



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

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

ADRIANY TIFFANY MOURA REIS

**A INFLUÊNCIA DA BATIMETRIA EM DADOS
SINTÉTICOS MCSEM 2-D**

**BELÉM – PARÁ
2016**

ADRIANY TIFFANY MOURA REIS

**A INFLUÊNCIA DA BATIMETRIA EM DADOS
SINTÉTICOS MCSEM 2-D**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Faculdade de Geofísica do Instituto de Geociências da
Universidade Federal do Pará -UFPA para a obtenção do
grau de Bacharel em Geofísica.
Orientador: Prof. Dr. Marcos Welby Correa Silva

**BELÉM – PARÁ
2016**

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

Reis, Adriany Tiffany Moura, 1994 -
A influência da batimetria em dados sintéticos MCSEM 2-D /
Adriany Tiffany Moura Reis. – 2016.
88 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, 2016.

1. Eletromagnetismo. 2. Triangle (Programa de
computador). 3. Frequência. 4. Mapas batimétricos. I.
Título.

CDD 22 ed. 537

ADRIANY TIFFANY MOURA REIS

**A INFLUÊNCIA DA BATIMETRIA EM DADOS
SINTÉTICOS MCSEM 2-D**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Geofísica do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará para a obtenção do grau de Bacharel em Geofísica.

Apresentado em: ___/___/_____

Conceito: _____

Banca Examinadora

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

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

Hilton Farias da Silva
Doutorando em Geofísica

Aos meus pais, Luiz Ricardo de Jesus Reis e Tereza Moura Reis, que me ampararam em todos os momentos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, que permitiu que tudo isso acontecesse, por ter me abençoado com saúde e força para superar as dificuldades, não somente ao longo de minha carreira acadêmica, mas também em todos os momentos de minha vida.

Agradeço a minha mãe, Tereza Reis, por todo seu amor, apoio e incentivo nas horas difíceis, de desânimo e cansaço, por ter me ensinado a acreditar e lutar por meus sonhos.

Ao meu pai, Luiz Ricardo Reis, por todo seu afeto e atenção, pela sua dedicação, auxílio, perseverança e apoio incondicional, e por sempre acreditar no meu sucesso.

A minha irmã, Lúcia Reis, pelos momentos de descontração, que de forma especial e carinhosa deu-me força nos momentos de dificuldade, e por entender que o futuro é construído a partir de constante de dedicação.

Aos meus tios e primos, que tanto me apoiaram ao longo desses quatro anos, compreendendo meus períodos de ausência, dedicados curso.

A Adriano Valente, que sempre caminhou ao meu lado e foi meu suporte nos momentos mais difíceis, dividindo sonhos, conquistas e desafios, me encorajando a alçar voos mais altos.

Aos meus amigos, que fizeram parte dessa jornada e continuarão presentes em minha vida.

Ao meu orientador, Prof.^o Dr.^o Marcos Welby Correa Silva, pela confiança, paciência, empenho e dedicação na construção desse trabalho.

Agradeço aos membros da secretaria pelo apoio dado ao longo desses quatro anos, em especial: Maria do Socorro Santos Silva, Klébeson Moura e a diretora Carolina Barros Silva.

A Universidade Federal do Pará, a Faculdade de Geofísica e ao corpo docente desta, que proporcionaram um ambiente agradável e prazeroso para a construção de novos conhecimentos.

Ao grupo de pesquisa de métodos eletromagnéticos.

Ao Programa de Educação Tutorial (PET-Geofísica).

RESUMO

O efeito da batimetria na modelagem 2,5-D ainda é pouco explorado e por muito tempo esta foi tratada como uma fonte de ruído com pouca influência nos dados do Marine Controlled- Source Electromagnetic Methods – MCSEM, o que levava a interpretações equivocadas e poços mal alocados no mercado de exploração de petróleo. Portanto, o objetivo deste trabalho é qualificar a influência de diferentes batimetrias em dados do MCSEM na presença e ausência de reservatório em várias frequências. Para tanto, implementamos uma malha não estruturada, desenvolvida no software livre Triangle, na modelagem numérica 2,5-D de dados do MCSEM. Ao compararmos o efeito da batimetria com dados sem reservatório comprovamos que esta comporta-se como um corpo anômalo e que quanto mais abrupta for, maior será a amplitude do campo elétrico, num ambiente com reservatório, a batimetria camufla o efeito deste, dando uma falsa impressão a cerca de sua amplitude, de modo que para batimetrias mais abruptas o ideal é utilizar uma frequência mais baixa no levantamento a fim realçar o efeito do reservatório, já para batimetrias mais suaves, o ideal é empregar uma frequência intermediária, para que se possa captar a influência do reservatório sem tantos ruídos devido a batimetria. Sendo assim, constatamos que o efeito da batimetria depende basicamente de sua inclinação e que para contorná-lo é necessário ajustar a frequência do levantamento, de modo que quanto mais informações tivermos a cerca da topografia do ambiente e melhor forem as técnicas de discretização do meio, mais eficazes serão as alternativas a fim de mitigar o efeito da batimetria.

Palavras-chave: Batimetria. MCSEM. Triangle. Malha não Estruturada. Inclinação. Frequência.

ABSTRACT

The effect of bathymetry on 2,5-D modeling is still underexplored and has long been treated as a source of noise with little influence on data of the Marine Controlled-Source Electromagnetic Methods - MCSEM, which led to misinterpretations and bad allocated wells in oil exploration market. Therefore, the objective of this study is to qualify the influence of different bathymetries in MCSEM data with and without reservoir at various frequencies. Thereunto, we implemented an unstructured mesh, developed in free software Triangle, in numerical modeling of 2,5-D MCSEM data. The comparison between the effect of bathymetry with no reservoirs data proved that it behaves as an anomalous body and that how much more abrupt is, greater the amplitude of the electric field will be, in an environment with reservoir, bathymetry conceals its effect, giving a false impression about its amplitude, so in more abrupt bathymetries is better the application of a lower frequency in the acquisition in order to enhance the effect of the reservoir, while for softer bathymetry, the ideal is to use an intermediate frequency, so you can perceive the influence of the reservoir without many noises due to bathymetry. Thus, we conclude that the effect of bathymetry depends basically of their slope and to circumvent it we need to adjust the frequency of the acquisition, so that the more information we have about the roughness of the environment and better the discretization techniques means more effective the alternatives to mitigate the effect of bathymetry will be.

Key words: Bathymetry. MCSEM. Triangle. Unstructured Mesh. Slope. Frequency.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

| | |
|---|----|
| Figura 2.1- Levantamento utilizando MCSEM..... | 17 |
| Figura 2.2- Modelo teórico 1-D..... | 19 |
| Figura 2.3- Espessura da lâmina d'água..... | 22 |
| Figura 2.4: Modelos HC com diferentes espessuras de lâmina d'água..... | 23 |
| Figura 2.5: Amplitude do campo elétrico – frequência 0,25 Hz..... | 24 |
| Figura 2.6: Amplitude do campo elétrico – frequência 0,5 Hz..... | 25 |
| Figura 2.7: Amplitude do campo elétrico – frequência 0,75 Hz..... | 26 |
| Figura 2.8: Fase do campo elétrico – frequência 0,25 Hz..... | 27 |
| Figura 2.9: Fase do campo elétrico – frequência 0,5 Hz..... | 28 |
| Figura 2.10: Fase do campo elétrico – frequência 0,75 Hz..... | 29 |
| Figura 2.11- Amplitude do campo elétrico – espessura da lâmina d'água 500 m..... | 30 |
| Figura 2.12: Amplitude do campo elétrico – espessura da lâmina d'água 1000 m..... | 31 |
| Figura 2.13: Amplitude do campo elétrico – espessura da lâmina d'água 1500 m..... | 31 |
| Figura 2.14: Amplitude do campo elétrico – espessura da lâmina d'água 2000 m..... | 32 |
| Figura 2.15: Fase do campo elétrico – espessura da lâmina d'água 500 m..... | 33 |
| Figura 2.16: Fase do campo elétrico – espessura da lâmina d'água 1000 m..... | 34 |
| Figura 2.17: Fase do campo elétrico – espessura da lâmina d'água 1500 m..... | 34 |
| Figura 2.18: Fase do campo elétrico – espessura da lâmina d'água 2000 m..... | 35 |
| Figura 3.1: Variação da Batimetria..... | 38 |
| Figura 3.2: Representação da malha de elementos finitos usando o software Triangle..... | 38 |
| Figura 3.3: Representação mais detalhada da discretização da malha de elementos finitos..... | 39 |

| | |
|--|----|
| Figura 4.1: Rampa com diferentes inclinações..... | 40 |
| Figura 4.2: Modelo de Referência..... | 41 |
| Figura 4.3: Efeito da Batimetria com uma variação de 1800 m (Amplitude do Campo Elétrico – frequência 0,25 Hz)..... | 41 |
| Figura 4.4: Efeito da Batimetria com uma variação de 1800 m (Amplitude do Campo Elétrico – frequência 0,5 Hz)..... | 43 |
| Figura 4.5: Efeito da Batimetria com uma variação de 1800 m (Amplitude do Campo Elétrico – frequência 0,75 Hz)..... | 44 |
| Figura 4.6: Efeito da Batimetria com uma variação de 1800 m (Fase do Campo Elétrico – frequência 0,25 Hz)..... | 45 |
| Figura 4.7: Efeito da Batimetria com uma variação de 1800 m (Fase do Campo Elétrico – frequência 0,5 Hz)..... | 46 |
| Figura 4.8: Efeito da Batimetria com uma variação de 1800 m (Fase do Campo Elétrico – frequência 0,75 Hz)..... | 47 |
| Figura 4.9: Efeito da Batimetria com uma variação de 1500 m (Amplitude do Campo Elétrico – frequência 0,25 Hz)..... | 48 |
| Figura 4.10: Efeito da Batimetria com uma variação de 1500 m (Amplitude do Campo Elétrico – frequência 0,5 Hz)..... | 49 |
| Figura 4.11: Efeito da Batimetria com uma variação de 1500 m (Amplitude do Campo Elétrico – frequência 0,75 Hz)..... | 50 |
| Figura 4.12: Efeito da Batimetria com uma variação de 1500 m (Fase do Campo Elétrico – frequência 0,25 Hz)..... | 51 |
| Figura 4.13: Efeito da Batimetria com uma variação de 1500 m (Fase do Campo Elétrico – frequência 0,5 Hz)..... | 52 |
| Figura 4.14: Efeito da Batimetria com uma variação de 1500 m (Fase do Campo Elétrico – frequência 0,75 Hz)..... | 53 |
| Figura 4.15: Efeito da Batimetria com uma variação de 1000 m (Amplitude do Campo Elétrico – frequência 0,25 Hz)..... | 54 |
| Figura 4.16: Efeito da Batimetria com uma variação de 1000 m (Amplitude do Campo Elétrico – frequência 0,5 Hz)..... | 55 |
| Figura 4.17: Efeito da Batimetria com uma variação de 1000 m (Amplitude do Campo Elétrico – frequência 0,75 Hz)..... | 56 |

| | |
|---|----|
| Figura 4.18: Efeito da Batimetria com uma variação de 1000 m (Fase do Campo Elétrico – frequência 0,25 Hz)..... | 57 |
| Figura 4.19: Efeito da Batimetria com uma variação de 1000 m (Fase do Campo Elétrico – frequência 0,5 Hz)..... | 58 |
| Figura 4.20: Efeito da Batimetria com uma variação de 1000 m (Fase do Campo Elétrico – frequência 0,75 Hz)..... | 58 |
| Figura 4.21: Efeito da Batimetria com uma variação de 500 m (Amplitude do Campo Elétrico – frequência 0,25 Hz)..... | 59 |
| Figura 4.22: Efeito da Batimetria com uma variação de 500 m (Amplitude do Campo Elétrico – frequência 0,5 Hz)..... | 60 |
| Figura 4.23: Efeito da Batimetria com uma variação de 500 m (Amplitude do Campo Elétrico – frequência 0,75 Hz)..... | 61 |
| Figura 4.24: Efeito da Batimetria com uma variação de 500 m (Fase do Campo Elétrico – frequência 0,25 Hz)..... | 62 |
| Figura 4.25: Efeito da Batimetria com uma variação de 500 m (Fase do Campo Elétrico – frequência 0,5 Hz)..... | 63 |
| Figura 4.26: Efeito da Batimetria com uma variação de 500 m (Fase do Campo Elétrico – frequência 0,75 Hz)..... | 63 |
| Figura 4.27: Efeito da Batimetria com uma variação de 200 m (Amplitude do Campo Elétrico – frequência 0,25 Hz)..... | 64 |
| Figura 4.28: Efeito da Batimetria com uma variação de 200 m (Amplitude do Campo Elétrico – frequência 0,5 Hz)..... | 65 |
| Figura 4.29: Efeito da Batimetria com uma variação de 200 m (Amplitude do Campo Elétrico – frequência 0,75 Hz)..... | 66 |
| Figura 4.30: Efeito da Batimetria com uma variação de 200 m (Fase do Campo Elétrico – frequência 0,25 Hz)..... | 66 |
| Figura 4.31: Efeito da Batimetria com uma variação de 200 m (Fase do Campo Elétrico – frequência 0,5 Hz)..... | 67 |
| Figura 4.32: Efeito da Batimetria com uma variação de 200 m (Fase do Campo Elétrico – frequência 0,75 Hz)..... | 68 |
| Figura 4.33: Efeito da Variação da Batimetria na Amplitude do Campo Elétrico (Frequência de 0,25 Hz)..... | 69 |
| Figura 4.34: Efeito da Variação da Batimetria na Fase do Campo Elétrico | |

| | |
|---|----|
| (Frequência de 0,25 Hz)..... | 70 |
| Figura 4.35: Efeito da Variação da Batimetria na Amplitude do Campo Elétrico (Frequência de 0,5 Hz)..... | 71 |
| Figura 4.36: Efeito da Variação da Batimetria na Fase do Campo Elétrico (Frequência de 0,5 Hz)..... | 72 |
| Figura 4.37: Efeito da Variação da Batimetria na Amplitude do Campo Elétrico (Frequência de 0,75 Hz)..... | 72 |
| Figura 4.38: Efeito da Variação da Batimetria na Fase do Campo Elétrico (Frequência de 0,75 Hz)..... | 73 |
| Figura 4.39: Efeito do Reservatório num Ambiente com Variação de Batimetria de 200 m (Amplitude do Campo Elétrico – frequência de 0,25 Hz)..... | 74 |
| Figura 4.40: Efeito do Reservatório num Ambiente com Variação de Batimetria de 200 m (Amplitude do Campo Elétrico – frequência de 0,5 Hz)..... | 75 |
| Figura 4.41: Efeito do Reservatório num Ambiente com Variação de Batimetria de 200 m (Amplitude do Campo Elétrico – frequência de 0,75 Hz)..... | 76 |
| Figura 4.42: Efeito do Reservatório num Ambiente com Variação de Batimetria de 200 m (Fase do Campo Elétrico – frequência de 0,25 Hz)..... | 77 |
| Figura 4.43: Efeito do Reservatório num Ambiente com Variação de Batimetria de 200 m (Fase do Campo Elétrico – frequência de 0,5 Hz)..... | 78 |
| Figura 4.44: Efeito do Reservatório num Ambiente com Variação de Batimetria de 200 m (Fase do Campo Elétrico – frequência de 0,75 Hz)..... | 79 |
| Figura 4.45: Efeito do Reservatório num Ambiente com Variação de Batimetria de 500 m (Amplitude do Campo Elétrico – frequência de 0,25 Hz)..... | 80 |
| Figura 4.46: Efeito do Reservatório num Ambiente com Variação de Batimetria de 500 m (Amplitude do Campo Elétrico – frequência de 0,5 Hz)..... | 81 |

| | |
|---|----|
| Figura 4.47: Efeito do Reservatório num Ambiente com Variação de Batimetria de 500 m (Amplitude do Campo Elétrico – frequência de 0,75 Hz)..... | 81 |
| Figura 4.48: Efeito do Reservatório num Ambiente com Variação de Batimetria de 500 m (Fase do Campo Elétrico – frequência de 0,25 Hz)..... | 82 |
| Figura 4.49: Efeito do Reservatório num Ambiente com Variação de Batimetria de 500 m (Fase do Campo Elétrico – frequência de 0,5 Hz)..... | 83 |
| Figura 4.50- Efeito do Reservatório num Ambiente com Variação de Batimetria de 500 m (Fase do Campo Elétrico – frequência de 0,75 Hz)..... | 84 |

SUMÁRIO

| | |
|---|-----------|
| 1. INTRODUÇÃO..... | 14 |
| 2. MCSEM 1-D..... | 17 |
| 2.1. Resultados do efeito da espessura da lâmina d'água nos campos do MCSEM 1-D..... | 22 |
| 2.2. Resultados do efeito da frequência nos campos do MCSEM 1-D... | 29 |
| 3. MCSEM 2,5-D..... | 36 |
| 3.1. Batimetria na modelagem 2,5-D..... | 37 |
| 4. RESULTADOS DO EFEITO DA BATIMETRIA NA MODELAGEM 2,5-D..... | 40 |
| 4.1. Efeito do reservatório na modelagem de ambientes com batimetria..... | 74 |
| 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS..... | 85 |
| REFERÊNCIAS..... | 87 |

1. INTRODUÇÃO

No início de sua utilização, o Método Eletromagnético Marinho de Fonte Controlada (Marine Controlled- Source Electromagnetic Methods – MCSEM) era restrito ao âmbito acadêmico, a fim de que os dados obtidos por meio deste pudessem complementar os resultados obtidos pelo método Magnetotelúrico (MT) em regiões rasas e resistivas da crosta oceânica. Segundo Constable e Srnka (2007), o MCSEM era um método de corrente contínua ideal para o estudo da litosfera oceânica rasa e para a identificação de minas oceânicas, entretanto, o fato de existirem poucas minas oceânicas e de elas serem economicamente inviáveis, levou o método a um breve desuso.

Ainda segundo Constable e Srnka (2007), os resultados obtidos por meio do MCSEM passaram a ser do interesse da U. S. Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA) e do U. S. Office of Naval Research (ONR), que financiaram pesquisas a fim de obterem mais informações a cerca dos ruídos causados pelo fundo do mar e solucionarem problemas associados à interferência do assoalho oceânico na comunicação de submarinos. Para tanto, o método passou a integrar o conjunto de métodos que utiliza fontes de corrente alternada.

Apenas no final da década de 70 e início dos anos 80 o método MCSEM começou a ser estruturado para a aplicação que tem hoje, a exploração de hidrocarbonetos. Segundo Constable (2006), Charles Cox, da Scripps Institution of Oceanography, foi quem desenvolveu o transmissor elétrico horizontal e os receptores utilizados em levantamentos empregando o MCSEM. O primeiro experimento empregando o MCSEM com esta finalidade foi realizado no oceano Pacífico em 1979 (SPIESS et al., 1971; YOUNG; COX, 1981 apud CONSTABLE ; SRNKA, 2007).

Segundo Constable e Srnka (2007), em meados de 1980, Martin Sinba e seu grupo de pesquisa da University of Cambridge, desenvolveram uma antena transmissora naturalmente flutuante, ideal para contornar as irregularidades do assoalho oceânico, em 2000 Yuan e Edwards desenvolveram um sistema elétrico dipolo-dipolo no domínio do tempo pra pequenos afastamentos para a caracterização de hidratos de gás.

Segundo Constable (2006) e Constable e Srnka (2007), no final do século XX o mercado da exploração do petróleo sofreu uma reviravolta, a exploração em águas profundas representava um desafio, pois nesses ambientes a sísmica perdia resolução e a perfuração de poços era cara, sendo assim, o emprego de outros métodos, cujos dados implicassem na diminuição do risco exploratório, se fazia essencial; e foi nesse contexto que as empresas Statoil e ExxonMobil foram as pioneiras no uso do método CSEM como uma ferramenta de mapeamento de reservatórios de hidrocarboneto em águas profundas (cerca de 1000 m ou mais).

