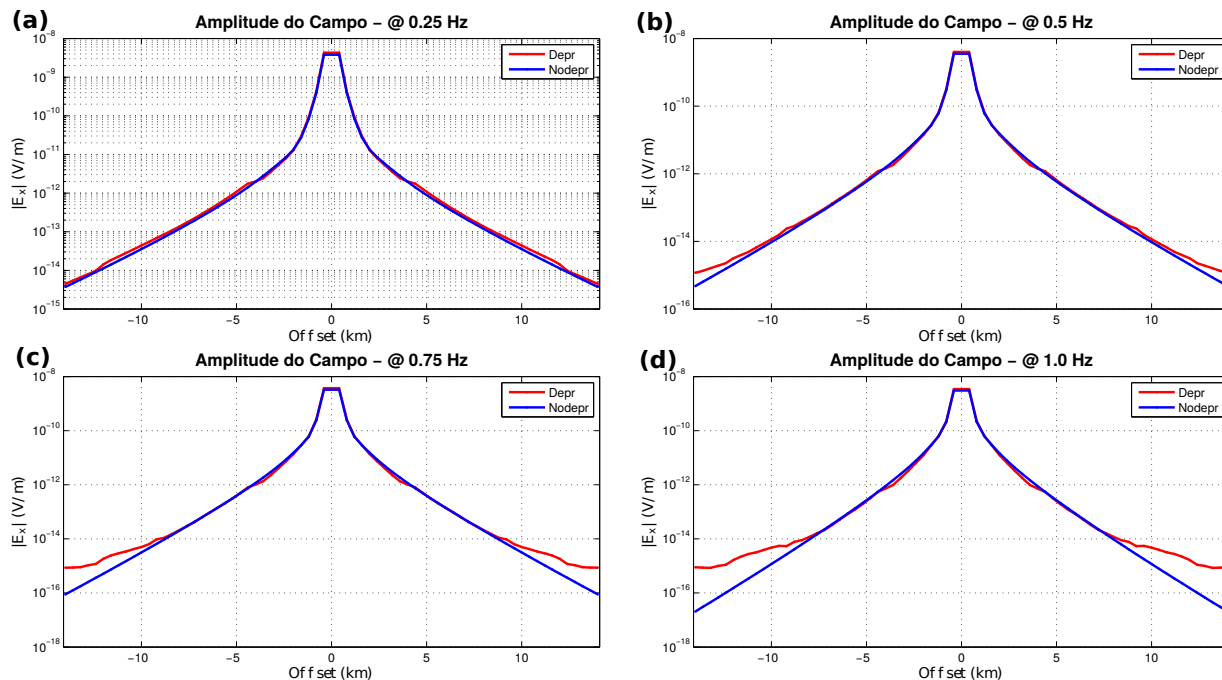
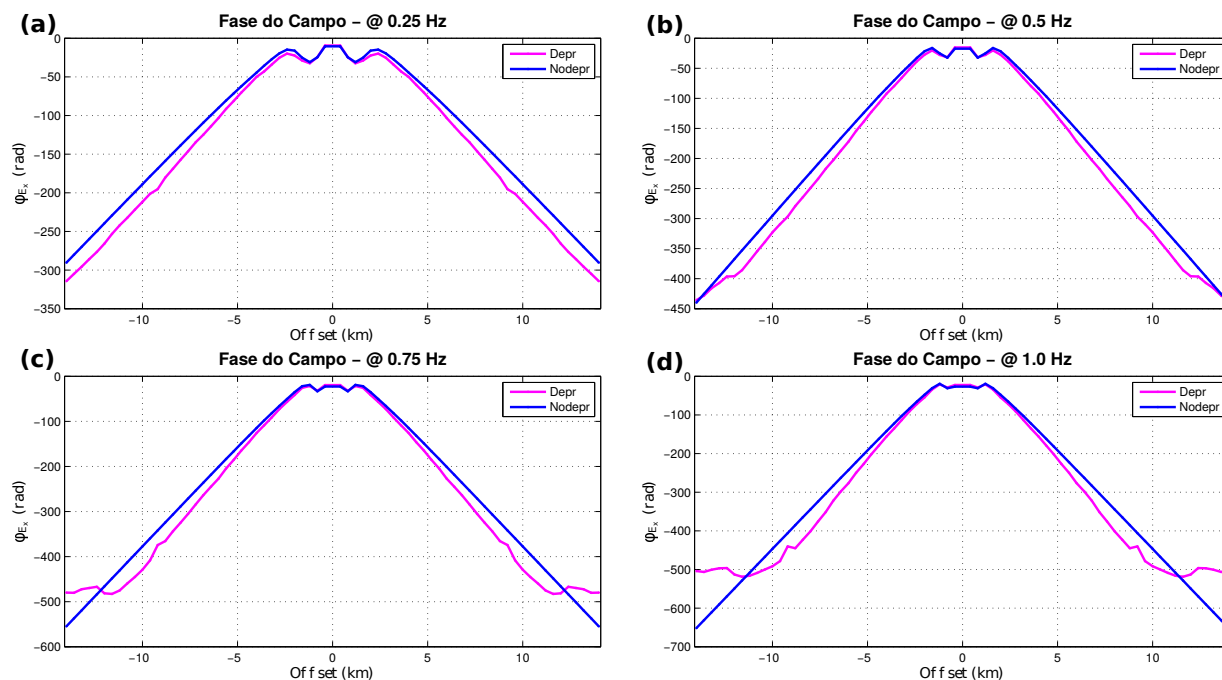


Figura 3.20 – Fase dos campos elétricos para um modelo com depressão (vermelho) e sem a depressão (azul) e lâmina d'água de 10 km e transmissor em 0 km nas frequências de (a) 0.25 Hz, (b) 0.50 Hz, (c) 0.75 Hz e (d) 1 Hz.



### 3.2.2 Variação da frequência

Para o modelo geológico da Figura 3.16, com lâmina d'água de 1.500 metros na presença da elevação e do reservatório, realizamos este experimento para analisarmos o comportamento da amplitude e da fase do campo elétrico com a variação da frequência nas três posições de transmissores definidas anteriormente.

Nas Figuras 3.21, 3.22 e 3.23, observamos que a amplitude do campo elétrico diminui com o aumento da frequência. Este comportamento pode ser explicado pelo fato de que quanto menor a frequência utilizada maior será a profundidade de investigação. Com isso, são nas frequências mais baixas que podemos perceber um maior efeito do reservatório que está em profundidade. E nas frequências mais altas podemos perceber uma maior influência da batimetria, conseguindo até delimitar as bordas da depressão, tanto em seus pontos mais altos quanto em seus pontos mais baixos. Este mesmo comportamento pode ser observado com a fase do campo elétrico.

Figura 3.21 – (a) Amplitude e (b) fase do campo elétrico para lâmina d'água de 1,5 km, transmissor em -12 km e frequências de 0,25, 0,50, 0,75 e 1,0 Hz.

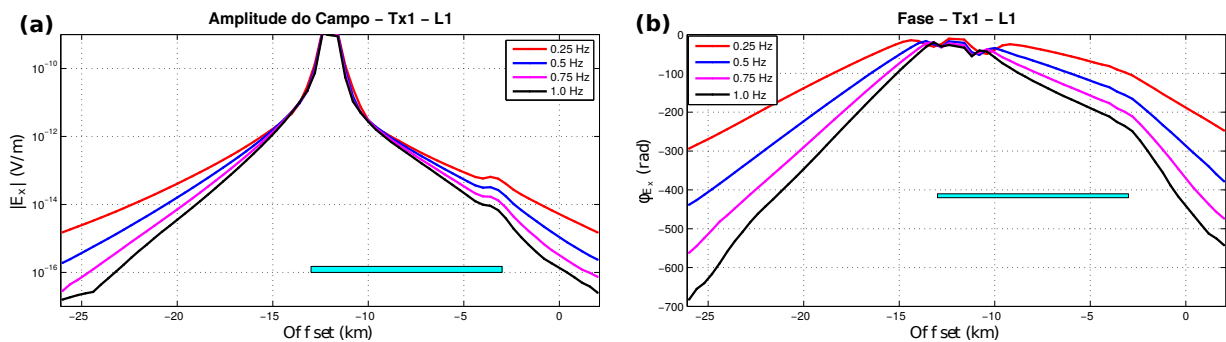


Figura 3.22 – (a) Amplitude e (b) fase do campo elétrico para lâmina d'água de 1,5 km e transmissor em -4 km e frequências de 0,25, 0,50, 0,75 e 1,0 Hz.