Conforme já relatado por Constable (2006), sedimentados saturados por óleo ou gás possuem uma resistividade da ordem de 100 ohm.m ou mais, enquanto que sedimentos saturados por água possuem uma resistividade da ordem de 1 ohm.m, portanto “a habilidade de determinar a resistividade de alvos profundos de perfuração a partir do assoalho oceânico pode tornar o marinho CSEM a mais importante técnica geofísica a surgir desde a sísmica de reflexão 3D” (CONSTABLE; SRNKA, 2007).

Desde então, diversos trabalhos de modelagem têm sido desenvolvidos a fim de ampliar os conhecimentos a cerca do método diante de diferentes situações, entretanto, a maioria destas considera o assoalho oceânico plano, assumindo que as possíveis irregularidades do mesmo seriam apenas mais uma fonte de ruído, que quando comparada com o sinal devido às estruturas geológicas da subsuperfície seria irrelevante. Porém, para Li e Constable (2007), esta consideração é válida apenas no âmbito acadêmico, pois no caso das aplicações comerciais do MCSEM, o efeito da batimetria “pode conduzir a interpretações equivocadas a cerca das estruturas em subsuperfície, resultando em perdas de oportunidade ou poços mal alocados” (LI; CONSTABLE, 2007). Na literatura, os primeiros trabalhos incluindo o efeito da batimetria utilizavam diferenças finitas (FD), de modo que a geometria da batimetria era simulada por uma série de pequenos degraus, dentre esses trabalhos podemos citar o de Um (2005) no qual é simulada uma resposta devido a uma falésia por de um código FD 3-D e os trabalho de MacGregor (1997) no qual uma malha de elementos finitos (FE) é distorcida a fim de modelar a topografia do assoalho oceânico, de modo que mais tarde, em 2001, ela “incorporou uma versão modificada do código de FE de Unsworth et al. (1993) numa inversão Occam que incluía a topografia ao longo da dorsal meso-oceânica” (LI; CONSTABLE, 2007).

Num trabalho mais recente, o artigo de Li e Constable (2007) avalia o efeito da batimetria nas componentes elétrica e magnética.

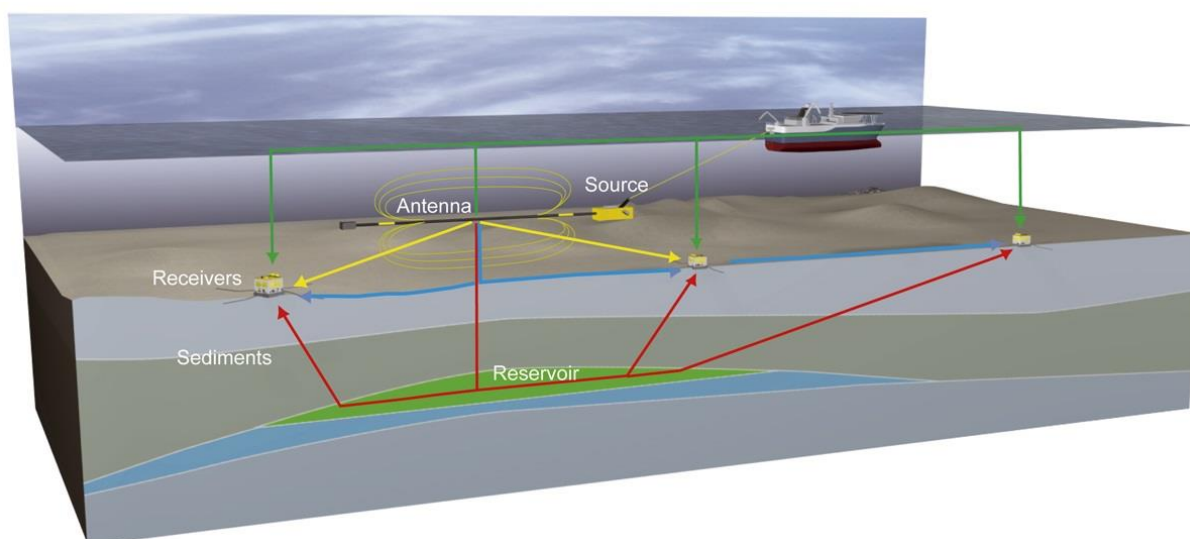
Em relação à modelagem feita no Programa de Pós-graduação em Geofísica da UFPA, podemos citar o trabalho pioneiro do Professor Luiz Rijo ao implementar e disponibilizar a EGS, uma plataforma de modelagem em ambiente Windows cujo um dos módulos 2D era voltado ao MCSEM. Outros trabalhos voltados a este tema foram, a dissertação de mestrado de Silva (2012), na qual é feita a modelagem numérica de dados MCSEM 2,5-D por meio de elementos finitos de um meio horizontalmente estratificado, em uma malha estruturada de nós (grid) e a tese de doutorado de Santos (2014), onde é mostrada a formulação do problema 2.5-D para ambientes com anisotropia.

Neste Trabalho de Conclusão de Curso, utilizamos o programa de Silva (2012) para avaliar os efeitos de diferentes batimetrias em dados MCSEM 2,5-D na presença de reservatório de hidrocarbonetos e analisar o comportamento destas frente a diferentes frequências, visando caracterizar tais reservatórios nestes ambientes geológicos mais complexos, por meio da implementação de uma malha não-estruturada de elementos finitos.

2. MCSEM 1-D

“Os métodos eletromagnéticos baseiam-se em dois fenômenos físicos fundamentais: eletricidade e magnetismo” (LUIZ; SILVA, 1983, p. 193). Nos levantamentos que empregam o MCSEM faz-se uma corrente alternada circular no transmissor móvel localizado próximo ao assoalho oceânico, gerando um campo magnético nas vizinhanças do mesmo, que se propaga ao longo do ambiente condutivo, que inclui a subsuperfície e a própria lâmina d’água, induzindo nas estruturas resistivas em subsuperfície uma força eletromotriz, a qual é proporcional à corrente por meio de uma constante conhecida como indutância. Essas correntes geram um novo campo, que é o campo magnético secundário, o qual é captado pelos receptores localizados no fundo do mar e guarda informações sobre as estruturas em subsuperfície, como mostra a Figura 2.1 a seguir, e aplicando a lei de Ohm, obtemos a corrente que circula nas mesmas.

Figura 2.1- Levantamento utilizando MCSEM



Fonte: EMGS (2016)

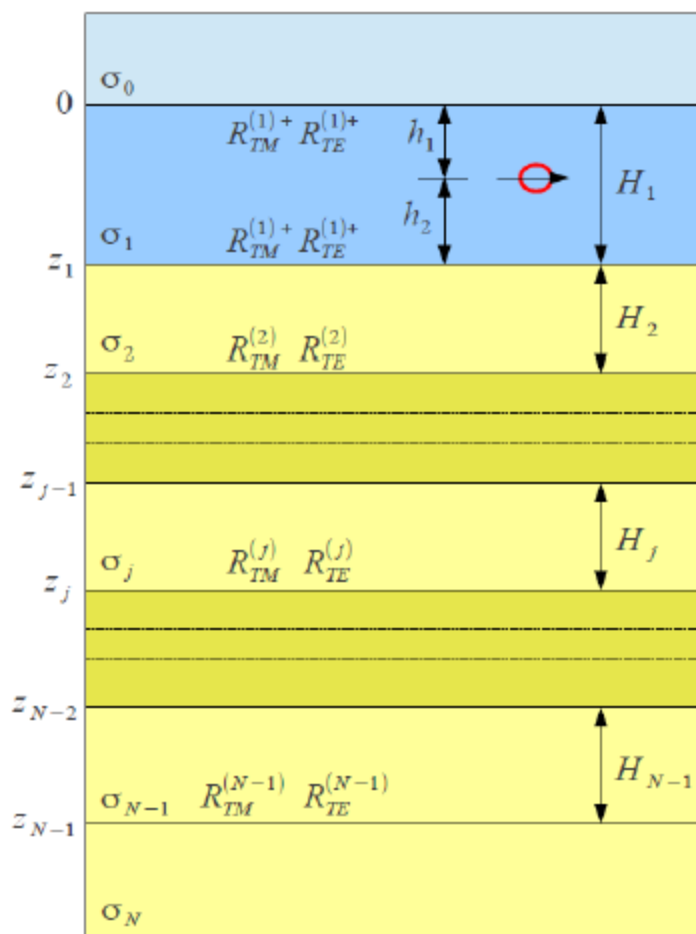
Segundo Luiz e Silva (1983), os campos primário e secundário, possuem a mesma frequência ($\omega/2\pi$), mas diferem em fase e em amplitude, visto que a amplitude corresponde ao máximo valor alcançado pela intensidade do campo quando este oscila numa dada frequência, e a diferença de fase se deve ao atraso entre os tempos de chegada dos campos.

Na implementação da modelagem numérica do MCSEM, um transmissor móvel localizado próximo ao fundo do mar, implica em dispormos transmissores em diferentes posições, os quais irão induzir nos receptores, respostas diferentes,

entretanto neste trabalho estaremos utilizando um transmissor fixo, ou seja, apenas uma posição de transmissor. Conforme relatado por Silva (2012), o ponto de partida para a modelagem numérica do MCSEM são as equações de Maxwell e as equações constitutivas, nas quais adotaremos as permissividades elétrica e magnética iguais a permissividade elétrica e magnética no vácuo, respectivamente, de modo que apenas a condutividade elétrica terá a liberdade de variar em duas direções, x e z , se considerarmos o eixo cartesiano.

O modelo teórico 1-D adotado para o MCSEM a fim de que este sirva de modelo de referência para futuras comparações representa um meio estratificado formado por n camadas horizontais, homogêneas e isotrópicas cujas discontinuidades nas propriedades elétricas estarão ao longo da direção do eixo Z , de modo que semi-espaço superior representa o ar, com condutividade σ_0 , a camada imediatamente abaixo representa o mar, com condutividade σ_1 e espessura H_1 , na qual está localizada a fonte, e o meio abaixo desta é composto por n camadas plano-paralelas que representam a subsuperfície, com suas respectivas espessuras e condutividades, como representado da Figura 2.2 a seguir:

Figura 2.2: Modelo teórico 1-D



Fonte: SILVA (2012)

O processo de aquisição de medidas e propagação dos campos se dá da seguinte maneira: considerando que os campos eletromagnéticos são 3D, o transmissor emite uma energia que se propaga em todas as direções, parte dela é transmitida diretamente para os receptores através da lâmina d'água, parte se propaga ao longo do mar até atingir a interface mar-ar, onde sofre processos de transmissão e reflexão, de modo que este último é registrado nos receptores; parte desta mesma energia também se propaga ao longo da subsuperfície, que por ser composta por diversas camadas com propriedades diferentes, ocorrem sucessivos processos de transmissão e reflexão, que é registrada nos receptores, até a completa atenuação da energia. Na presença de um reservatório de hidrocarboneto, os processos de reflexão registrados nos receptores irão apresentar um comportamento anômalo que possibilita sua detecção.

Vale ressaltar que na modelagem desenvolvida neste trabalho estamos considerando a geometria de levantamento *in-line*, na qual o transmissor está

disposto da direção do eixo x bem como os receptores, deste modo o campo medido será puramente radial.

No decorrer da modelagem, há momentos em utilizamos modelos com e sem reservatório, “o modelo teórico sem a camada reservatório denominaremos de modelo noHC ou de referência e com o reservatório denominaremos de modelo HC” (SOUZA, 2007, p.29 apud SILVA, 2012, p. 34).

A modelagem implementada neste trabalho segue os mesmo parâmetros adotados por Silva, 2012, onde os campos eletromagnéticos no domínio 1-D foram desenvolvidos a partir das equações de Maxwell no domínio da frequência, sendo assim “para obtermos as leis de Faraday e Ampère no domínio da frequência faremos uso da transformada de Fourier (WARD; HOHMANN, 1988 apud SILVA, 2012)”.

Vale ressaltar que os campos elétrico e magnético que compõem as leis de Faraday e Ampère são fruto de um acoplamento de fontes elétricas e magnéticas, sendo assim o campo eletromagnético é formado por um par de funções vetoriais devido às fontes magnéticas $[E_m, H_m]$ e outro par devido às fontes elétricas $[E_e, H_e]$, de modo que a densidade de corrente elétrica \mathbf{J} é zero para as fontes magnéticas e a densidade de corrente magnética \mathbf{M} é zero para as fontes elétricas.

Estes campos também podem ser decompostos nos campos gerados devido a fontes primárias, que é o campo elétrico emitido pela fonte, e nos campos gerados devido a fontes secundárias, que se originam das correntes dentro das heterogeneidades, que, por sua vez, dependem do campo primário.

Sabendo disso, as expressões para o campo primário podem ser resolvidas com o auxílio dos potenciais de Schelkunoff, enquanto que as expressões para o campo secundário podem ser reduzidas à lei de Faraday e à lei de Ampère (SILVA, 2012).

Os potenciais de Schelkunoff são utilizados para solucionar os campos primários e mostrar a relação destes com os campos potenciais devido ao modo Transversal Elétrico (TE) ao modo Transversal Magnético (TM) (SILVA, 2012).

Segundo Nabighian (2008, p. 948) no modo TM a componente do campo magnético na direção y é transversal à direção do eixo z e as correntes elétricas fluem em “loops” ao longo do plano vertical xz, estas são as componentes do campo elétrico ao longo das direções x e z. Já no modo TE a componente do campo

elétrico na direção do eixo y é transversal à direção do eixo z , de modo que as correntes elétricas fluem ao longo do plano horizontal xy , logo, ao longo dos eixos x e z há a propagação de campos magnéticos.

Ainda segundo Nabighian (2008, p. 948), essa diferença nos modos de propagação dos campos eletromagnéticos está diretamente associada às diferentes sensibilidades dos modos, por exemplo, imaginemos uma camada isolante horizontal em meio à subsuperfície, enquanto os modos TM são fortemente afetados por zonas de baixa condutividade, por serem incapazes de penetrar nelas de modo eficaz, os modos TE são insensíveis a estas regiões, devido à sua natureza indutiva. Entretanto, ambos os modos são influenciados por materiais de elevada condutividade.

Como a fonte eletromagnética utilizada no método MCSEM é um Dipolo Elétrico Horizontal - DEH, ele permite a propagação dos modos TE e TM ao mesmo tempo, de modo que o campo eletromagnético resultante é dado pela soma desses dois modos de propagação. Este tipo de fonte “possibilita a redução da equação diferencial vetorial a uma equação diferencial escalar” (SILVA, 2012), de modo que é possível determinar os potenciais devido a cada modo para cada camada, e de posse das relações destes com os campos elétrico e magnético, obtemos as componentes de cada um desses campos para cada interface. O desenvolvimento matemático dos potenciais encontra-se em Silva (2012).

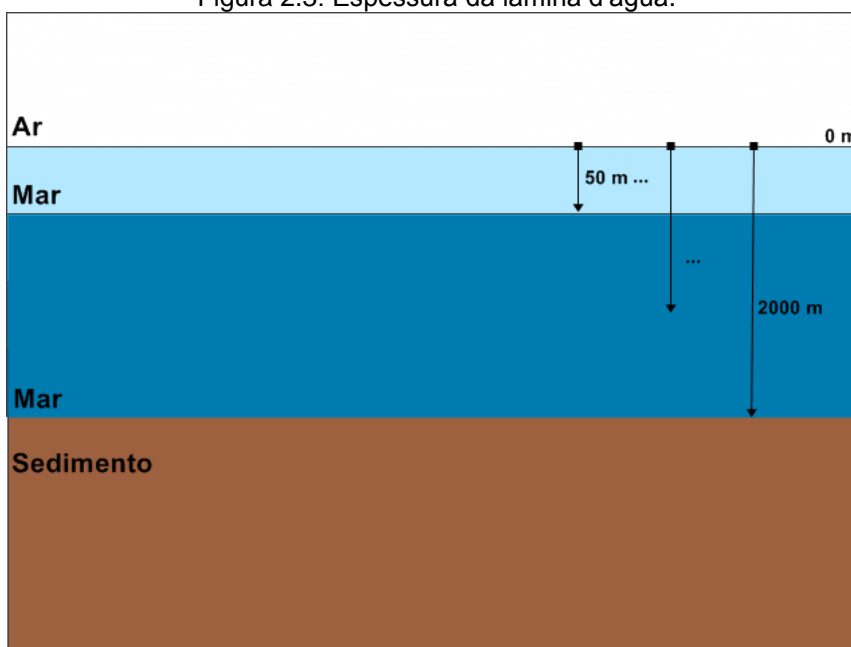
Por fim é possível recuperar os campos elétrico e magnético totais somando os campos elétrico e magnético primários, obtidos por meio dos potenciais de Schelkunoff, aos campos elétrico e magnético secundários reduzidos às leis de Faraday e Ampère.

“Na modelagem do MCSEM 2.5-D além de apresentarmos os campos no domínio (x, y, z) , precisaremos dos campos elétricos no domínio (x, k_y, z) que serão utilizados como fonte na solução do problema de elementos finitos 2-D” (SILVA, 2012). Sendo que, para substituímos os potenciais nas expressões das componentes do campo elétrico é necessário aplicar a transformada inversa de Hankel, visto que o integrando apresenta simetria circular e para a implementação dessas integrais foi utilizada a técnica de filtros digitais lineares, descrita em (ALMEIDA, 2002 apud SILVA 2012, p.32), de modo que o filtro utilizado para implementar numericamente a transformada de Hankel apresenta 401 abcissas.

2.1.RESULTADOS DO EFEITO DA ESPESSURA DA LÂMINA D'ÁGUA NOS CAMPOS MCSEM 1-D

A fim de analisarmos o comportamento de dados MCSEM em diferentes situações simulamos a aquisição de dados em ambientes com de diferentes espessuras de lâmina d'água, para que estes possam ser utilizados futuramente como modelos de referência para os campos 2-D, nos quais analisaremos o efeito da batimetria frente às mesmas espessuras de lâmina d'água sobre o sinal referente à influência do reservatório, um esboço dos modelos 1-D, sem reservatório de hidrocarboneto, utilizado está representado na Figura 2.3 a seguir

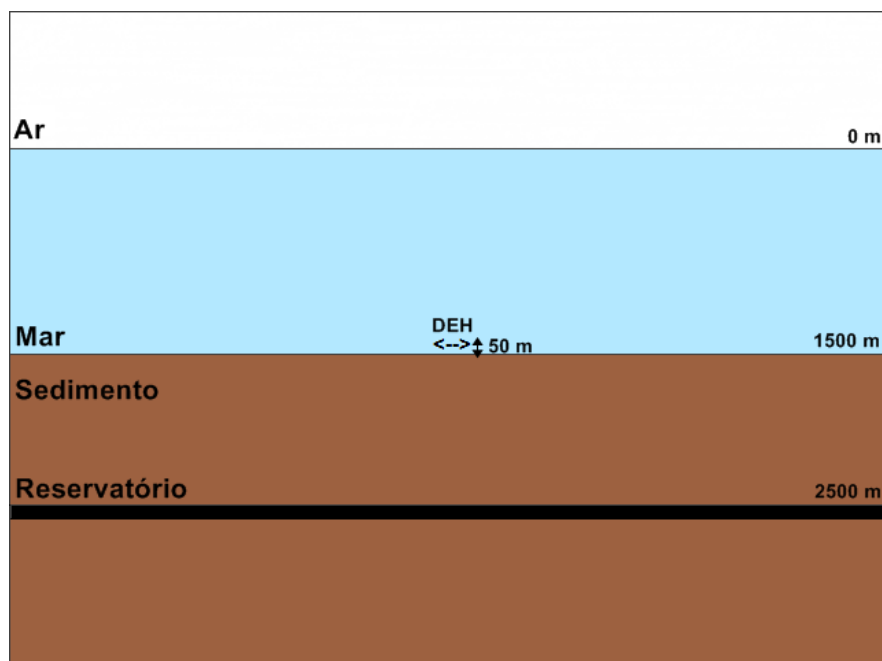
Figura 2.3: Espessura da lâmina d'água.



Fonte: Do autor (2016)

e um esboço do modelo 1-D, com reservatório de hidrocarboneto, utilizado está representado na Figura 2.4 a seguir

Figura 2.4: Modelos HC com diferentes espessuras de lâmina d'água.

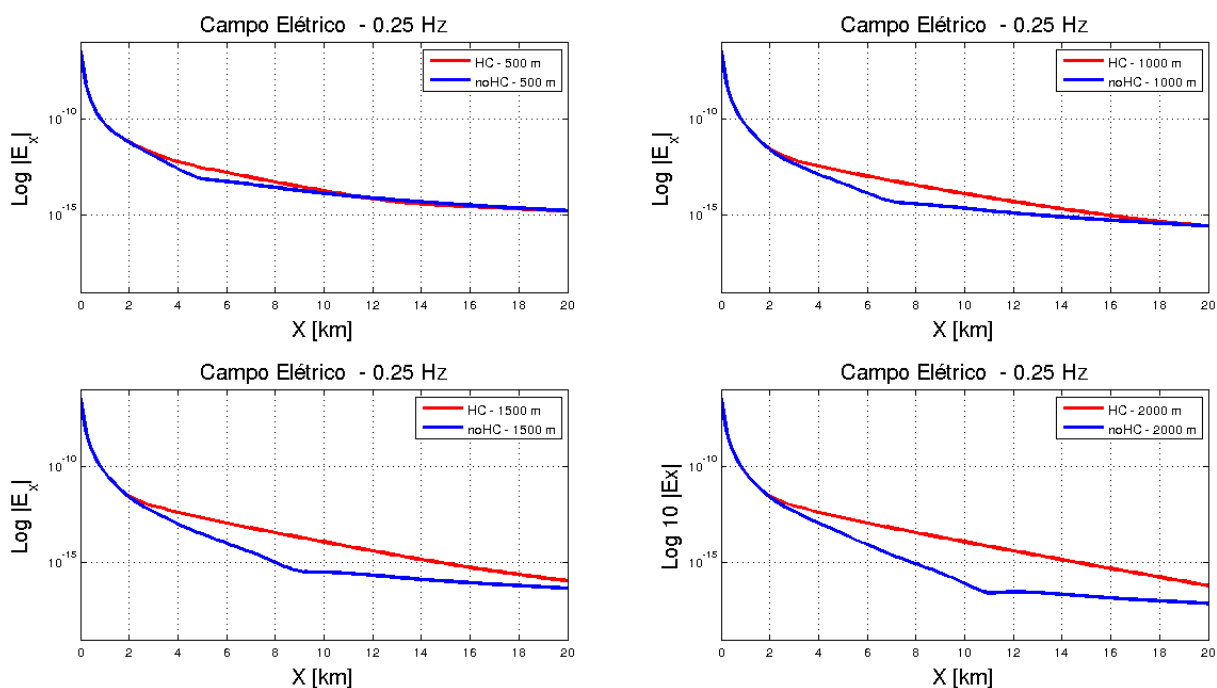


Fonte: Do autor (2016)

Ao analisarmos estes campos é válido ressaltar que estes irão variar naturalmente de acordo com o espaçamento entre a fonte e o receptor devido a propagação do campo emitido pela fonte, isso porque os receptores mais próximos à fonte irão captar o campo que se propaga diretamente da fonte para o receptor através da lâmina d'água e dos sedimentos mais rasos. Já os receptores localizados na porção intermediária serão responsáveis pelo sinal das respostas geradas devido às anomalias galvânicas e indutivas geradas pelas estruturas em subsuperfície. Já o sinal captado pelos receptores localizados na porção mais distal será dominado pelas *air-waves*, conforme já constatado por Um e Alumbaugh (2007).

Sabendo disso, a Figura 2.5 a seguir ilustra a variação da amplitude do campo elétrico devido a variação da espessura da lâmina d'água para a frequência de 0,25 Hz

Figura 2.5: Amplitude do campo elétrico – frequência 0,25 Hz.

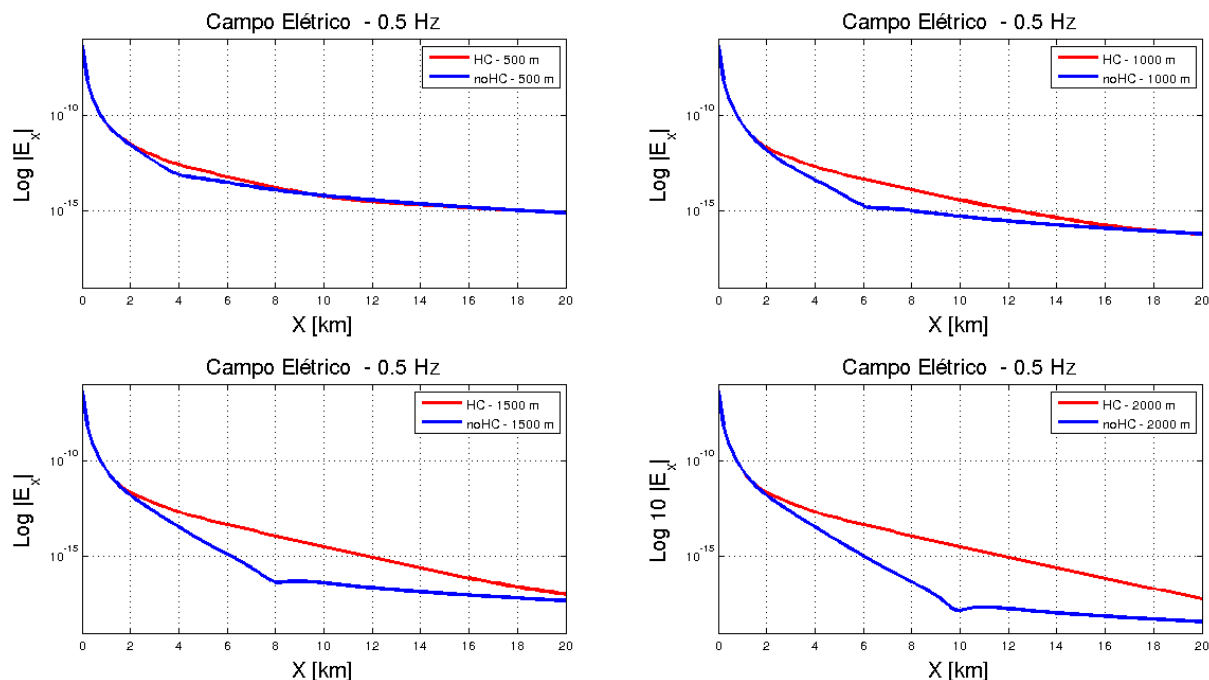


Fonte: Do autor (2016)

Como podemos perceber, a porção inicial do sinal em todos os casos permanece aproximadamente constante, enquanto que a extensão da porção intermediária, dominada pela resposta gerada devido às estruturas em subsuperfície, a amplitude do campo aumenta gradativamente de acordo com o aumento da espessura da lâmina d'água, tornando a região dominada pelas ondas planas cada vez mais distante, isso porque com lâmina d'água mais profunda o sinal é mais atenuado.

A Figura 2.6 a seguir ilustra a variação da amplitude do campo elétrico devido a variação da espessura da lâmina d'água para a frequência de 0,5 Hz

Figura 2.6: Amplitude do campo elétrico – frequência 0,5 Hz.

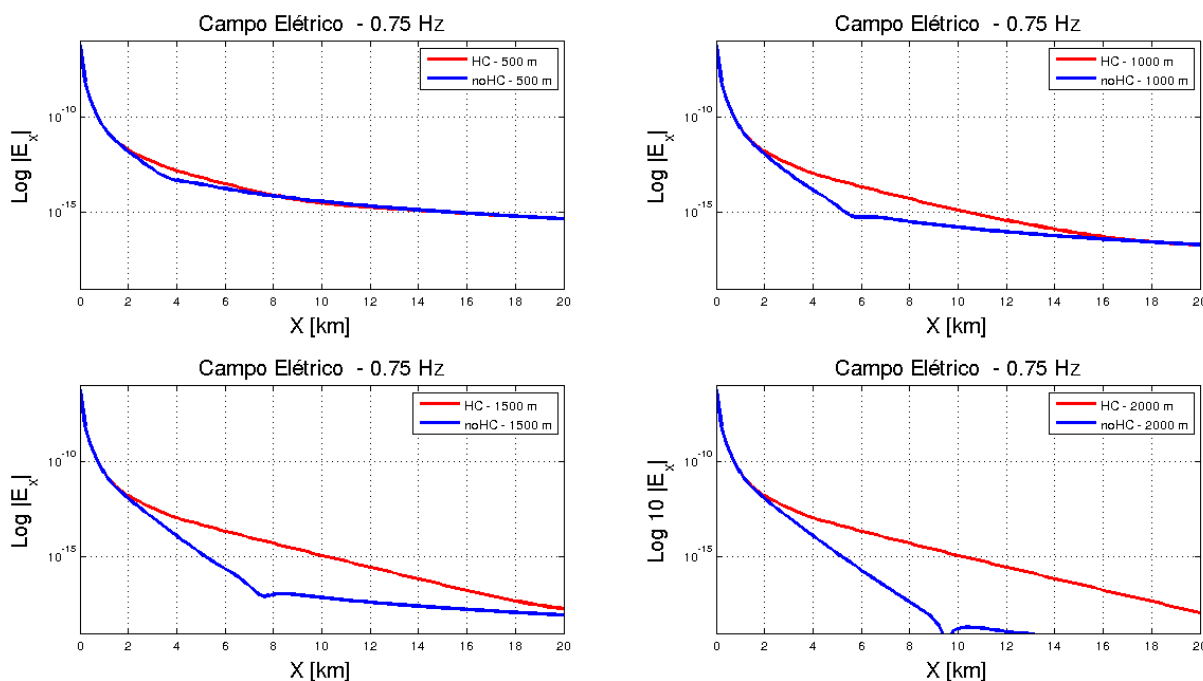


Fonte: do autor (2016)

Ao analisarmos o efeito da espessura da lâmina d'água para uma frequência mais alta percebe-se que a diferença de amplitude dos campos elétricos na presença e na ausência de reservatório continuam aumentando conforme a lâmina d'água torna-se mais espessa, entretanto as *airwaves* começam a dominar o sinal em afastamentos menores em relação aos da frequência de 0,25 Hz, de modo que este efeito é mais nítido para as lâminas d'água mais rasas, isso porque o *skin deph*, propriedade que será mais bem descrita na próxima secção é inversamente proporcional à frequência.

A Figura 2.7 a seguir ilustra a variação da amplitude do campo elétrico devido a variação da espessura da lâmina d'água para a frequência de 0,75 Hz

Figura 2.7: Amplitude do campo elétrico – frequência 0,75 Hz.

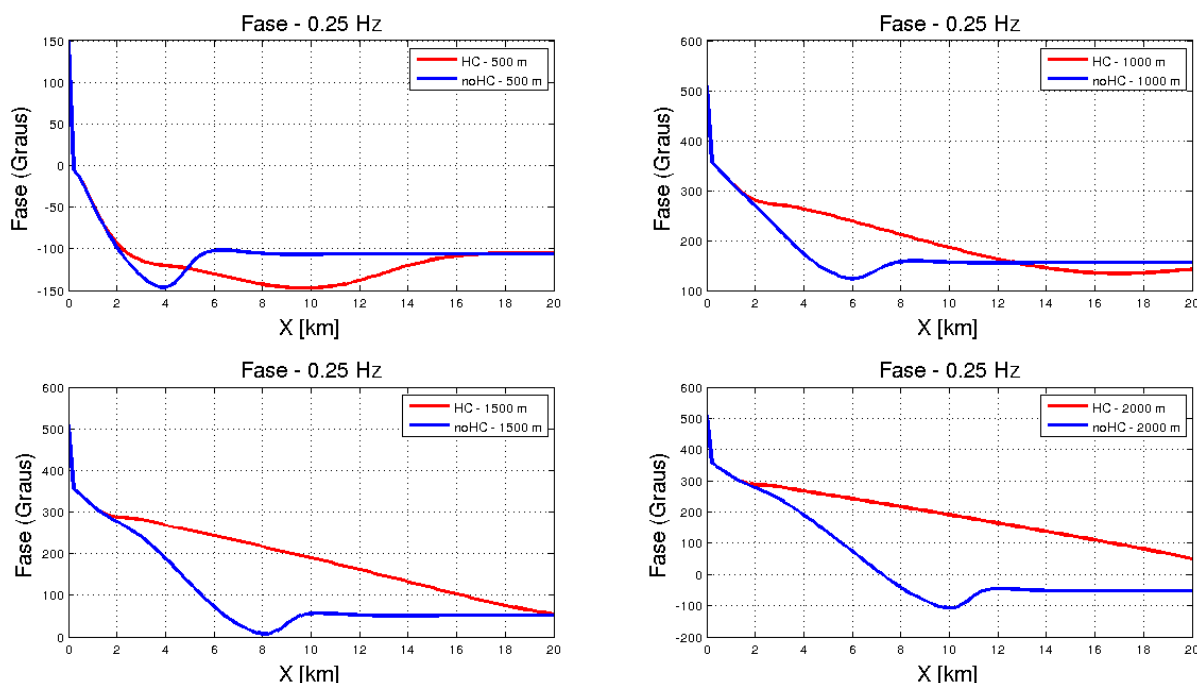


Fonte: Do autor (2016)

Com uma frequência ainda maior o afastamento entre a fonte o receptor para o qual a *airwave* domina o sinal diminui mais ainda, mas ainda assim esse efeito é mais perceptível para uma lâmina d'água mais rasa, isso significa que na prática faz-se necessário avaliar a topografia do ambiente no qual será realizado o levantamento, para que possa definir a frequência mais adequada para a realização deste, sendo que, para ambientes de mar raso em especial, essa avaliação pré-levantamento terá influência direta na qualidade dos dados.

A Figura 2.8 a seguir ilustra a variação da fase do campo elétrico devido a variação da espessura da lâmina d'água para a frequência de 0,25 Hz

Figura 2.8: Fase do campo elétrico – frequência 0,25 Hz.

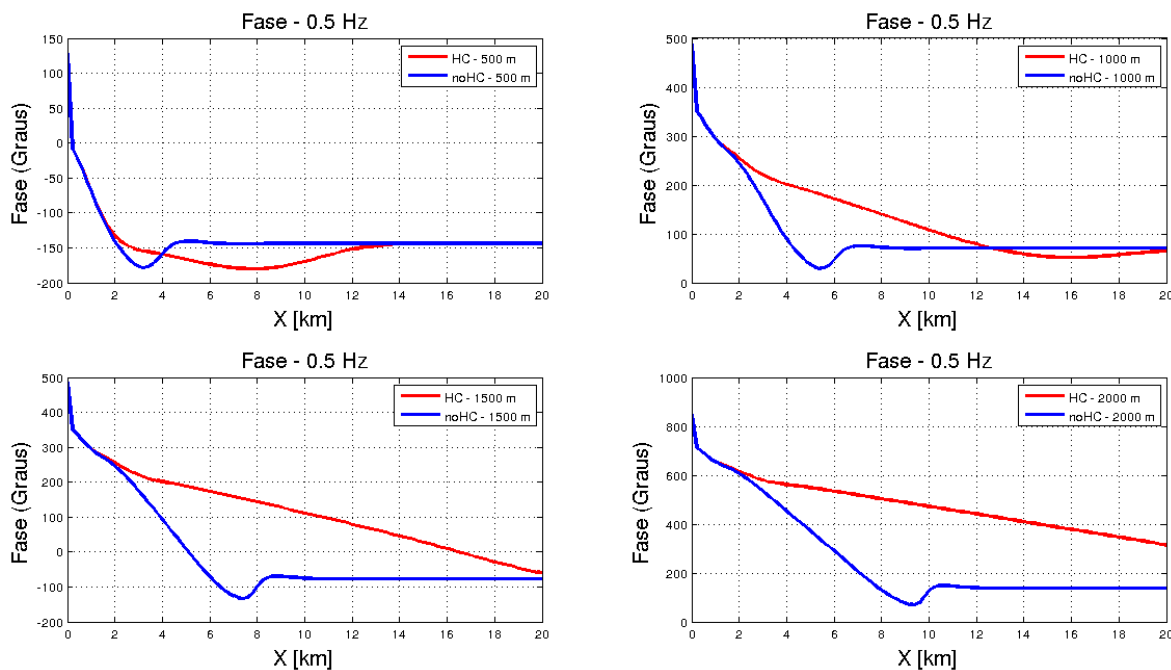


Fonte: Do autor (2016)

A fase do campo elétrico representa o quanto os dois campos são defasados um em relação ao outro, de modo que podemos perceber que quanto maior a espessura da lâmina d'água, maior é essa defasagem. Este gráfico também nos permite demarcar a partir de que ponto a *airwave* passa a dominar o sinal, pois a partir deste ponto a fase torna-se constante, já que a onda não muda de fase ao entrar em contato com a interface da água do mar com o ar, sendo assim a onda apenas se propaga do transmissor para a interface mar-ar e depois retorna aos receptores (EIDESMO et al., 2002 apud UM e ALUMBAUGH, 2007), de forma que quanto maior a espessura da lâmina d'água maior é a distância entre o transmissor e o receptor na qual ela irá dominar o sinal. Deste modo, a fase do campo elétrico é ideal para determinarmos a partir de que ponto o sinal deixa de sofrer a influência do reservatório.

A Figura 2.9 a seguir ilustra a variação da fase do campo elétrico devido a variação da espessura da lâmina d'água para a frequência de 0,5 Hz

Figura 2.9: Fase do campo elétrico – frequência 0,5 Hz.

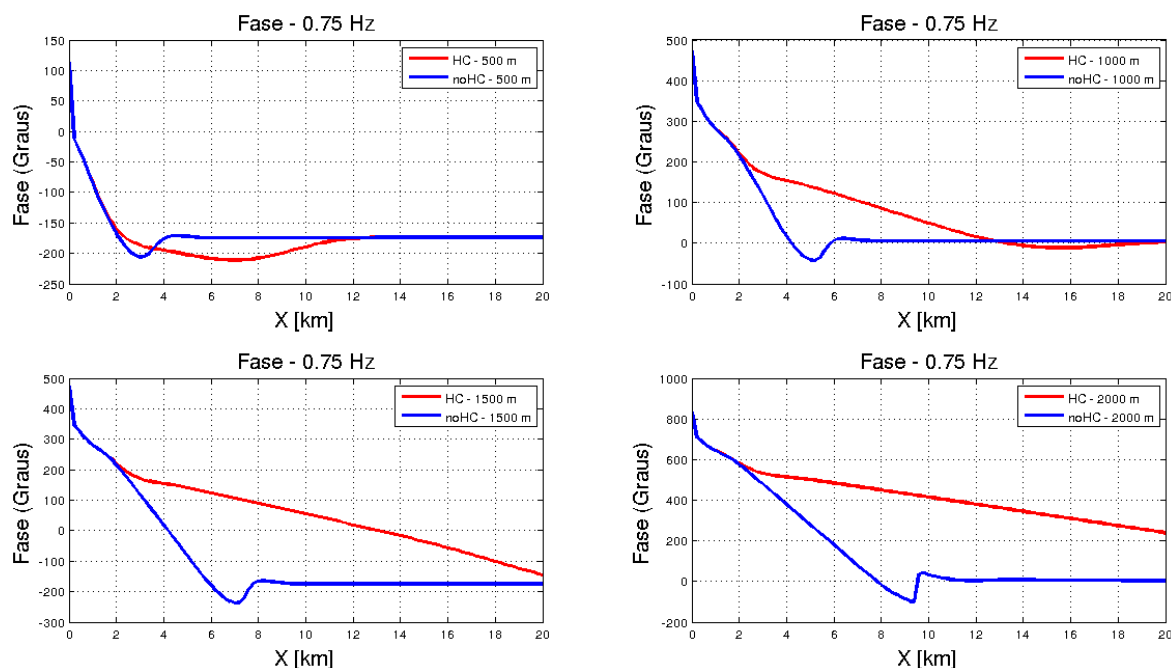


Fonte: Do autor (2016)

Assim como para a amplitude do campo elétrico, quando simulamos o levantamento para uma frequência maior, a distância na qual já não se percebe a influência do reservatório torna-se menor quando comparada com o sinal da fase do campo elétrico em 0,25 Hz para uma lâmina d'água com a mesma espessura.