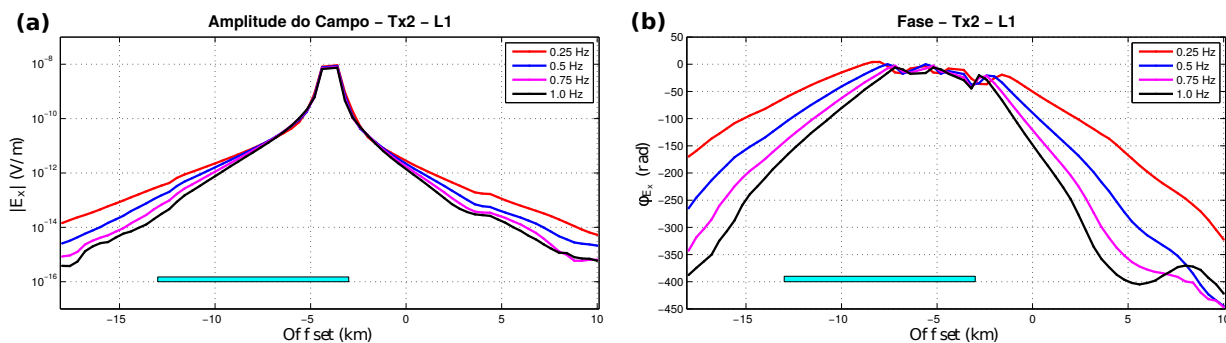
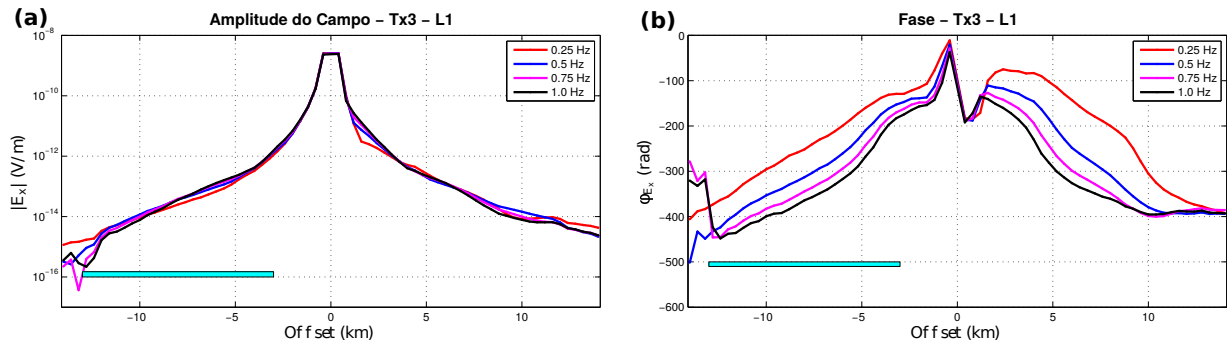


Figura 3.23 – (a) Amplitude e (b) fase do campo elétrico para lâmina d'água de 1,5 km e transmissor em 0 km e frequências de 0,25, 0,50, 0,75 e 1,0 Hz.



Neste segundo experimento, usamos um modelo geológico com lâmina d'água de 10 km para que pudéssemos eliminar a influência da onda aérea nos dados, o que não ocorre no experimento utilizando a lâmina d'água de 1,5 km.

Nas Figuras 3.24, 3.25 e 3.26, observamos que a amplitude o campo elétrico diminui com o aumento da frequência, assim como nas figuras 3.21, 3.22 e 3.23 do experimento 1. As frequências mais baixas conseguem uma maior profundidade de investigação enquanto que as mais altas conseguem uma menor, por esse motivo nas curvas com baixas frequências apresentam um maior efeito do corpo e com isso uma maior amplitude. Nas altas frequências, é melhor observado o efeito da depressão e conseguimos também delimitar as suas bordas. Especialmente na Figura 3.26, todas as frequências delimitaram as bordas mais baixas da depressão que são definidas nas posições -4 km e 4 km no eixo x a uma profundidade de 11 km.

Figura 3.24 – (a) Amplitude e (b) fase do campo elétrico para lâmina d'água de 10 km, transmissor em -12 km e frequências de 0,25, 0,50, 0,75 e 1,0 Hz.

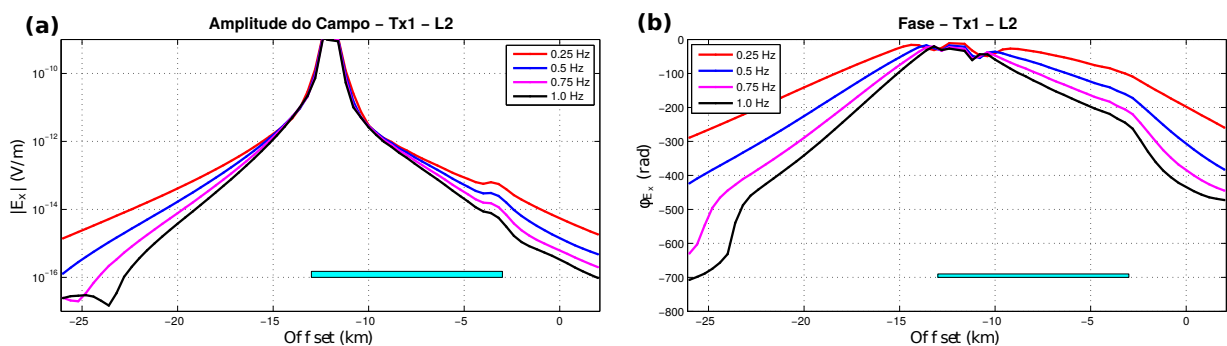


Figura 3.25 – (a) Amplitude e (b) fase do campo elétrico para lâmina d’água de 10 km, transmissor em -4 km e frequências de 0,25, 0,50, 0,75 e 1,0 Hz.

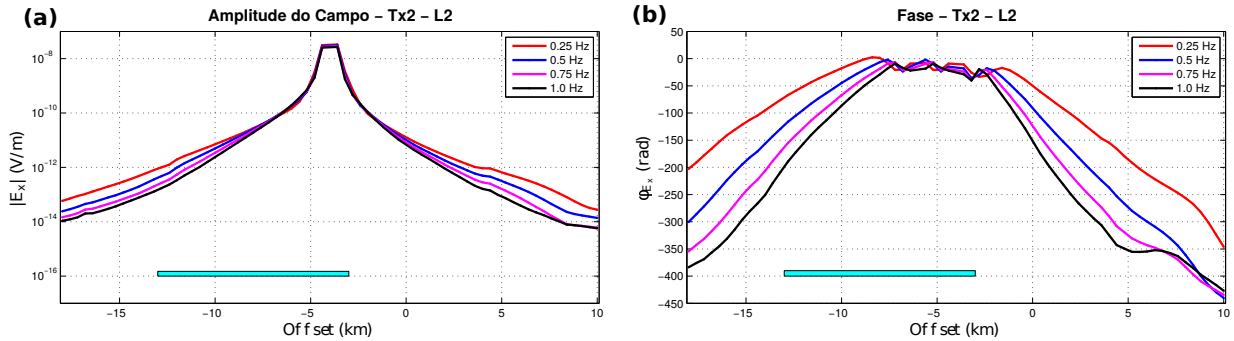
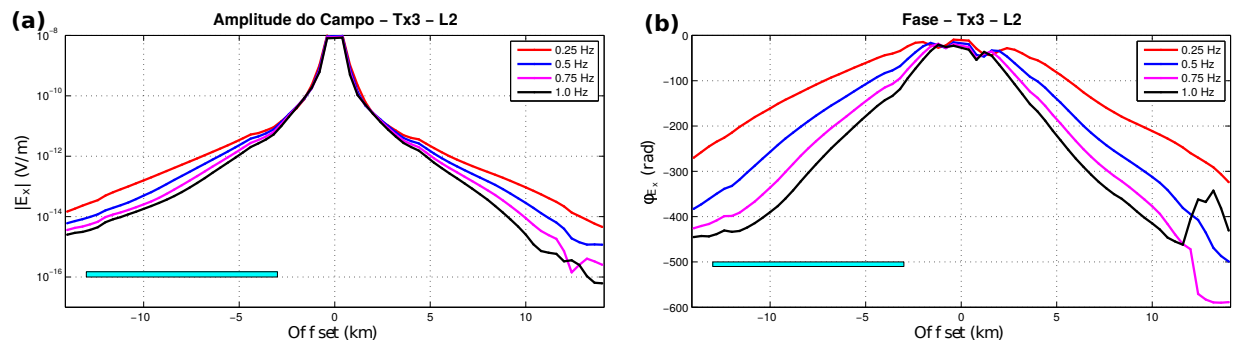


Figura 3.26 – (a) Amplitude e (b) fase do campo elétrico para lâmina d’água de 10 km, transmissor em 0 km e frequências de 0,25, 0,50, 0,75 e 1,0 Hz.



### 3.2.3 Efeito do reservatório na presença da batimetria

Nesta subseção, iremos analisar o efeito que a batimetria causa em dados de ambientes com a presença do reservatório. Para isso, utilizamos o modelo geológico da Figura 3.16 com lâmina d’água de 10 km em situações com a depressão e sem a depressão. Comparamos estas respostas com as respostas 1-D (sem reservatório e sem batimetria), que serviu de referência. Assim, adotaremos as três legendas: Nohc/Nodepr (preto), Hc/Nodepr (azul) e Hc/Depr (vermelho).

As Figuras 3.27 e 3.28 representam a amplitude e a fase do campo elétrico, respectivamente, adquiridas com o transmissor na posição -12 km para as quatro frequências de medida (0.25 Hz, 0.5 Hz, 0.75 Hz e 1 Hz). A assimetria da curva deve-se ao efeito da batimetria em conjunto com o do reservatório (curva em vermelho) quando comparada ao caso 1-D. A amplitude do campo cresce com o aumento da frequência. O mesmo comportamento pode ser esperado para a fase do campo elétrico, até mesmo com mais evidência.