A Figura 2.10 a seguir ilustra a variação da fase do campo elétrico devido a variação da espessura da lâmina d'água para a frequência de 0,75 Hz

Figura 2.10: Fase do campo elétrico – frequência 0,75 Hz.



Fonte: Do autor (2016)

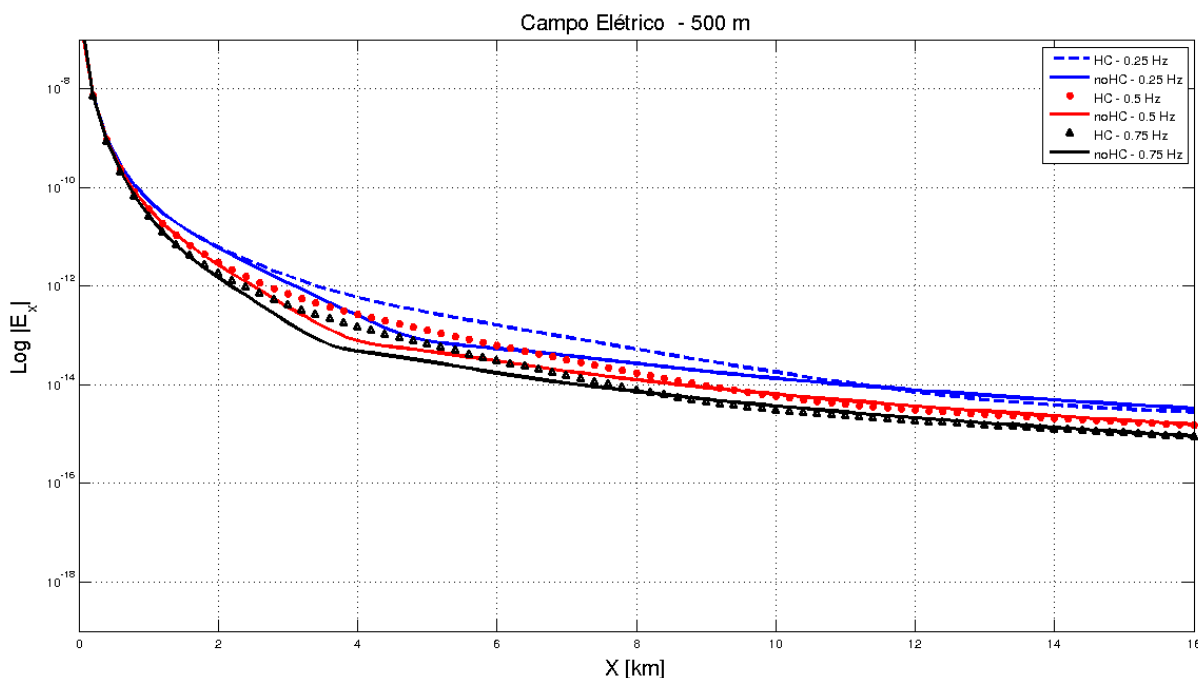
Bem como para a amplitude do campo elétrico, quando empregamos uma frequência ainda maior, a distância crítica diminui mais ainda, em especial para ambientes onde a lâmina d'água é rasa.

2.2. RESULTADOS DO EFEITO DA FREQUENCIA NOS CAMPO DO MCSEM 1-D

Nesta secção analisaremos o efeito da variação da frequência em dados obtidos por meio da modelagem MCSEM 1-D, de modo que o comportamento destes modelos será utilizado como referência na avaliação do comportamento dos campos 2-D obtidos nas mesmas frequências. Sabe-se que quanto menor a frequência, mais profundas serão as regiões investigadas, isso se deve ao *skin depth*, que é “a profundidade ou distância para a qual o campo EM decai exponencialmente numa rocha ou material uniforme. O *skin deph* aumenta com a resistividade e diminui com a frequência” (CONSTABLE, 2006).

Sabendo disso, a Figura 2.11 a seguir ilustra a variação da amplitude do campo elétrico devido a variação da frequência para uma espessura de lâmina d'água de 500 m

Figura 2.11: Amplitude do campo elétrico – espessura da lâmina d'água 500 m.

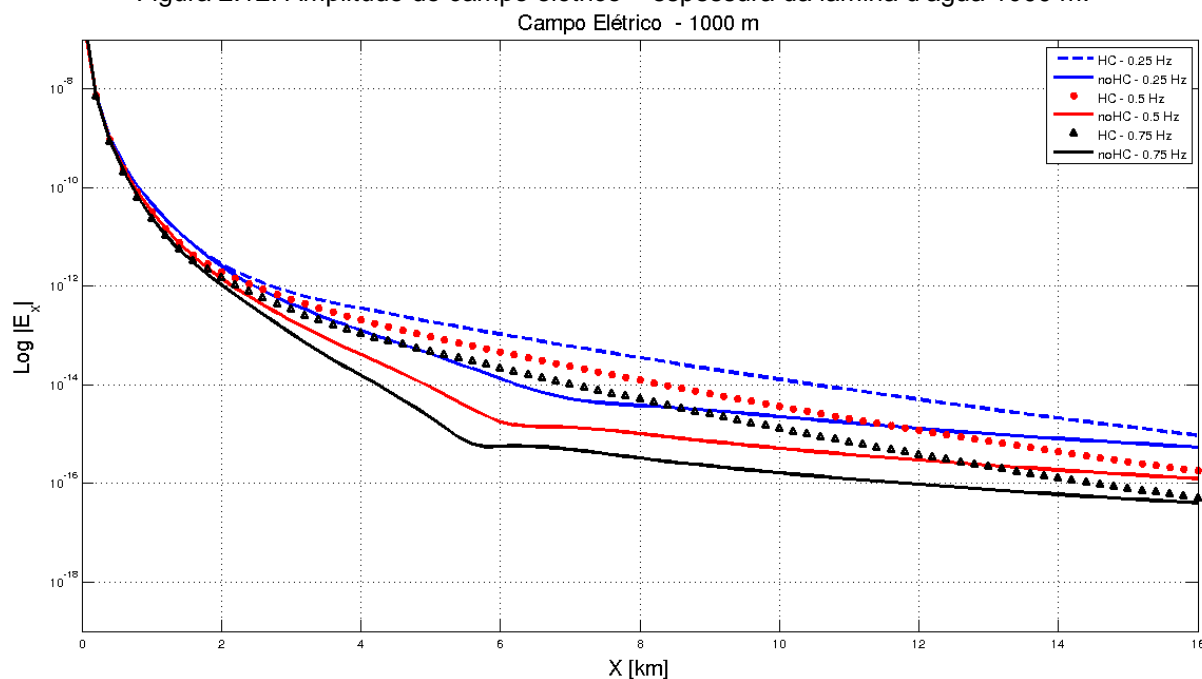


Fonte: Do autor (2016)

Como já era previsto, conforme a frequência diminui a amplitude do campo elétrico aumenta, tanto para o modelo com reservatório como para o sem, bem como a porção que capta o sinal devido às estruturas em subsuperfície se torna mais extensa, de modo que na frequência de 0,25 Hz chega a atingir 10 km de distância em relação ao transmissor, tornando a distancia crítica, na qual as *airwaves* dominam o sinal, cada vez maior.

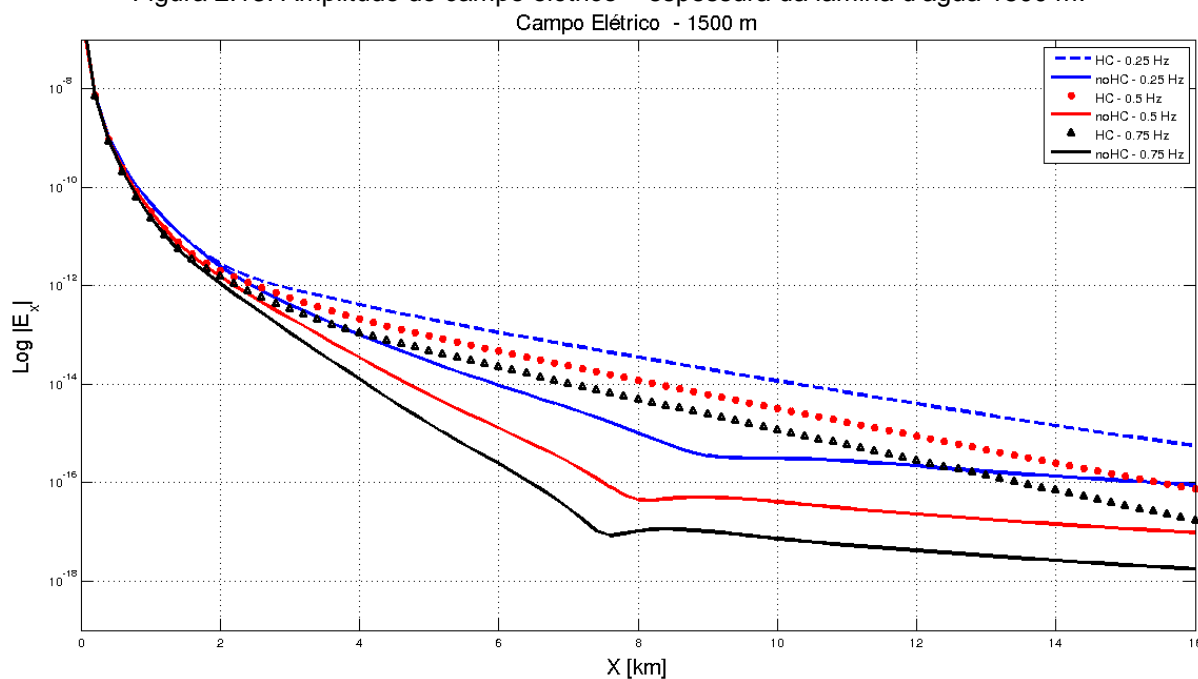
Este comportamento dos dados em relação a frequência se repete para as lâminas d'água de 1000 m, 1500 m e 2000 m, como podemos observar nas Figuras 2.12, 2.13 e 2.14, respectivamente, a seguir

Figura 2.12: Amplitude do campo elétrico – espessura da lâmina d'água 1000 m.



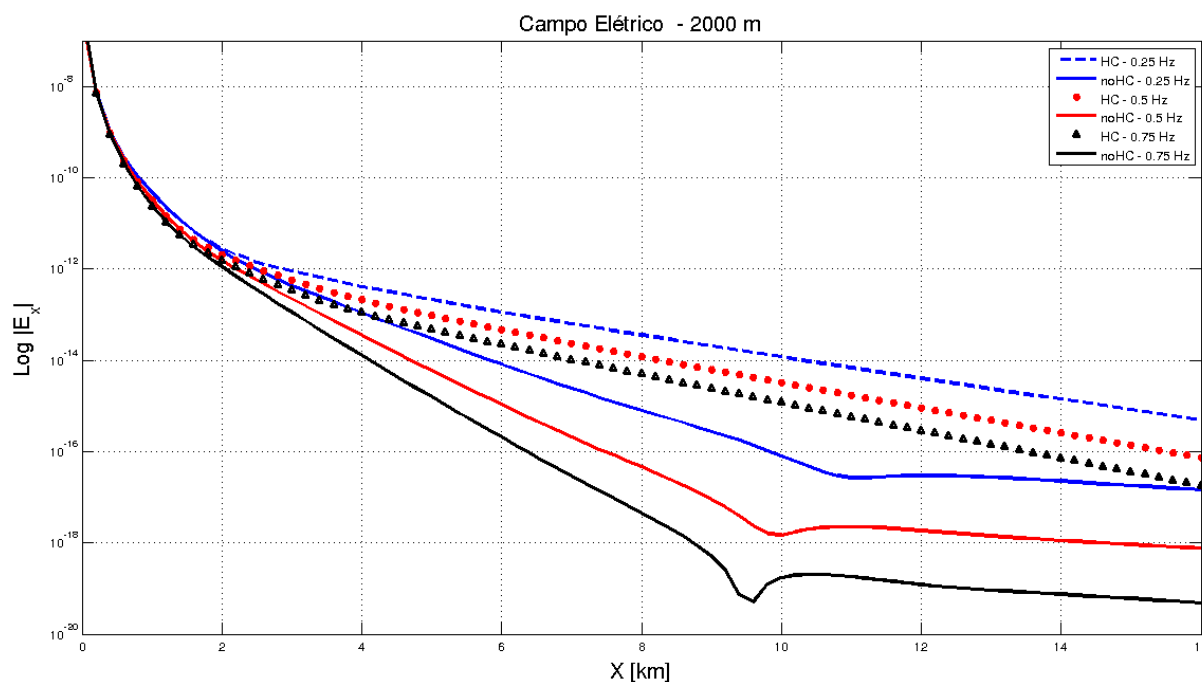
Fonte: Do autor (2016)

Figura 2.13: Amplitude do campo elétrico – espessura da lâmina d'água 1500 m.



Fonte: Do autor (2016)

Figura 2.14: Amplitude do campo elétrico – espessura da lâmina d'água 2000 m.

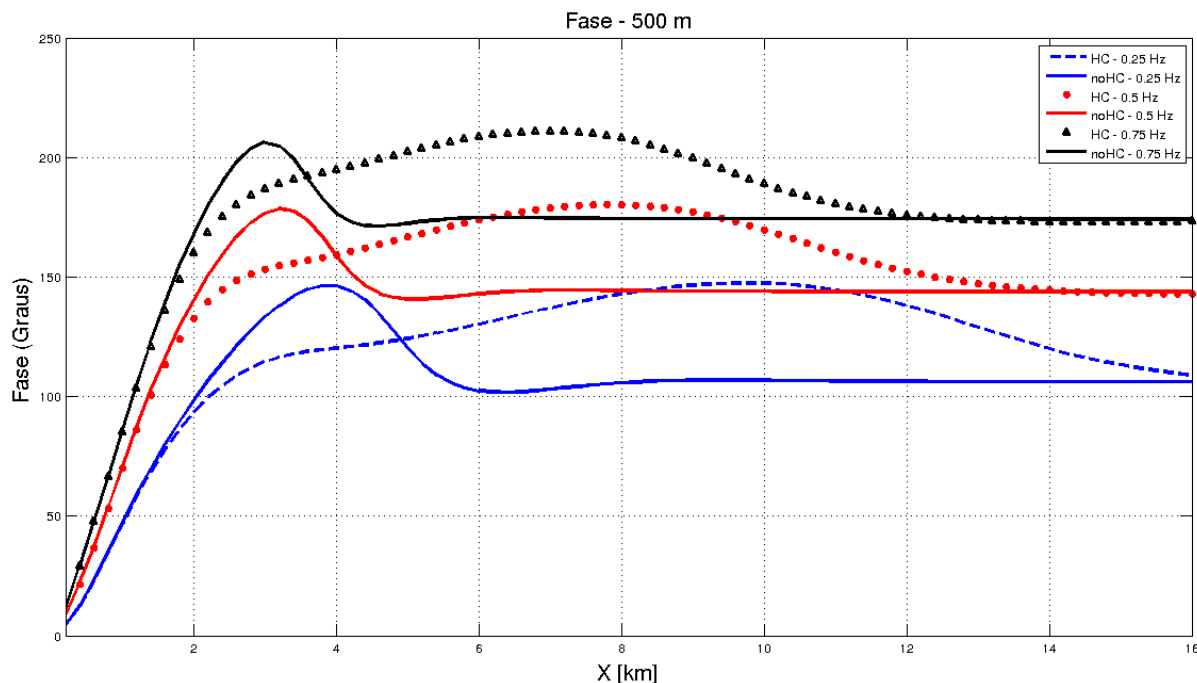


Fonte: Do autor (2016)

Entretanto, conforme a lâmina d'água vai se tornando mais espessa, a amplitude do campo elétrico tanto para o modelo com reservatório, como para o modelo sem reservatório vai diminuindo, enquanto que a distância crítica na qual as ondas planas dominam o sinal aumenta para todas as frequências. De modo que podemos concluir que as ondas planas só tem um efeito determinante na qualidade do sinal em ambientes onde a lâmina d'água é rasa.

A Figura 2.15 a seguir ilustra a variação da fase do campo elétrico devido à variação da frequência para uma espessura da lâmina d'água de 500 m

Figura 2.15: Fase do campo elétrico – espessura da lâmina d'água 500 m.



Fonte: Do autor (2016)

Ao observarmos o comportamento da fase, é possível demarcar nitidamente a distância crítica, ou seja, a distância a partir da qual a fase passa a ter um comportamento linear, de modo que quanto menor a frequência, maior é a distância crítica, isso se deve ao fato de o sinal que se propaga na subsuperfície demorar mais para ser atenuando, o que faz com que as *air waves* dominem o sinal em distâncias maiores quando comparadas com frequências mais altas.

As Figuras 2.16, 2.17 e 2.18 a seguir ilustram a variação da fase do campo elétrico devido a variação da frequência para uma espessura da lâmina d'água de 1000 m, 1500 m e 2000 m respectivamente

Figura 2.16: Fase do campo elétrico – espessura da lâmina d'água 1000 m.

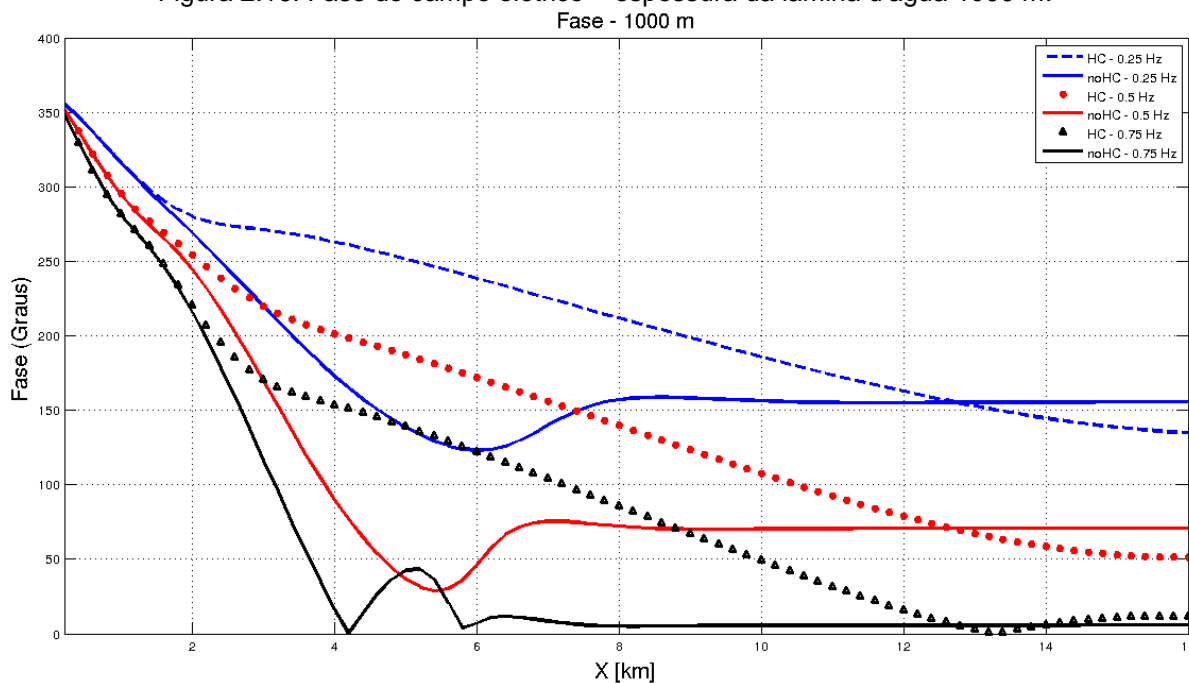


Figura 2.17: Fase do campo elétrico – espessura da lâmina d'água 1500 m.