Para as Figuras 3.29 e 3.30, adquiridas com o transmissor no 0 km para quatro frequências, observamos um aumento na amplitude do campo com o aumento na

freqüência. Ao compararmos com o 1-D, notamos também que a batimetria e o reservatório aumentam a amplitude do campo. Nestas figuras, conseguimos ainda delimitar as bordas mais baixas da depressão, situadas nas posições -4 km e 4 km no eixo x, e as bordas mais elevadas em -12 km e 12 km, especialmente nas frequências mais altas (0.75 Hz e 1 Hz). Um comportamento análogo se dá na fase do campo.

Nas figuras citadas acima, verificamos uma instabilidade numérica para grandes offset.

Figura 3.27 – Amplitude dos campos elétricos para os casos 1-D (preto), e para o reservatório com (vermelho) e sem (azul) a batimetria para lâmina d'água de 10 km e transmissor em -12 km nas frequências de (a) 0.25 Hz, (b) 0.50 Hz, (c) 0.75 Hz e (d) 1 Hz.

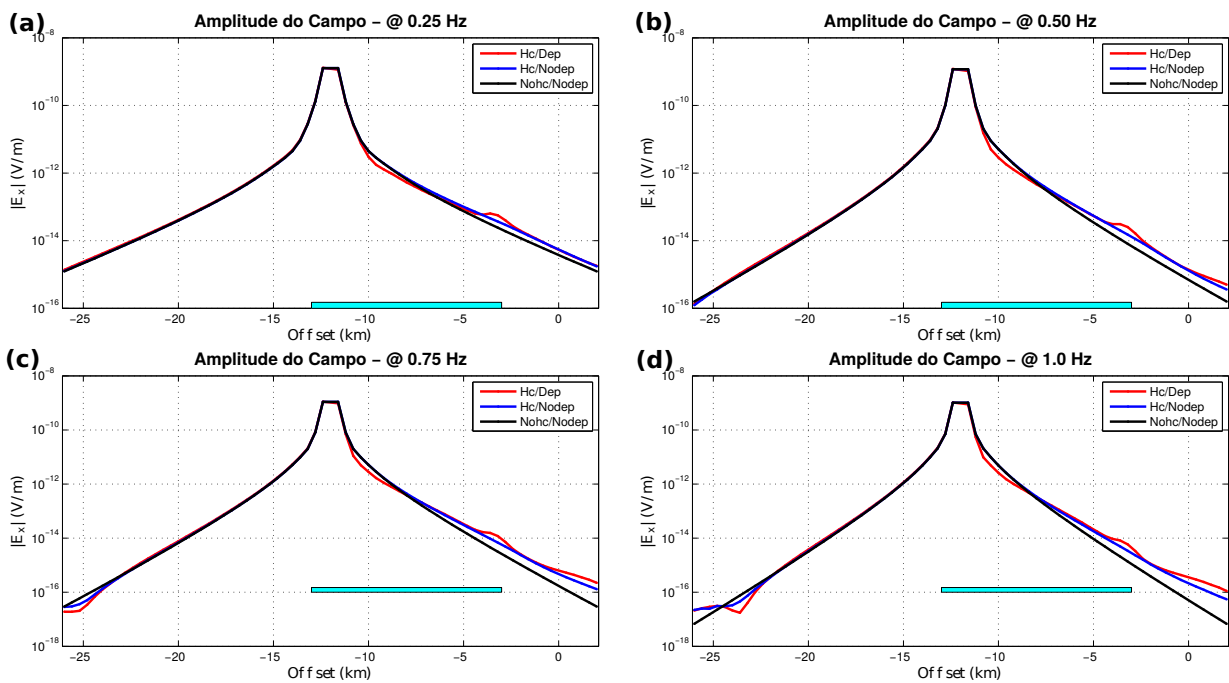


Figura 3.28 – Fase dos campos elétricos para os casos 1-D (preto), e para o reservatório com (vermelho) e sem (azul) a batimetria para lâmina d'água de 10 km e transmissor em -12 km nas frequências de (a) 0.25 Hz, (b) 0.50 Hz, (c) 0.75 Hz e (d) 1 Hz.