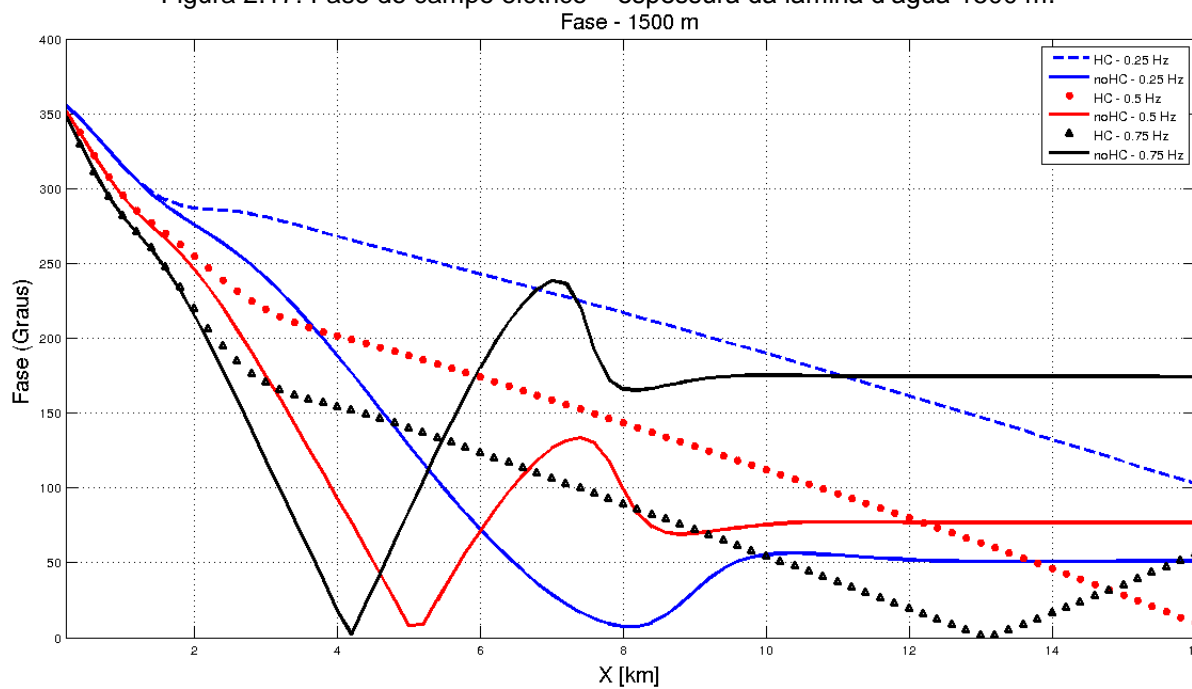
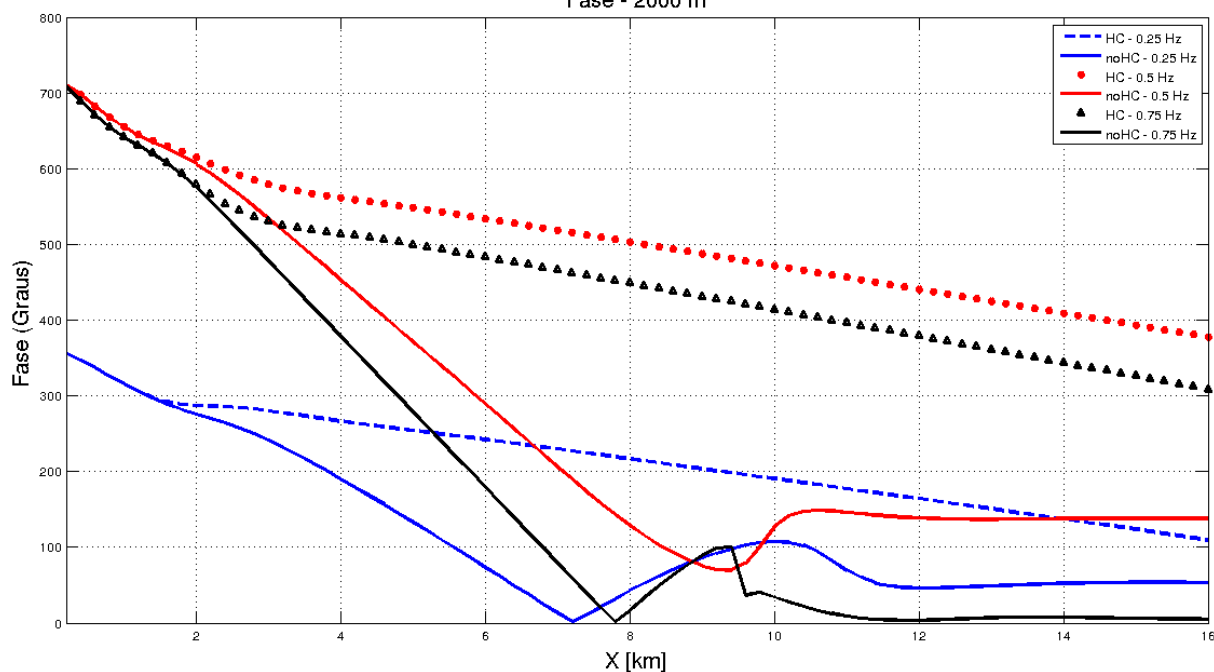


Figura 2.18: Fase do campo elétrico – espessura da lâmina d'água 2000 m.
Fase - 2000 m



Fonte: Do autor (2016)

Vale ressaltar que todos os dados foram analisados até a distância de 2 km a partir do receptor, isso porque na prática a partir de 1,5 km, 2 km, o sinal torna-se muito ruidoso, impossibilitando sua análise. Sendo assim, concluímos que, quando a lâmina d'água é espessa, o efeito das ondas planas ocorre a distâncias tão grandes que não chega a ter grande influência sobre os dados das anomalias que nos propomos a analisar, de modo que os ambientes que requerem mais atenção continuam sendo os ambientes onde a plataforma marinha é mais rasa.

Ao analisarmos conjuntamente as variações do sinal frente a diferentes espessuras da lâmina d'água e a diferentes frequências, concluímos que em ambientes onde a lâmina d'água é rasa, o ideal é que empreguemos frequências mais baixas, a fim de garantir uma distância razoável na qual o sinal devido às estruturas em subsuperfície associadas aos reservatórios seja captado. Já em regiões onde a lâmina d'água é profunda, a frequência ideal estará mais associada à profundidade das estruturas a serem investigadas, se estas forem rasas, recomenda-se uma frequência mais elevada, e no caso de estruturas mais profundas o ideal seria uma frequência mais baixa.

3. MCSEM 2,5-D

Neste trabalho diz-se que estamos aplicando uma modelagem 2,5-D devido ao fato de implementarmos uma simulação de aquisição de dados utilizando uma fonte 3-D em um meio horizontalmente estratificado, no qual a condutividade varia apenas no plano $x - z$, possibilitando a decomposição do problema, que possui uma natureza 3-D, em problemas mais simples, de natureza 2-D. Para tanto, aplicamos a transformada de Fourier para as direções nas quais a propriedade não varia, neste caso, a direção y do sistema de coordenadas cartesianas.

A transformada de Fourier irá gerar uma série de problemas bidimensionais que serão resolvidos numericamente pelo método dos elementos finitos. As soluções encontradas estarão no domínio (x, k_y, z) que representa o domínio da frequência espacial para y , encontrada a solução nesse domínio é necessário transformar a solução que se encontra no domínio da frequência espacial para o domínio (x, y, z) por meio da transformada inversa de Fourier. As transformadas inversas foram implementadas via técnica dos filtros digitais lineares (ALMEIDA, 2002). (SILVA, 2012, p. 36).

Nos campos obtidos no domínio da frequência espacial de y , cujo desenvolvimento matemático encontra-se em Silva (2012), as componentes do campo \dot{E}_y^s e \dot{H}_y^s são linearmente independentes, ao passo que as componentes do campo \dot{E}_x^s , \dot{E}_z^s , \dot{H}_x^s e \dot{H}_z^s dependem tanto do campo primário, quanto das componentes dos campos na direção y . Sendo assim, é possível estabelecer um sistema de equações diferenciais nas variáveis \dot{E}_y^s e \dot{H}_y^s

$$-\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{i\omega\mu}{u^2} \frac{\partial \dot{H}_y^s}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{i\omega\mu}{u^2} \frac{\partial \dot{H}_y^s}{\partial z} \right) + i\omega\mu \dot{H}_y^s + ik_y \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{u^2} \frac{\partial \dot{E}_y^s}{\partial z} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{u^2} \frac{\partial \dot{E}_y^s}{\partial x} \right) \right] =$$

$$+ \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{i\omega\mu}{u^2} \Delta\sigma \dot{E}_x^p \right) - \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{i\omega\mu}{u^2} \Delta\sigma \dot{E}_z^p \right) \quad (3.1)$$

$$-\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\sigma}{u^2} \frac{\partial \dot{E}_y^s}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\sigma}{u^2} \frac{\partial \dot{E}_y^s}{\partial z} \right) + \sigma \dot{E}_y^s + ik_y \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{u^2} \frac{\partial \dot{H}_y^s}{\partial z} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{u^2} \frac{\partial \dot{H}_y^s}{\partial x} \right) \right] =$$

$$+ ik_y \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{u^2} \Delta\sigma \dot{E}_x^p \right) - \Delta\sigma \dot{E}_y^p + ik_y \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{u^2} \Delta\sigma \dot{E}_z^p \right) \quad (3.2)$$

de modo que as equações que compõem esse sistema, estabelecem o acoplamento entre os modos TM e TE, representado pelo termos em colchetes. Esse sistema é similar ao resolvido por (SILVA, 2005 apud SILVA, 2012), neste caso, “para resolvermos o sistema de equações diferenciais formado pelas expressões (3.1) e (3.2) utilizaremos o método de elementos finitos” (SILVA, 2012, p. 38). Como resultado, teremos um sistema de equações matriciais que descrevem o problema, sendo necessário reuni-las em um sistema linear global da seguinte forma

$$\mathbf{G}(x, k_y, z)\mathbf{s}(x, k_y, z) = \mathbf{f}(x, k_y, z) \quad (3.3)$$

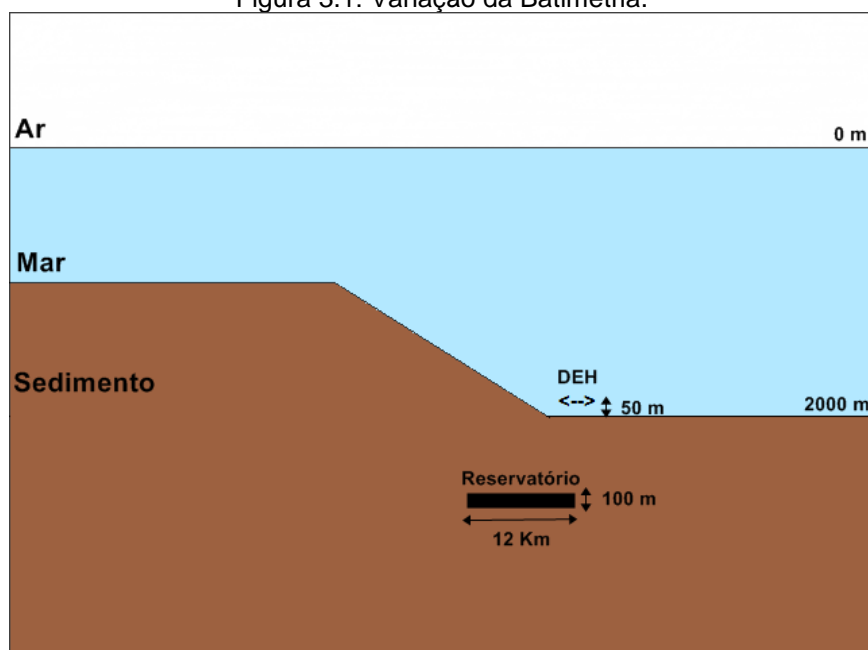
onde \mathbf{G} é a matriz global simétrica, \mathbf{s} é o vetor solução e \mathbf{f} é o vetor fonte global.

Para resolvermos o sistema (3.3) utilizamos o método da SuperLU, visto que este o fez num tempo hábil, cerca de 60 min, para as variações de batimetria mais abruptas, as quais correspondem a uma malha com cerca de 50.220 nós, e cerca de 20 min para as variações de batimetria mais suaves, que correspondem a uma malha com 44.992 nós. Feito isso, de posse dos campos \dot{E}_y^s e \dot{H}_y^s no domínio (x, k_y, z) , obtemos as componentes \dot{E}_x e \dot{E}_z dos campos por meio de derivada numérica, por fim, em consonância com os testes já realizados por Silva (2012), aplicamos a transformada inversa de Fourier Cosseno “para obtermos as componentes do campo no domínio (x, y, z) ” (SILVA, 2012, p. 38).

3.1. BATIMETRIA NA MODELAGEM 2,5-D

A fim de avaliarmos o efeito da topografia do ambiente onde é feita a aquisição de dados sobre o campo eletromagnético, consideramos que o assoalho oceânico apresenta uma geometria similar a de uma rampa, como um talude, de modo que toda a região da rampa acima do nível de referência irá se comportar como uma heterogeneidade. Tal geometria encontra-se esboçada na Figura (3.1) a seguir.

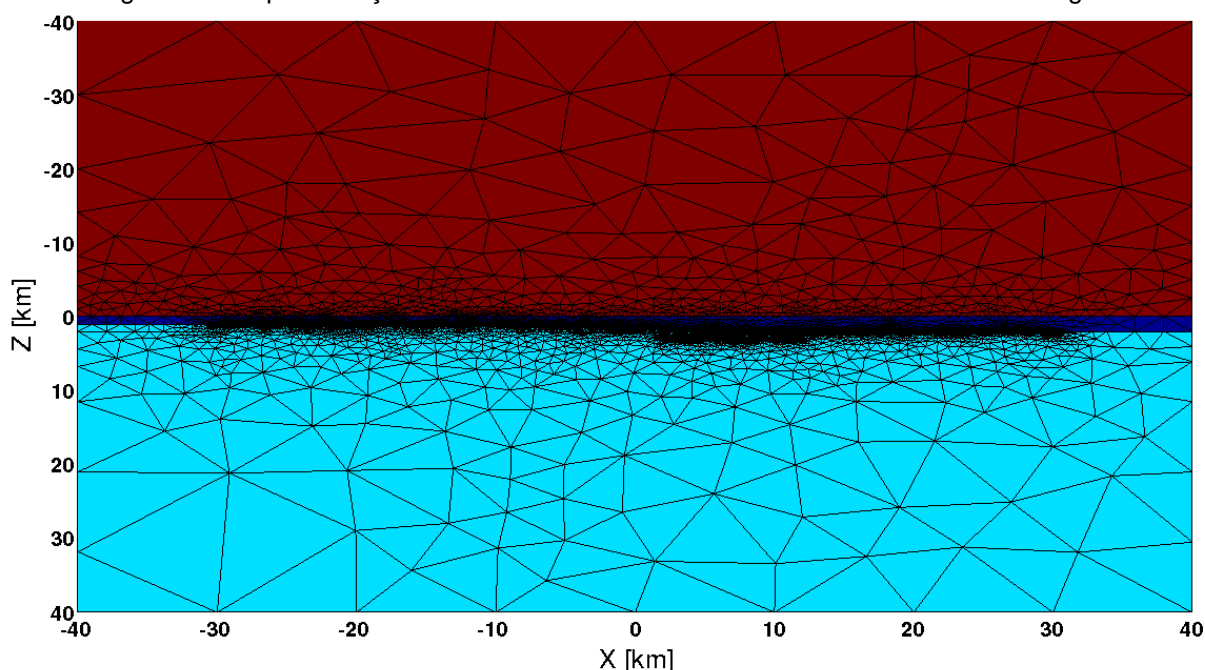
Figura 3.1: Variação da Batimetria.



Fonte: Do autor (2016)

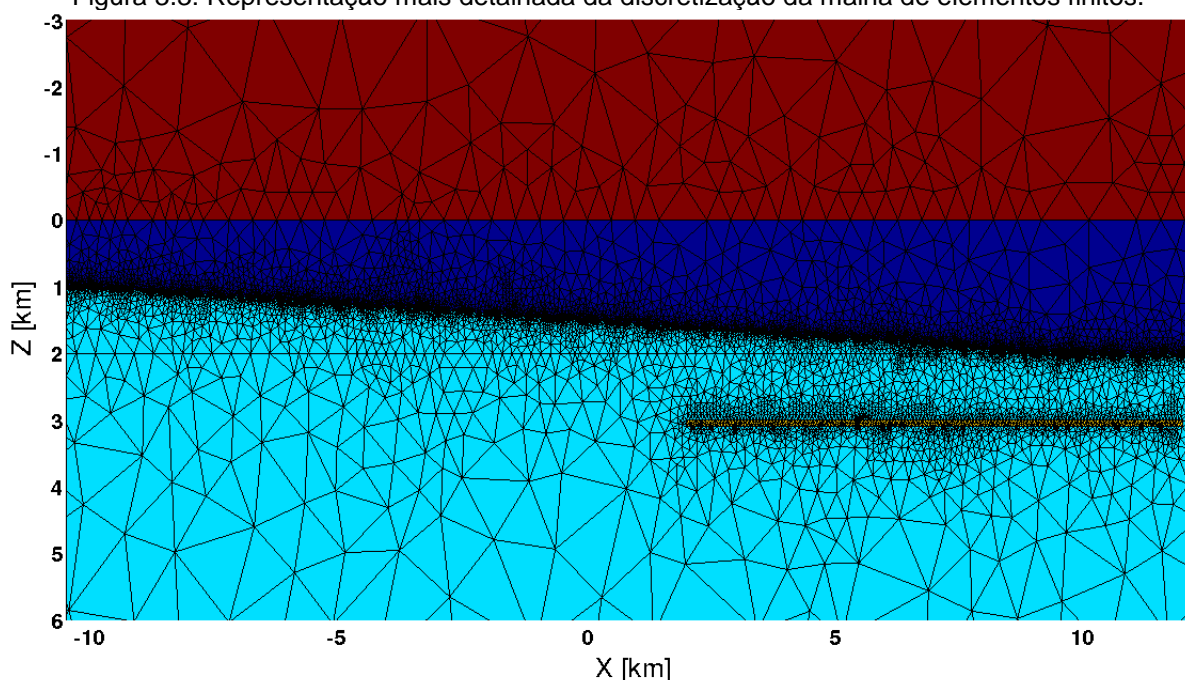
Para tanto, utilizamos o *software* livre Triangle, o qual realiza uma discretização 2-D subdividindo “o domínio em células triangulares não estruturadas, permitindo modelar geometrias mais complexas, e, além disso, é possível controlar localmente a densidade de nós” (NUNES, 2014, p. 24) por meio de uma restrição na qual impomos a área máxima que cada triângulo pode ter. Uma representação da estrutura gerada através da malha por meio do *software* está ilustrada na Figura (3.2), e na Figura (3.3) de uma maneira mais detalhada.

Figura 3.2: Representação da malha de elementos finitos usando o software Triangle.



Fonte: Do autor (2016)

Figura 3.3: Representação mais detalhada da discretização da malha de elementos finitos.



Fonte: Do autor (2016)

No caso da malha aqui representada, temos duas fontes de campo secundário, a rampa e o corpo aqui associado a um reservatório de hidrocarboneto.

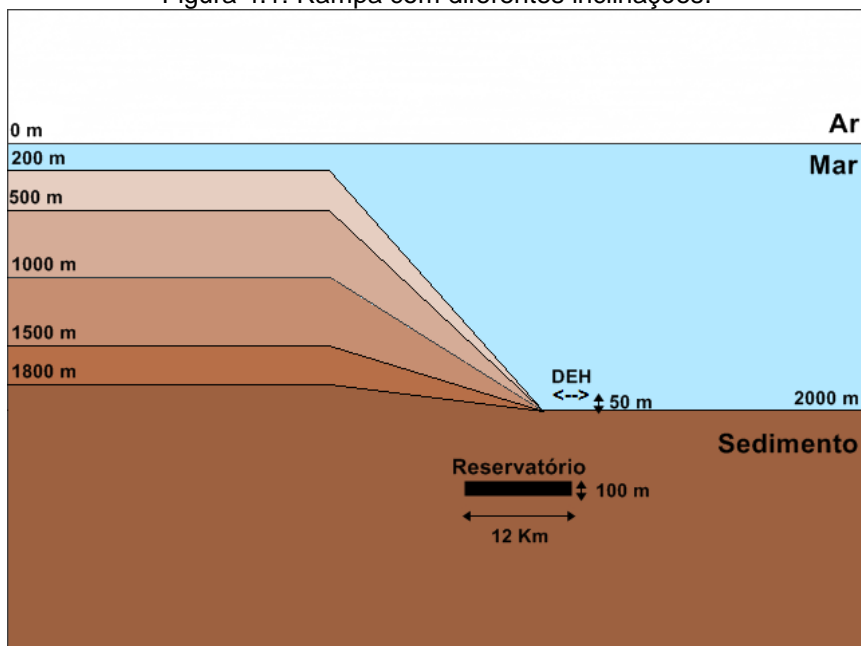
De acordo com Li e Constable (2007), quanto maior a inclinação da batimetria maior será o efeito desta, já para as regiões distantes da mesma, seu efeito tende a ser imperceptível. “As distorções dos campos eletromagnéticos podem ser consideradas como uma soma vetorial do campo primário causado por um modelo de referência e o campo secundário causado pelas heterogeneidades com resistividade anômala” (LI e CONSTABLE, 2007).

As heterogeneidades geradas por variações na topografia do terreno se devem ao efeito galvânico e ao efeito indutivo (JIRACEK, 1990 apud LI e CONSTABLE, 2007). Segundo Jiracek (1990), o efeito galvânico é causado devido ao campo elétrico primário, que induz um acúmulo de cargas onde ocorrem variações de condutividade, como na fronteira entre dois meios distintos. Já o efeito indutivo se deve ao campo magnético secundário gerado por correntes elétricas fluindo em loops ao longo do corpo, de modo que este se soma ao campo magnético primário e pode induzir um aumento ou diminuição do campo elétrico total. A magnitude do efeito galvânico independe da frequência, enquanto que o efeito indutivo é maior para altas frequências.

4. RESULTADOS DO EFEITO DA BATIMETRIA NA MODELAGEM 2,5-D

A fim de qualificarmos a influência da topografia do terreno sobre os campos obtidos por meio do MCSEM, fez-se a modelagem de um assoalho oceânico que possui uma rampa, como um talude, e variamos a inclinação deste (Figura 4.1) para várias frequências

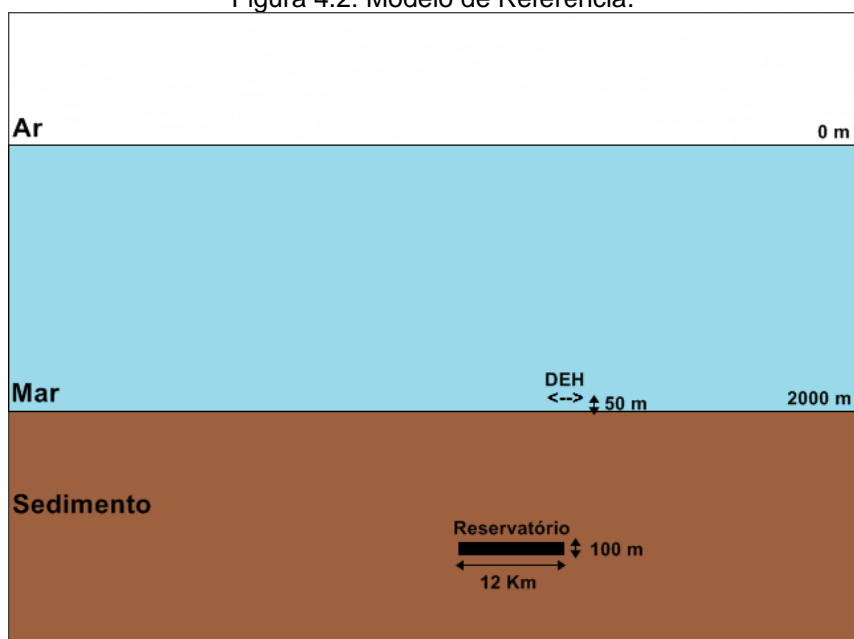
Figura 4.1: Rampa com diferentes inclinações.



Fonte: Do autor (2016)

para tanto, comparou-se os resultados obtidos por meio do modelo com batimetria, com o modelo sem batimetria, onde o nível de referência encontra-se em 2000 m, vale ressaltar que este último apresenta um reservatório apenas para que este seja a fonte do campo secundário, entretanto os resultados dos campos dos modelos com batimetria e sem reservatório foram comparados com o campo primário do modelo sem batimetria, Figura (4.2)

Figura 4.2: Modelo de Referência.

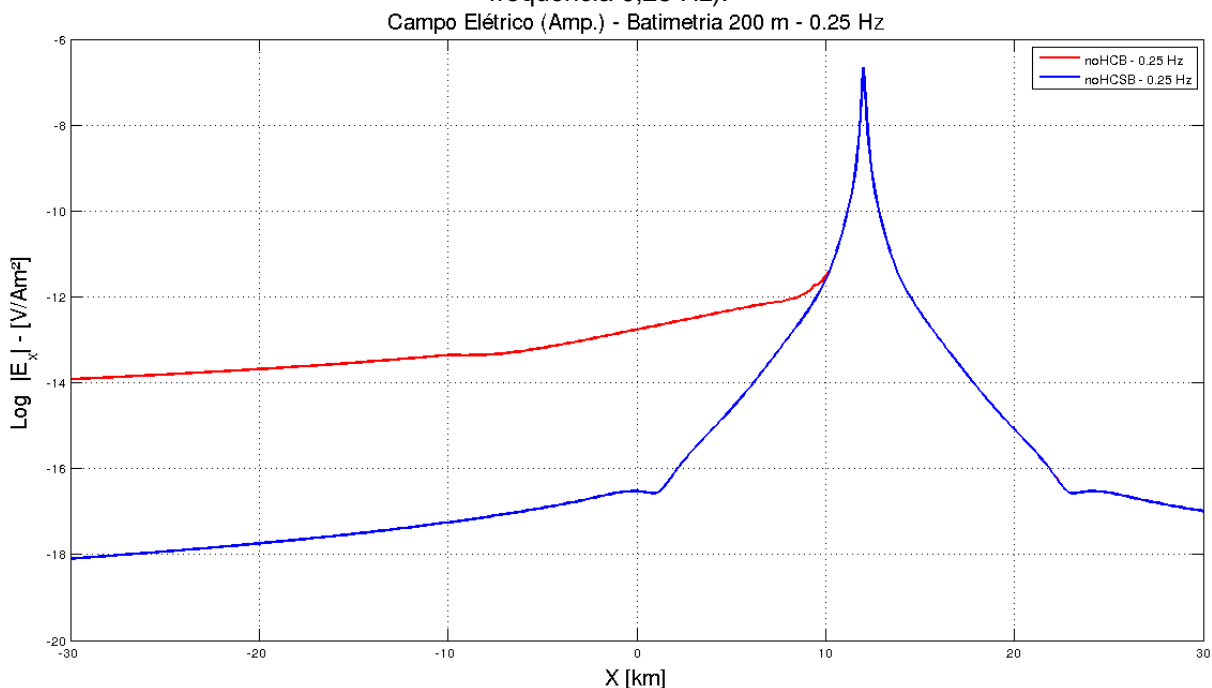


Fonte: Do autor (2016)

a partir deste ponto chamaremos ao modelo com batimetria e sem reservatório de noHCB, e ao modelo sem batimetria e sem reservatório de noHCSB.

A Figura (4.3) a seguir ilustra o efeito da batimetria sobre a amplitude dos campos eletromagnéticos a uma frequência de 0,25 Hz.

Figura 4.3: Efeito da Batimetria com uma variação de 1800 m (Amplitude do Campo Elétrico – frequência 0,25 Hz).



Fonte: Do autor (2016)

O sinal referente ao modelo com batimetria, curva vermelha, foi gerado a partir de um modelo no qual a parte superior da rampa encontrava-se a 200 m da fronteira ar-mar, e a parte inferior em 2000 m, o que está associado a um assoalho

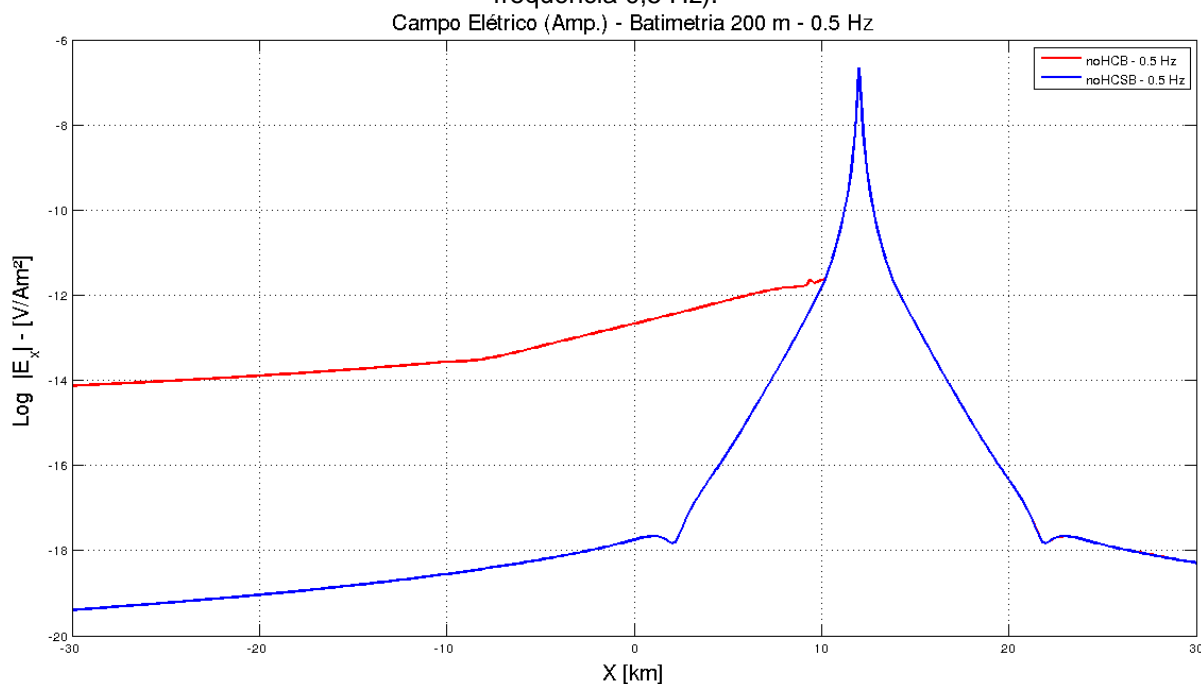
oceânico com cerca de $1,14^\circ$ de inclinação. O modelo de referência, curva azul, está associado a um assoalho oceânico plano, onde a profundidade da lâmina d'água encontra-se a 2.000 m. O transmissor foi disposto a 12.000m da origem e os receptores ao longo de todo o fundo do mar, espaçados de 200 em 200 m entre si.

Ao analisarmos o gráfico de amplitude percebemos que o campo elétrico devido ao modelo com batimetria é maior que o campo elétrico devido ao modelo com fundo plano, isso porque os sedimentos localizados acima de 2.000 m comportam-se como heterogeneidade. Apenas o lado direito da curva, referente a base da rampa, coincide com o campo devido ao fundo plano, isso porque, nessa região, os dois modelos são iguais.

Neste mesmo gráfico observamos uma leve elevação na curva, próximo ao ponto de quebra no topo da rampa, isso porque o acúmulo de cargas no topo da rampa leva a um campo secundário na mesma direção do primário, de modo que estes se somam, justificando o aumento do campo total próximo a quebra no topo da rampa. Já na região próximo ao ponto de quebra na base da rampa observamos uma diminuição do campo eletromagnético, isso porque o campo secundário gerado nessa região é oposto ao campo primário, o que gera uma diminuição da amplitude do campo total. Tais resultados concordam com os resultados já obtidos por Li e Constable (2007).

Na Figura (4.4) a seguir estamos analisando os efeitos devido à mesma topografia do modelo anterior e com a mesma geometria de aquisição de dados, entretanto, empregamos uma frequência mais alta, de 0,5 Hz.

Figura 4.4: Efeito da Batimetria com uma variação de 1800 m (Amplitude do Campo Elétrico – frequência 0,5 Hz).

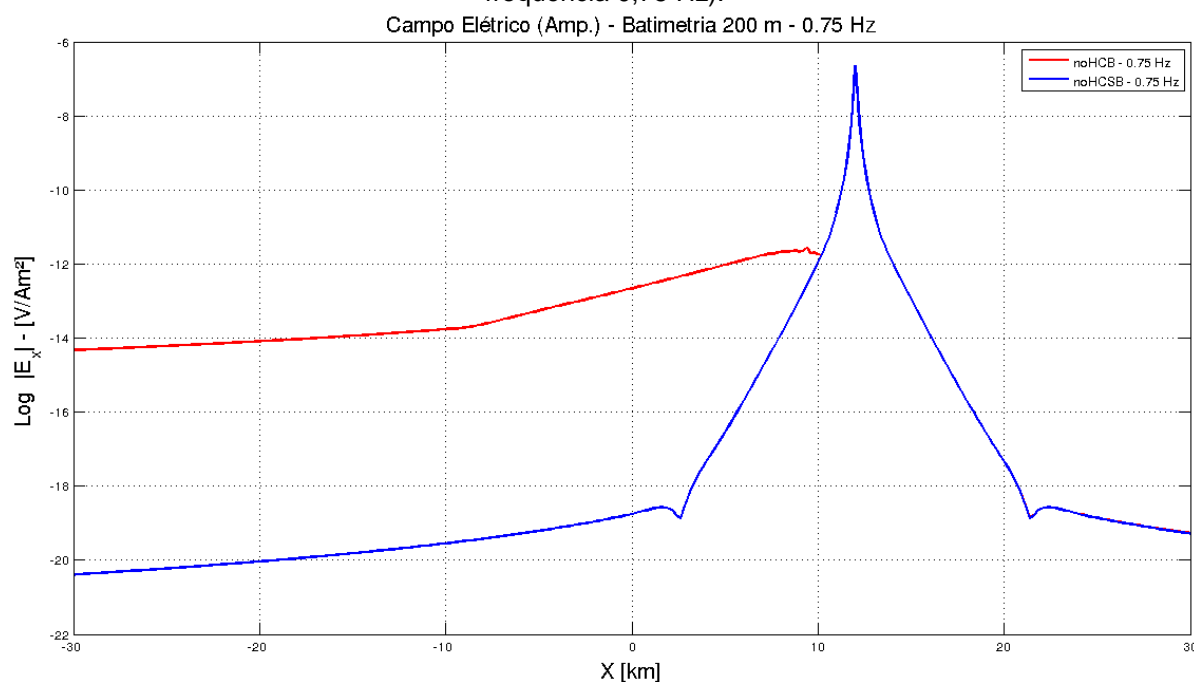


Fonte: Do autor (2016)

Analisando este gráfico, notamos que o campo elétrico tanto para o modelo com batimetria como para o modelo sem batimetria diminuíram, isso porque uma frequência mais alta investiga regiões mais rasas, devido ao *skin depth* ser menor, mesmo assim a amplitude do campo elétrico devido ao modelo com batimetria, curva vermelha, é maior que a amplitude do gráfico sem variação na batimetria, curva azul. De modo que, o efeito da batimetria que era observado como uma pequena elevação no gráfico em cerca de -10.000 m e um pequeno rebaixamento em 10.000 m tornam-se praticamente imperceptíveis.

Na Figura (4.5) a seguir ainda estamos analisando os efeitos devido à mesma topografia do modelo anterior, com a mesma geometria de aquisição de dados, entretanto, empregamos uma frequência mais alta, de 0,75 Hz.

Figura 4.5: Efeito da Batimetria com uma variação de 1800 m (Amplitude do Campo Elétrico – frequência 0,75 Hz).

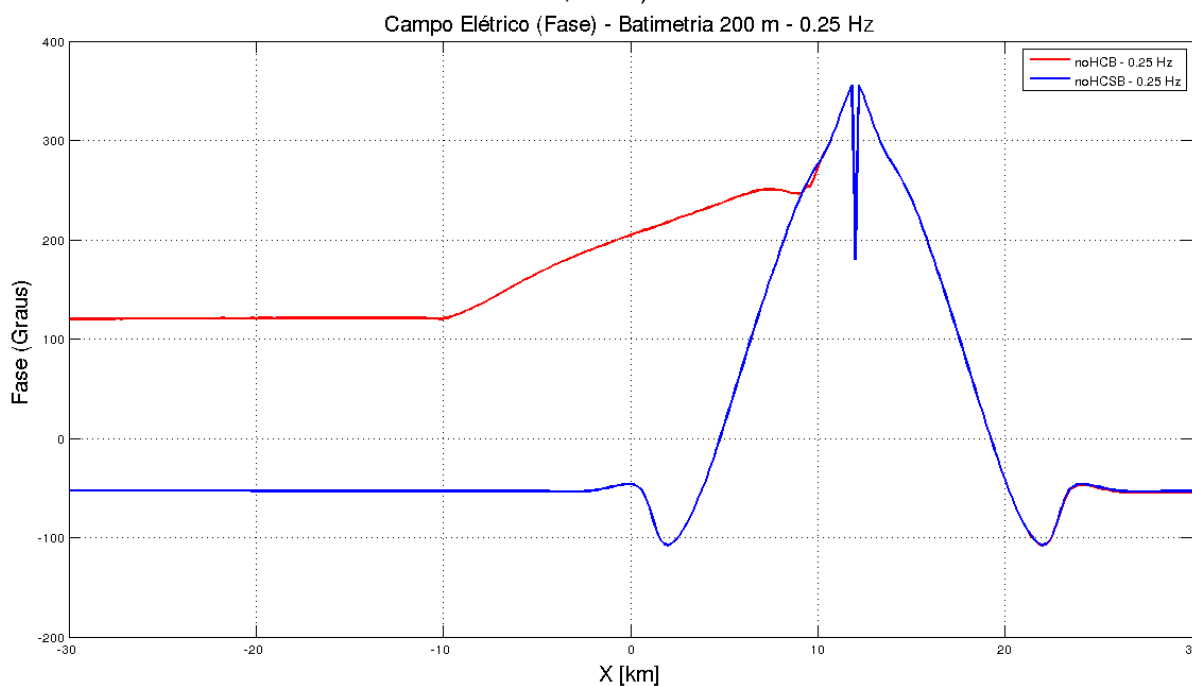


Fonte: Do autor (2016)

Analisando a resposta do campo para uma frequência ainda mais alta notamos que os campos diminuem mais ainda, isso porque o campo elétrico se dissipa ainda mais, tornando ainda mais difícil delimitar os limites da rampa.

No gráfico apresentado na Figura (4.6) a seguir analisaremos o comportamento da fase do campo elétrico quando os dados são adquiridos a uma frequência de 0,25 Hz.