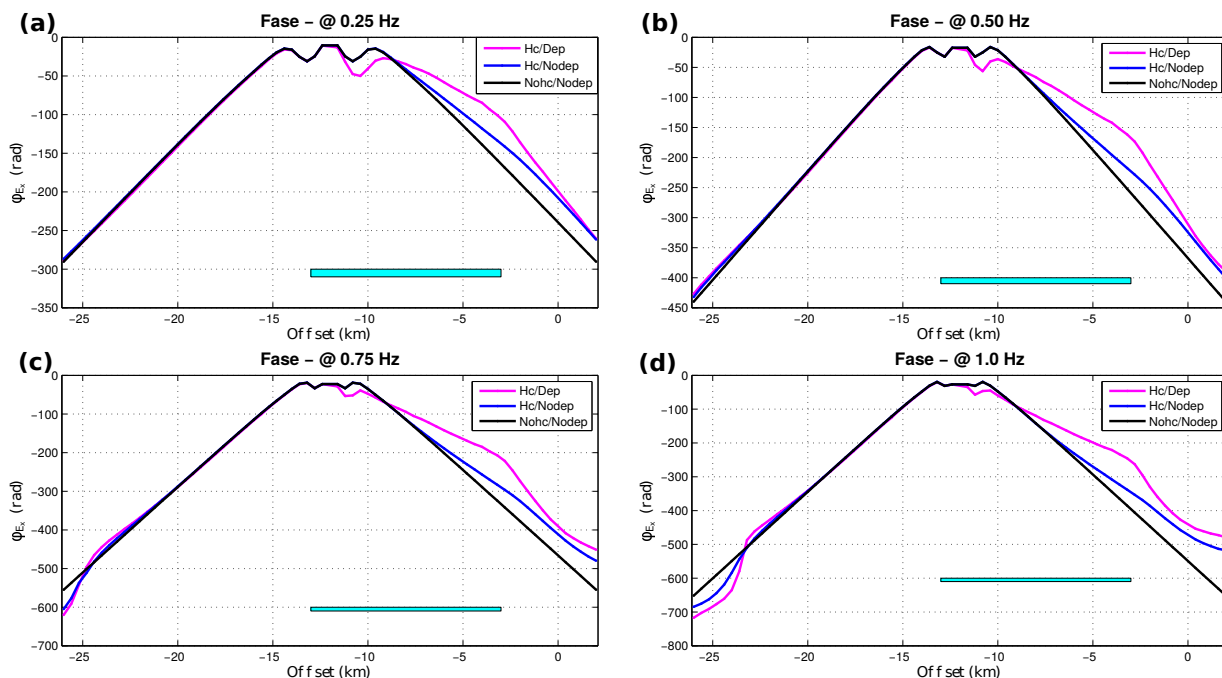


Figura 3.29 – Amplitude dos campos elétricos para os casos 1-D (preto), e para o reservatório com (magenta) e sem (azul) a batimetria para lâmina d'água de 10 km e transmissor em 0 km nas frequências de (a) 0.25 Hz, (b) 0.50 Hz, (c) 0.75 Hz e (d) 1 Hz.