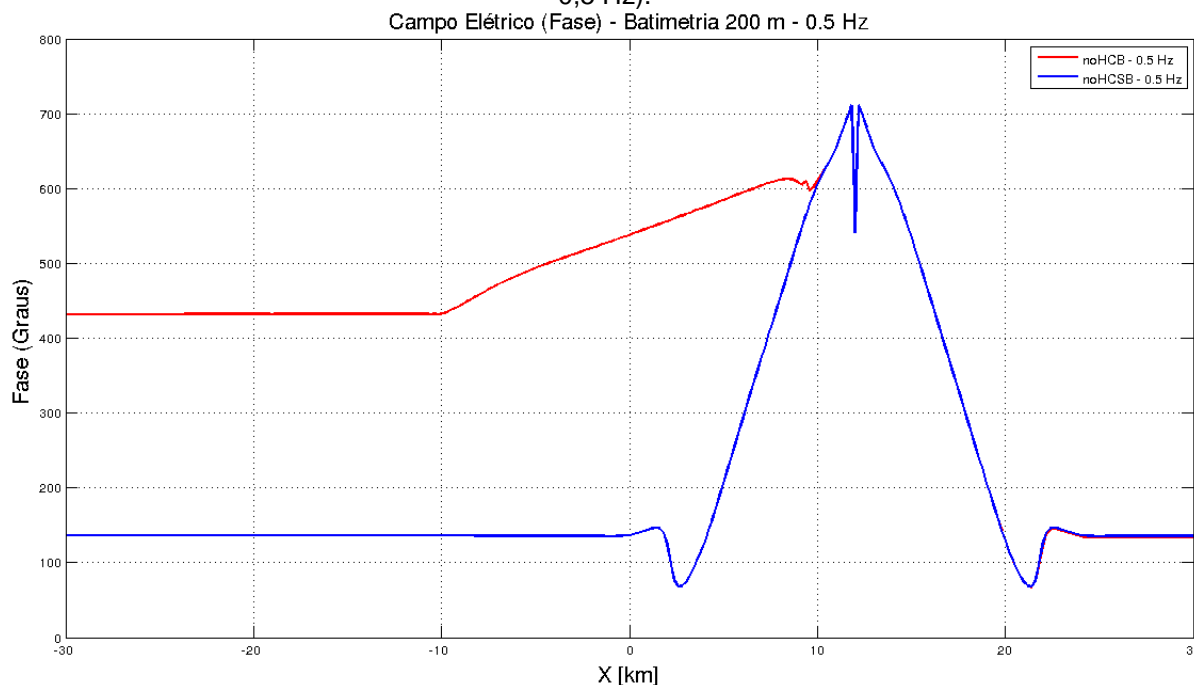
Figura 4.6: Efeito da Batimetria com uma variação de 1800 m (Fase do Campo Elétrico – frequência 0,25 Hz).



A fase do campo elétrico varia apenas na região compreendida pela fonte e onde há alguma heterogeneidade, nas outras regiões, ou ele permanece constante, ou igual ao modelo de referência. Sendo assim, ao analisarmos a curva referente ao modelo sem variação na batimetria, curva azul, notamos que este gráfico só não é constante para a região onde a fonte exerce alguma influência, região que vai de 0 m a pouco mais que 20.000 m. Já na curva associada ao modelo com variação de batimetria, observamos que esta provoca uma defasagem no campo registrado pelos receptores, de modo que possível demarcar o início e o final da rampa, em -10.000 m e 10.000 m, respectivamente.

A Figura (4.7) a seguir ilustra o efeito da variação fase do campo elétrico obtido a uma frequência de 0,5 Hz.

Figura 4.7: Efeito da Batimetria com uma variação de 1800 m (Fase do Campo Elétrico – frequência 0,5 Hz).

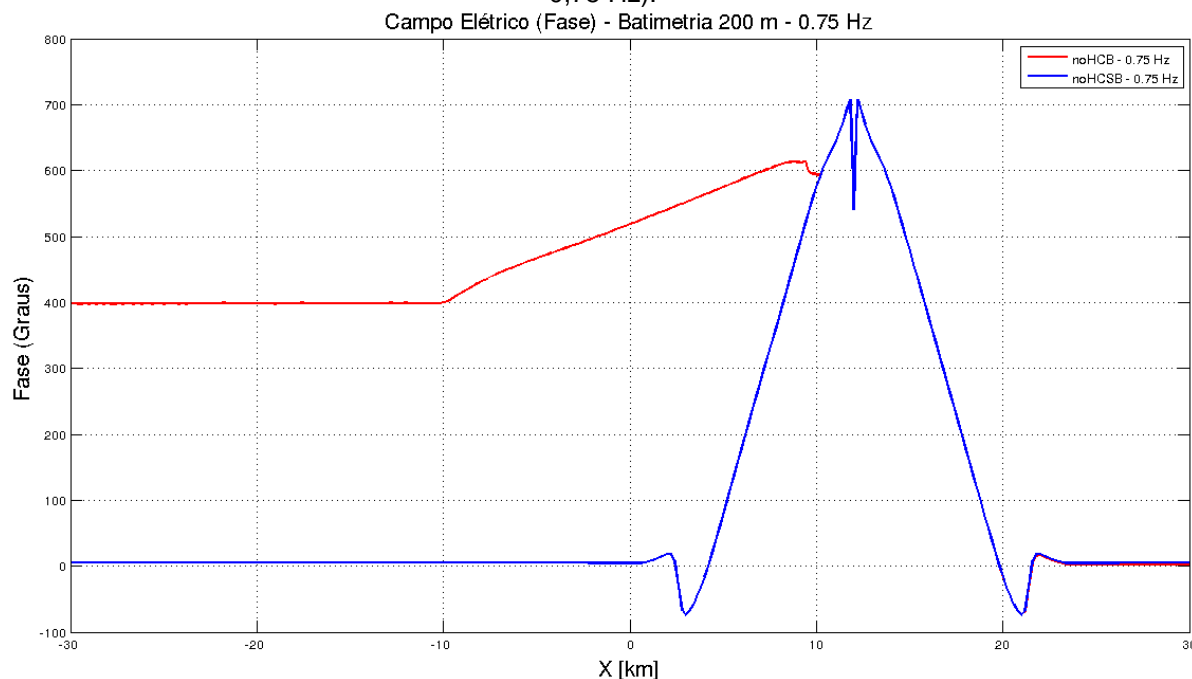


Fonte: Do autor (2016)

Neste gráfico também observamos a defasagem do campo elétrico devido à presença da fonte e da variação topográfica, entretanto o efeito de ambas diminuiu se comparado com a defasagem do campo elétrico adquirido a uma frequência de 0,25 Hz.

O mesmo ocorre para fase do campo elétrico adquirido a uma frequência de 0,75 Hz, representado na Figura (4.8) a seguir. Apesar de ainda ser possível delimitar os limites da rampa, a defasagem é um pouco menor quando comparada com o comportamento dos campos elétrico obtidos a uma frequência de 0,25 Hz e 0,5 Hz.

Figura 4.8: Efeito da Batimetria com uma variação de 1800 m (Fase do Campo Elétrico – frequência 0,75 Hz).

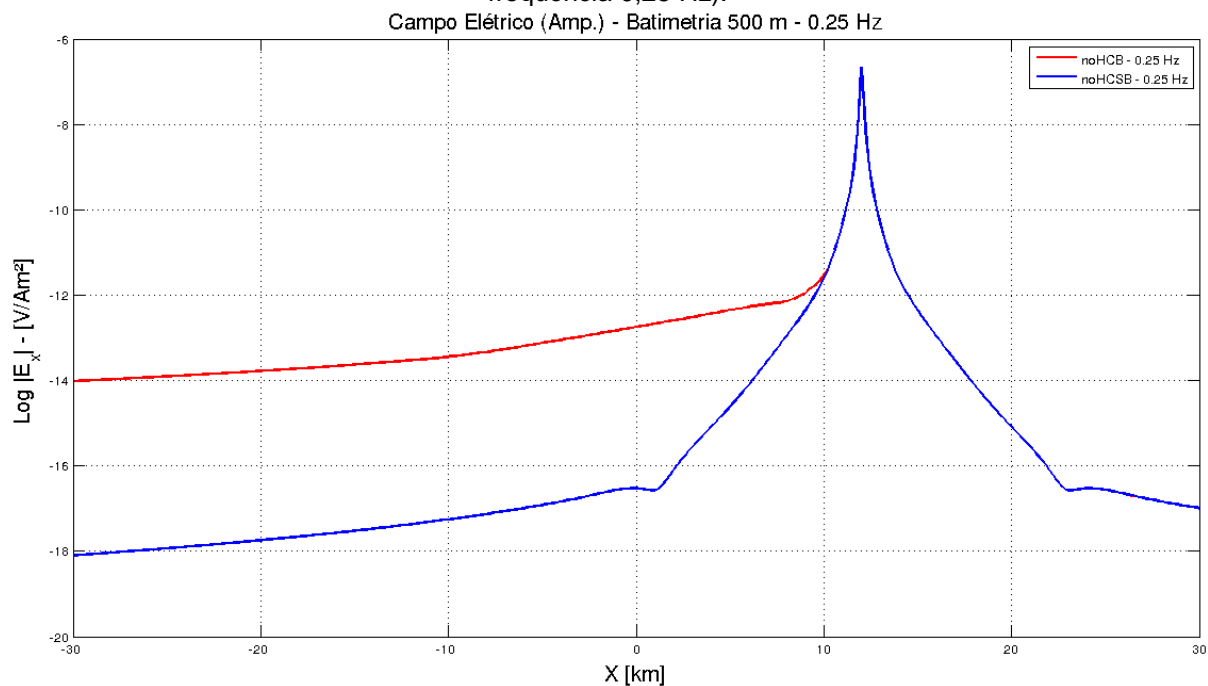


Sendo assim concluímos que, quando a variação da batimetria é abrupta, seu efeito na amplitude do campo elétrico é mais evidente nas frequências mais altas.

A seguir analisaremos o efeito da batimetria devido a uma rampa na qual o topo encontra-se a 500 m da interface mar-ar e sua base a 2.000 m desta, de modo que a geometria de aquisição de dados foi mantida a mesma dos modelos anteriores, variando apenas a profundidade dos receptores, que devem acompanhar a topografia do ambiente onde os dados são adquiridos.

Na Figura (4.9) a frequência empregada foi de 0,25 Hz.

Figura 4.9: Efeito da Batimetria com uma variação de 1500 m (Amplitude do Campo Elétrico – frequência 0,25 Hz).

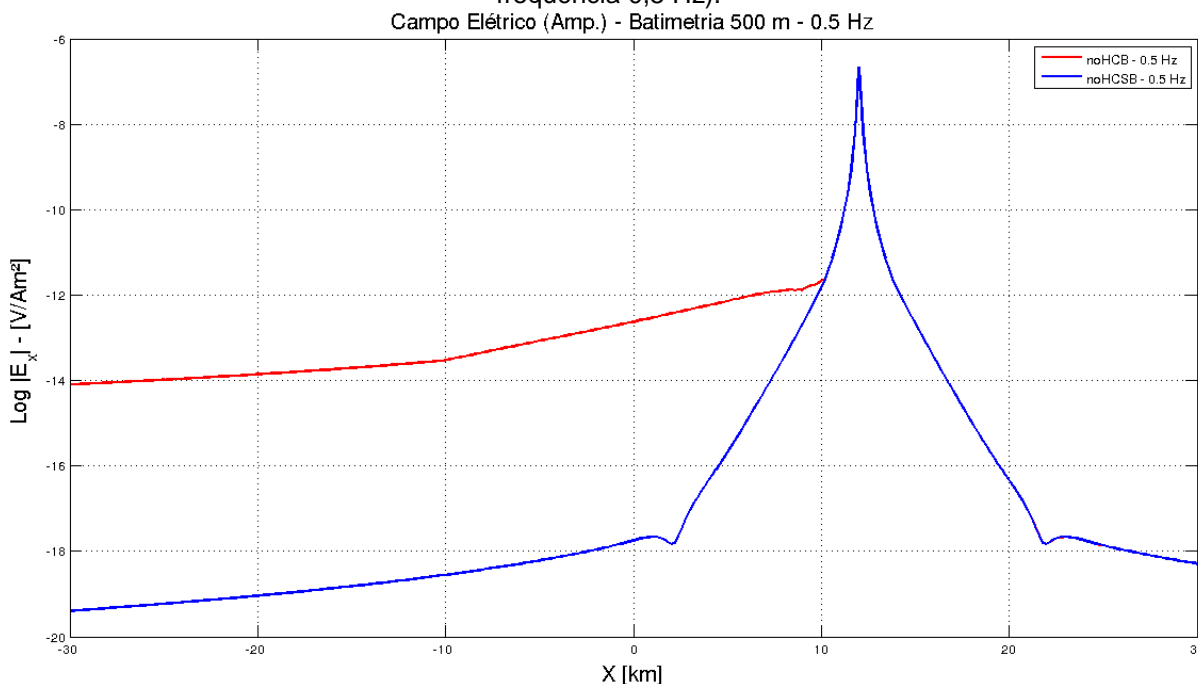


Fonte: Do autor (2016)

A amplitude do campo elétrico devido ao modelo com variação batimetria, curva vermelha, é maior que a amplitude do campo elétrico do modelo sem batimetria, curva azul, comprovando que o pacote de sedimentos localizados acima do nível referênci, 2.000 m, comporta-se como uma heterogeneidade. Entretanto, ao contrário do caso anterior, mesmo simulando a aquisição de dados numa frequência baixa, não conseguimos delimitar os limites horizontais da rampa.

A seguir, a Figura (4.10) ilustra a amplitude do campo elétrico para modelos onde há variação de batimetria e onde não há, quando estes são adquiridos numa frequência de 0,5 Hz.

Figura 4.10: Efeito da Batimetria com uma variação de 1500 m (Amplitude do Campo Elétrico – frequência 0,5 Hz).

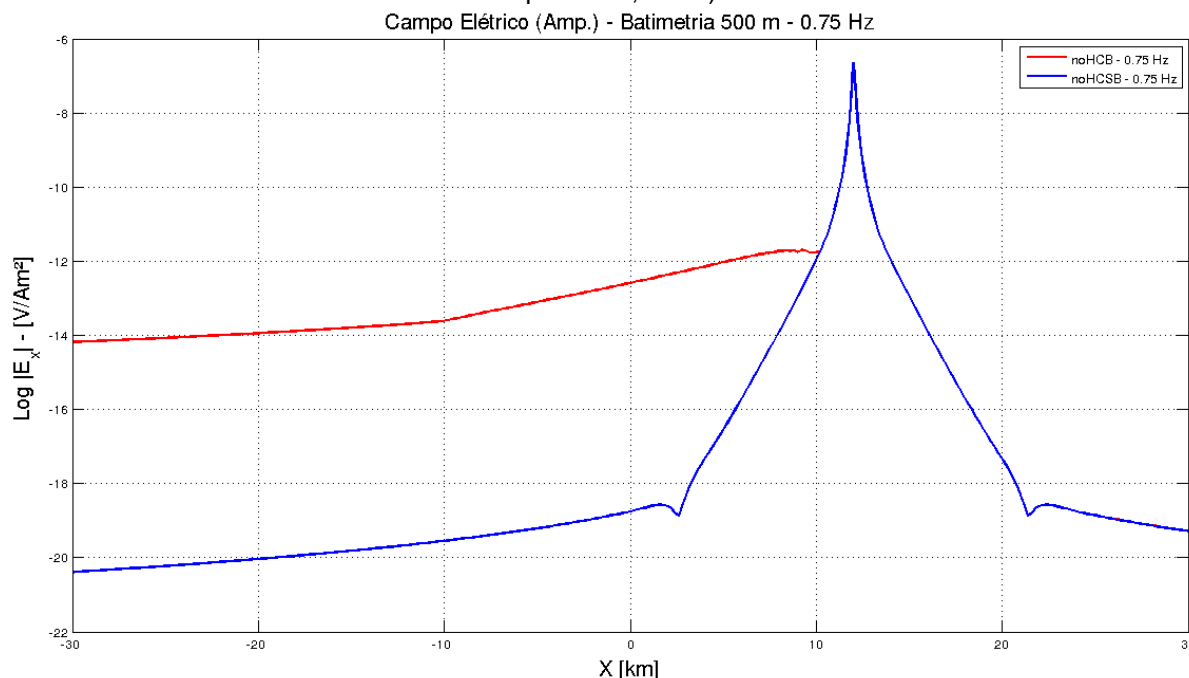


Fonte: Do autor (2016)

Notamos que em geral a amplitude dos campos diminui, tanto para o campo elétrico devido ao modelo com variação de batimetria, curva vermelha, como para o campo elétrico referente ao modelo sem variação de batimetria, curva azul, de modo que a diferença entre a amplitude dos dois campos nesse caso é maior que no caso anteriormente analisado. Entretanto, com o aumento da frequência verificamos que próximo a -10.000 m a curva sofre uma leve mudança de inclinação de modo que o campo vai se tornando progressivamente mais forte e próximo a 10.000 m ele sofre uma pequena diminuição, isso porque o campo secundário na região próxima à quebra da base da rampa possui direção oposta ao campo primário.

A Figura (4.11) a seguir apresenta o gráfico da amplitude campo elétrico obtido numa frequência de 0.75 Hz.

Figura 4.11: Efeito da Batimetria com uma variação de 1500 m (Amplitude do Campo Elétrico – frequência 0,75 Hz).

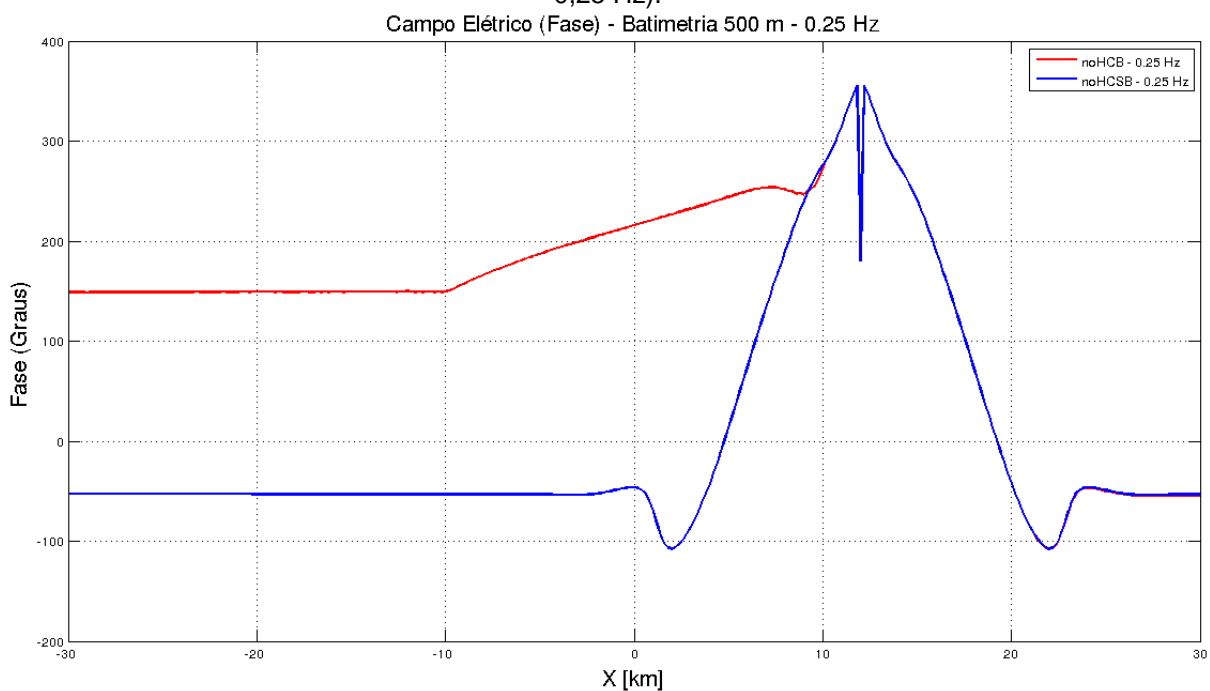


Fonte: Do autor (2016)

Com um campo elétrico adquirido numa frequência ainda mais alta, a amplitude de ambos os campos diminui mais ainda, enquanto que a diferença de amplitude entre eles aumenta. Aumenta também a inclinação da curva a partir do ponto de quebra localizado no topo da rampa, isso significa que com o aumento da frequência, e conseqüente diminuição do skin deph, o efeito devido a variação da batimetria passa a exercer um domínio maior sobre o sinal.

A Figura (4.12) a seguir ilustra o comportamento da fase do campo elétrico, vale ressaltar, que o campo elétrico só muda de fase na região próxima da fonte e quando o campo se depara com a interface de alguma heterogeneidade.