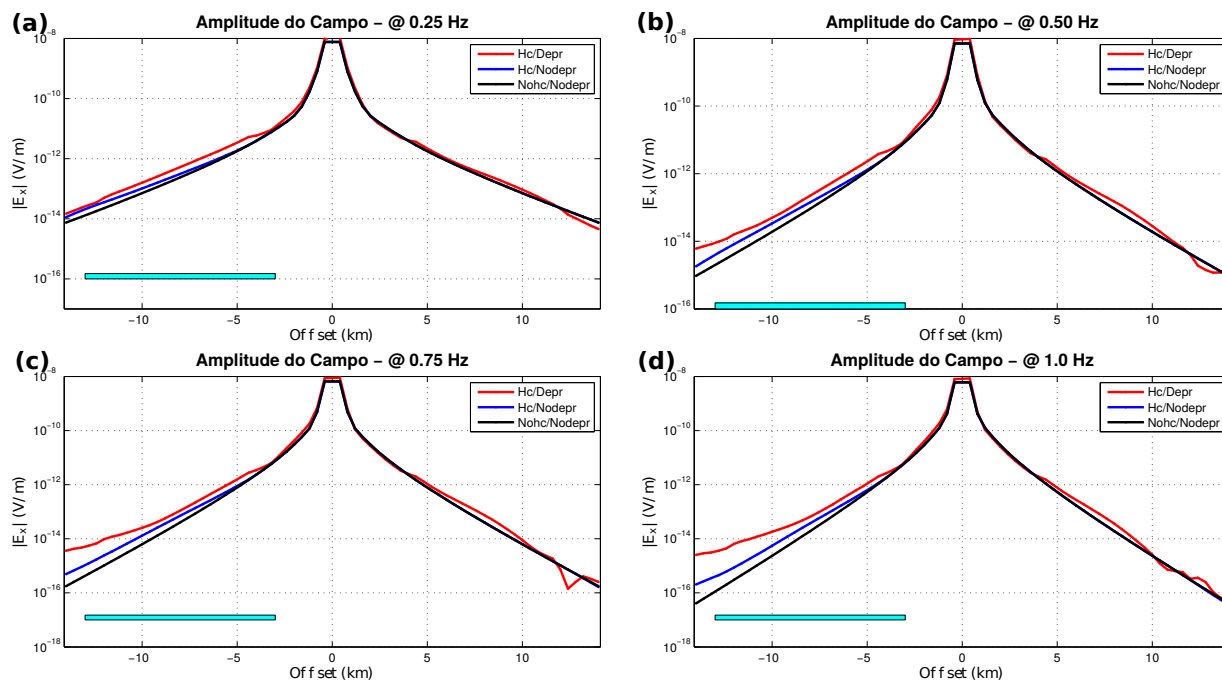
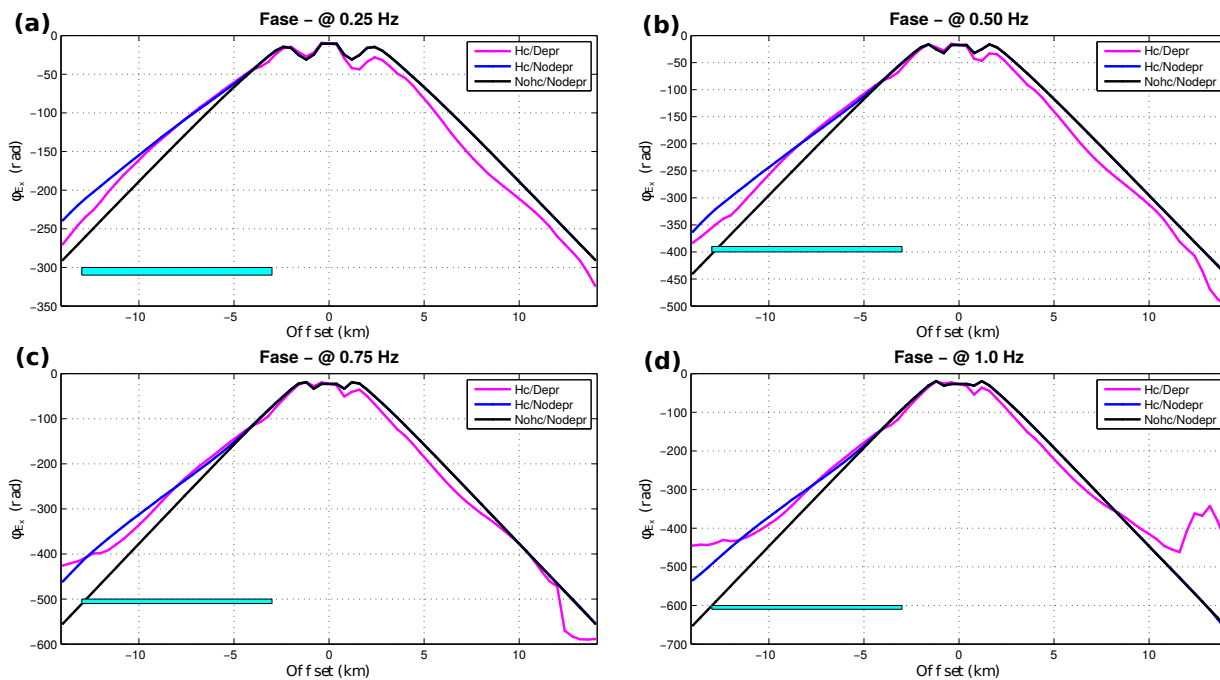


Figura 3.30 – Fase dos campos elétricos para os casos 1-D (preto), e para o reservatório com (magenta) e sem (azul) a batimetria para lâmina d'água de 10 km e transmissor em 0 km nas frequências de (a) 0.25 Hz, (b) 0.50 Hz, (c) 0.75 Hz e (d) 1 Hz.



## 4 CONCLUSÕES

O método MCSEM tem se mostrado uma ótima ferramenta na detecção e mapeamento de corpos resistivos *offshore*.

Na variação da frequência para os modelos com a presença da batimetria, seja ela a elevação ou a depressão, e do reservatório de hidrocarboneto, podemos notar a diminuição da amplitude e da fase do campo elétrico com o aumento da frequência. Outro ponto importante na variação da frequência para esses modelos foi perceber que em frequências mais altas podemos visualizar melhor as bordas da elevação enquanto que nas frequências mais baixas o efeito do reservatório é mais evidente.

Ao compararmos apenas a influência da batimetria sem o reservatório, observamos para o modelo 1, com clareza, a delimitação da elevação no topo e na base para todas as frequências. É o efeito que a elevação causa em ambientes sem reservatório aumenta com a frequência. Para o modelo 2, a amplitude diminuiu em relação ao modelo de referência, pois no início da depressão temos uma rampa que influencia na amplitude do dado.

Na análise do efeito da batimetria em modelos com o reservatório, pudemos observar como um possível reservatório por ser afetado pela presença da batimetria que causa um ligeiro aumento na amplitude do campo elétrico. Observamos o mesmo comportamento para a fase.

As frequências mais altas usadas realçam o efeito da batimetria e acabam camuflando o efeito do reservatório o que pode acarretar em interpretações equivocadas a respeito da subsuperfície. Portanto, é de extrema importância o estudo do efeito de diferentes tipos de batimetria para amenizar possíveis erros de interpretação.

A importância desse estudo faz necessário a sua ampliação considerando outros tipos de batimetrias em trabalhos futuros.

## REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, F. L. de; RIJO, L. Modelagem direta e inversa de dados mcsem 3d. *Revista Brasileira de Geofísica*, v. 29, n. 2, p. 289–308, 2011.
- ANDRÉIS, D.; MCGREGOR, L. Controlled-source eletromagnetic souding in shallow water: Principles and applications. *Geophysics*, v. 37, n. 1, p. F21–F32, 2008.
- ANNETTS, D. et al. *A deployment strategy for effective geophysical remote sensing of CO2 sequestration: Final report*. 2012. (<https://hub.globalccsinstitute.com/publications/42-electromagnetic-surveying-interpretation>). Accessed: 2017-01-20.
- CONSTABLE, S.; SRNKA, L. J. An introduction to marine controlled-source eletromagnetic methods for hydrocarbon exploration. *Geophysics*, v. 72, n. 2, p. WA3–WA12, 2007.
- EDWARDS, N. Marine controlled source eletromagnetics principles, metodologies, future commercial applications. *Survey in Geophysics*, v. 26, p. 675–700, 2005.
- EIDESMO, T. et al. Sea bed logging (sbl), a new method for remote and direct identification of hydrocarbon filled layers in deepwater areas. *Frist Break*, v. 20, p. 144–152, 2002.
- GRIBENKO, A.; ZHDANOV, M. Rigorous 3d inversion of marine csem data based on the integral equation method. *Geophysics*, v. 72, n. 2, p. WA73–WA84, 2007.
- LI, Y.; CONSTABLE, S. 2d marine controlled-source eletromagnetic modeling: Part 2 - the effect of bathymetry. *Geophysics*, v. 72, n. 2, p. WA63–WA71, 2007.
- OLIVEIRA, V. S. de. *Aplicação do método dos elementos finitos 3D na caracterização eletromagnética de motores de relutância variável com validação experimental*. Dissertação (Mestrado), 2013.
- REIS, A. T. M. *A Influência da Batimetria em Dados Sintéticos MCSEM 2-D*. [S.l.]: UFPA, 2016.
- SCHWARZBACH, C.; BÖRNER, R.-U.; SPITZER, K. 3-d simulation of the bathymetry effect for marine csem using adaptive finite elements. In: *SEG Technical Program Expanded Abstracts 2009*. [S.l.]: Society of Exploration Geophysicists, 2009. p. 674–678.
- SILVA, H. F. da. *Modelagem Nemérica de Dados MCSEM 2.5-D*. Dissertação (Mestrado), 2012.
- SOUZA, V. C. T. de. *Modelagem numérica de dados mCSEM 3D usando computação paralela*. Tese (Doutorado), 2007.

- STRACK, K. M. Future directions of eletromagnetic methods for hydrocarbon applications. *Survey Geophysics*, v. 35, p. 157–177, 2012.
- TEIXEIRA, V. S. C. *Projeto de motores a relutância variável e ferramenta computacional para a determinação das características estáticas da máquina*. Dissertação (Mestrado), 2008.
- UM, E. S.; ALUMBAUGH, D. L. Special section - marine controlled-source eletromagnetic methods on the physics of the marine controlled-source eletromagnetic method. *Geophysics*, v. 72, n. 2, p. WA13–WA26, 2007.
- YI-XIN, Y. et al. 3d finite element modeling of marine controlled-source electromagnetic fields using locally refined unstructured meshes. *CHINESE JOURNAL OF GEOPHYSICS-CHINESE EDITION*, SCIENCE PRESS 16 DONGHUANGCHENGGEN NORTH ST, BEIJING 100717, PEOPLES R CHINA, v. 59, n. 12, p. 4747–4758, 2016.
- YOSHIOKA, K.; ZHDANOV, M. S. Modeling large-scale geoelectrical structures with inhomogeneous backgrounds using the integral equation method: applications to the bathymetry effect study in marine csem data. In: *SEG Technical Program Expanded Abstracts 2005*. [S.l.]: Society of Exploration Geophysicists, 2006. p. 745–749.
- ZHDANOV, M. S.; LEE, S. K. Integral equation method for 3-d modeling of eletromagnetic fields in complex structures with inhomogeneous background conductivity in marine csem applications. In: *SEG Technical Program Expanded Abstracts 2005*. [S.l.]: Society of Exploration Geophysicists, 2005. p. 510–513.