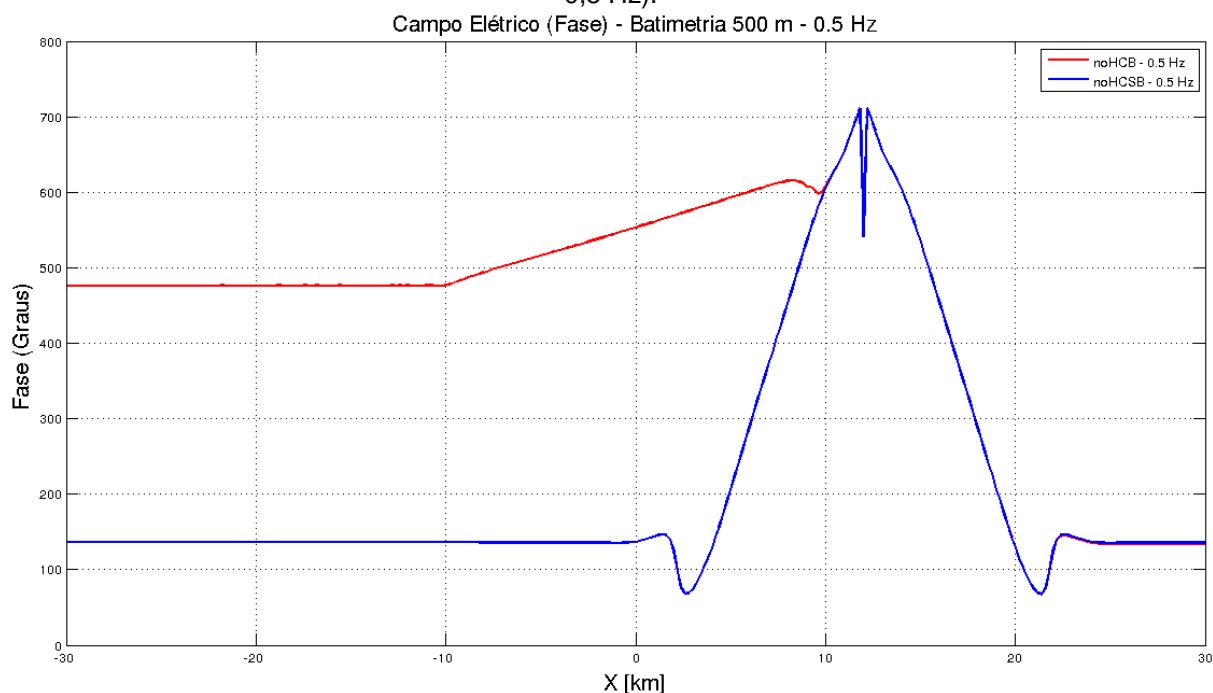
Figura 4.12: Efeito da Batimetria com uma variação de 1500 m (Fase do Campo Elétrico – frequência 0,25 Hz).



Sabendo disso, ao analisarmos a figura anterior, percebemos que a curva azul, que está associada à variação de fase do campo elétrico no modelo onde as camadas são plano-paralelas, só varia na região influenciada pela fonte, a qual está localizada em 12.000 m da origem, enquanto que no modelo onde há variação de batimetria a mudança de fase do campo elétrico permite inclusive a delimitação dos limites horizontais da rampa.

A Figura (4.13) a seguir ilustra a variação do campo elétrico quando este é adquirido a uma frequência de 0,5 Hz.

Figura 4.13: Efeito da Batimetria com uma variação de 1500 m (Fase do Campo Elétrico – frequência 0,5 Hz).

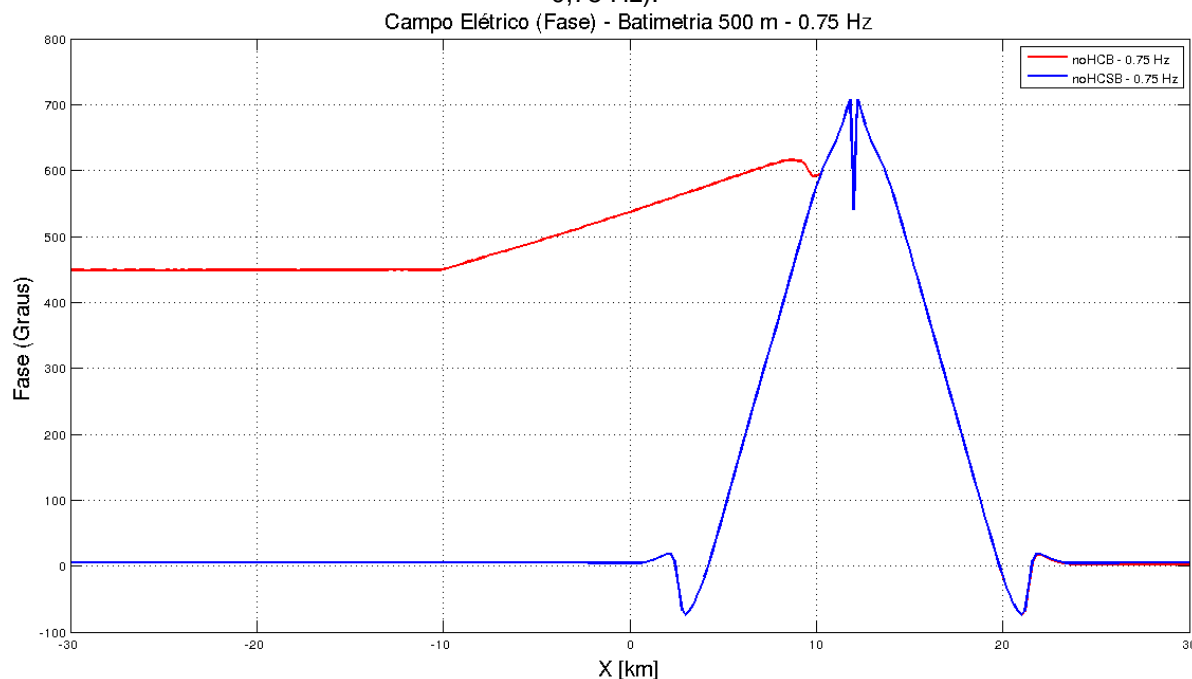


Fonte: Do autor (2016)

Com o aumento da frequência notamos que a mudança de fase do campo elétrico devido a variação topográfica torna-se mais sutil, isso porque, com o aumento da frequência o *skin depth* diminui e a energia do campo elétrico também, justificando uma mudança de fase mais suave.

Quando analisamos o gráfico referente a mudança de fase de um campo obtido numa frequência maior ainda, 0,75 Hz, Figura (4.14), a mudança de fase devido a presença da rampa se torna mais suave ainda, visto que o campo também possui uma energia menor.

Figura 4.14: Efeito da Batimetria com uma variação de 1500 m (Fase do Campo Elétrico – frequência 0,75 Hz).



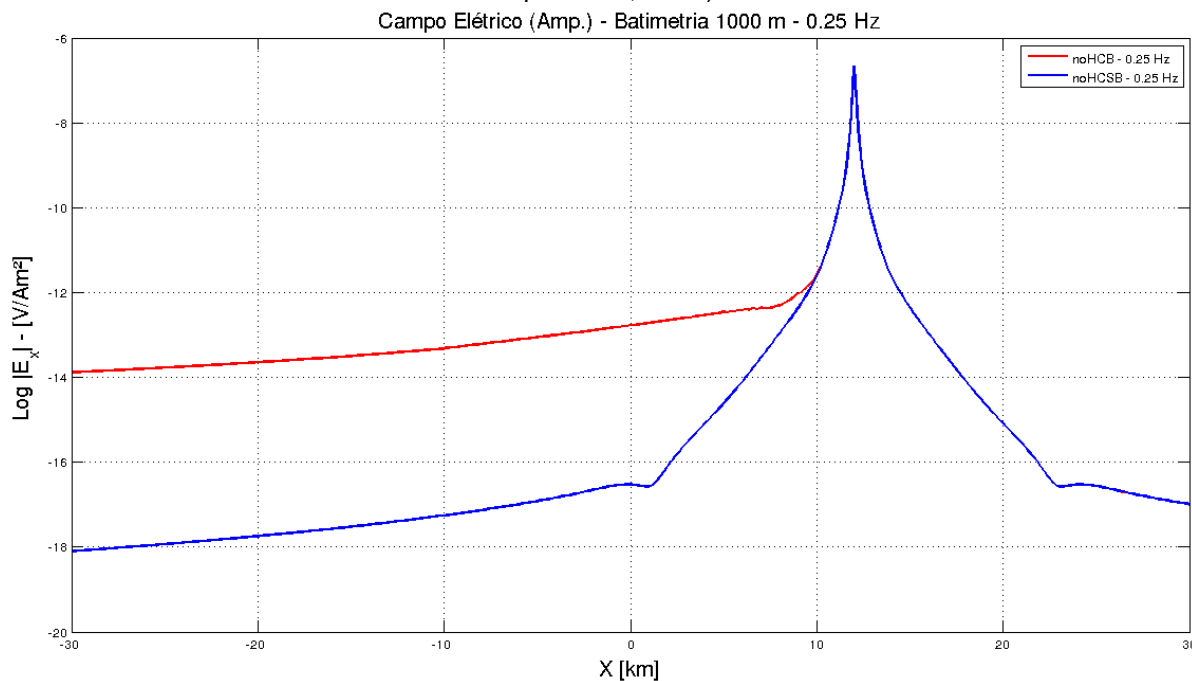
Fonte: Do autor (2016)

Portanto, assim como no caso do modelo anterior a influência de grandes variações da batimetria sobre o sinal, é maior quando uma frequência mais baixa é empregada, permitindo inclusive uma melhor delimitação da geometria do fundo do mar.

A seguir apresentaremos os resultados do efeito da batimetria sobre os campos eletromagnéticos, quando esta representa uma variação na topografia do terreno de cerca de 1.000 m. De modo que o transmissor continua localizado a 50 m base da rampa, em 12.000 m, e os receptores dispostos ao longo da superfície do fundo oceânico, espaçados entre si de 200 em 200 m.

Na Figura (4.15) observamos a amplitude do campo elétrico quando este é obtido a uma frequência de 0,25 Hz.

Figura 4.15: Efeito da Batimetria com uma variação de 1000 m (Amplitude do Campo Elétrico – frequência 0,25 Hz).

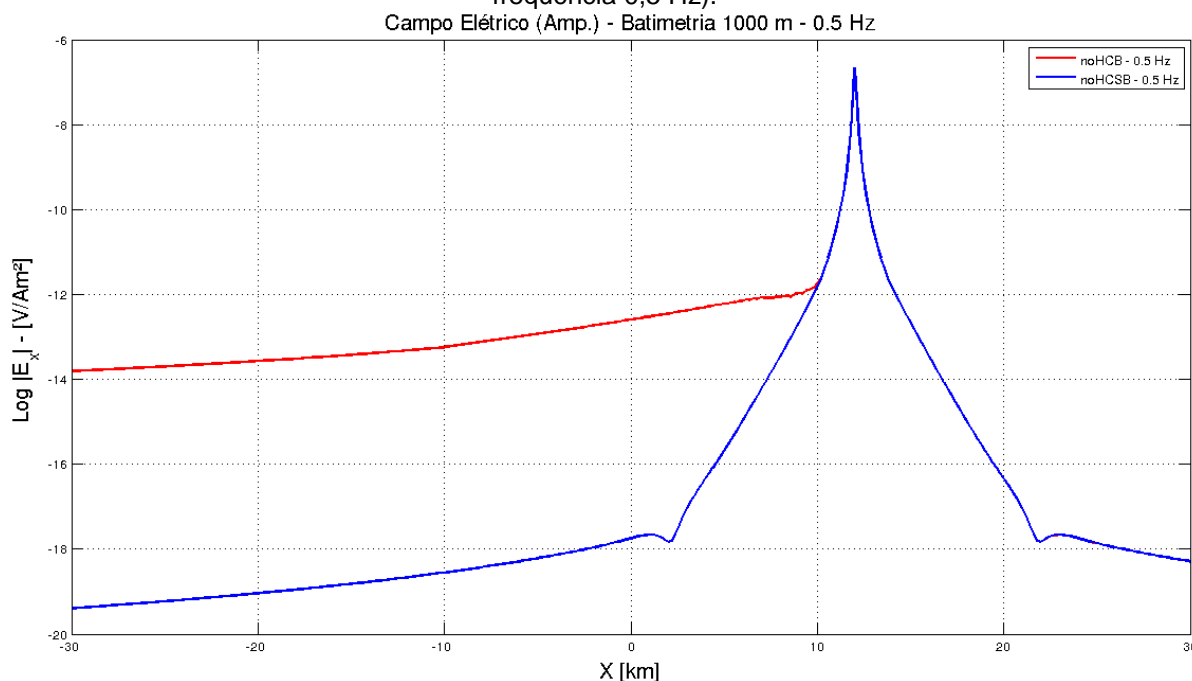


Fonte: Do autor (2016)

Analisando o gráfico anterior, claramente a amplitude do campo elétrico devido ao modelo que apresenta uma variação na batimetria, é maior que a amplitude do campo elétrico adquirido a partir de um modelo onde as camadas são plano-paralelas, devido ao fato de esta elevação no terreno comportar-se como uma anomalia, entretanto não é possível delimitar os limites horizontais desta rampa analisado apenas a amplitude do campo elétrico.

Na Figura (4.16) a seguir temos a amplitude campo elétrico referente a este mesmo modelo, só que na frequência de 0,5 Hz.

Figura 4.16: Efeito da Batimetria com uma variação de 1000 m (Amplitude do Campo Elétrico – frequência 0,5 Hz).

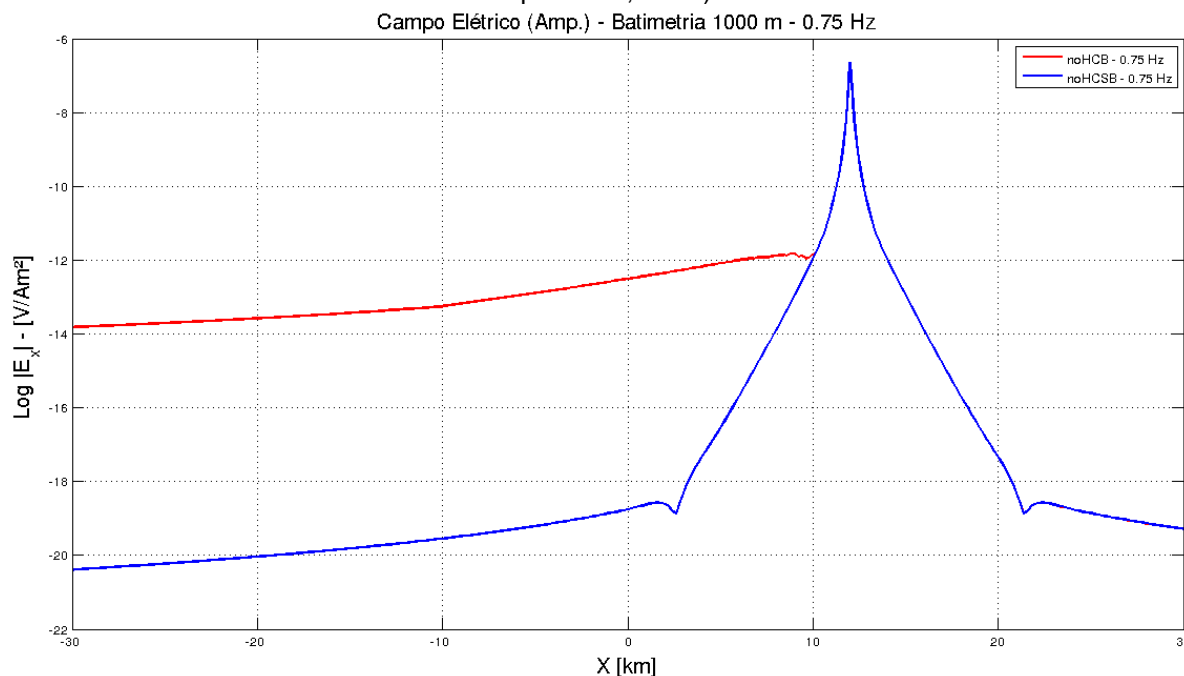


Fonte: Do autor (2016)

Neste caso, os limites horizontais da rampa continuam imperceptíveis, exceto por uma leve diminuição do campo na região próxima a quebra na base da rampa. Entretanto, a amplitude do campo elétrico referente ao modelo com batimetria aumentou, isso porque, como esta é uma batimetria mais suave e uma frequência mais elevada investiga regiões mais rasas, o campo secundário devido a rampa torna-se mais forte, resultando em um campo total maior que o obtido a uma frequência mais baixa.

Na Figura (4.17) a seguir temos a amplitude do campo elétrico numa frequência de 0,75 Hz.

Figura 4.17: Efeito da Batimetria com uma variação de 1000 m (Amplitude do Campo Elétrico – frequência 0,75 Hz).

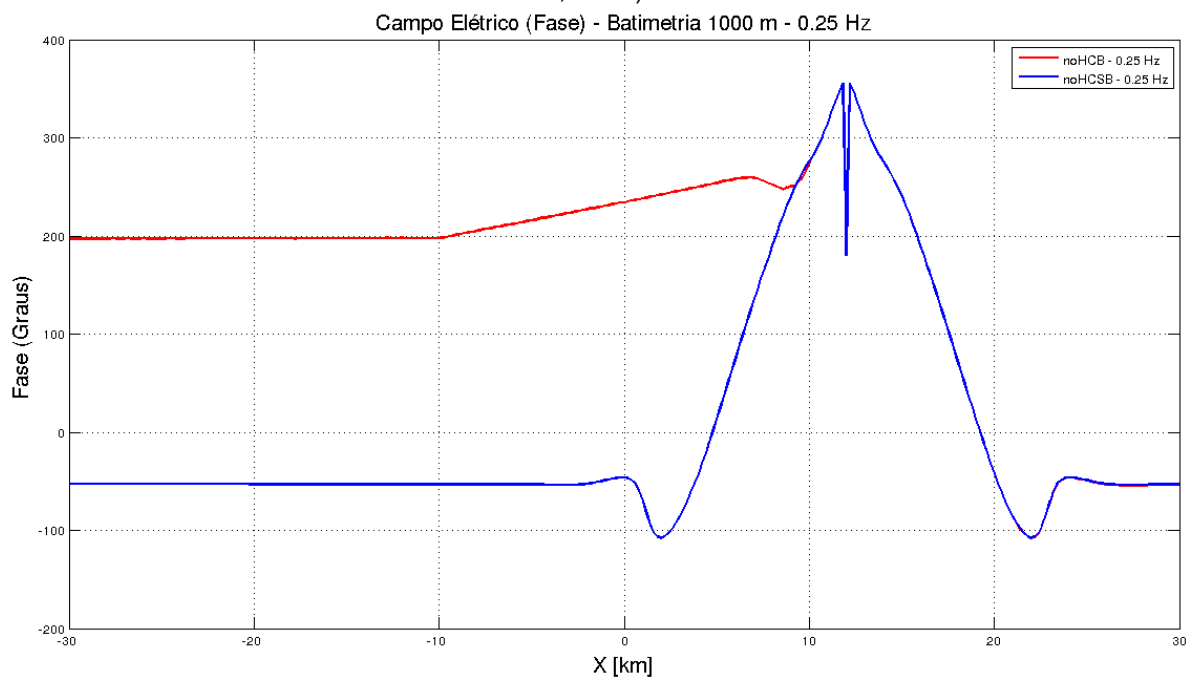


Fonte: Do autor (2016)

No gráfico anterior a amplitude do campo referente ao modelo com batimetria torna a aumentar, enquanto que a amplitude do campo referente ao modelo com camadas plano paralelas continua diminuindo. Próximo à quebra da base da rampa observa-se uma diminuição mais acentuada do campo, entretanto ainda não é possível delimitar o topo da rampa.

Os gráficos seguintes referem-se a mudança de fase do campo elétrico. Na Figura (4.18) temos a variação da fase do campo elétrico quando este é adquirido a uma frequência de 0,25 Hz.

Figura 4.18: Efeito da Batimetria com uma variação de 1000 m (Fase do Campo Elétrico – frequência 0,25 Hz).

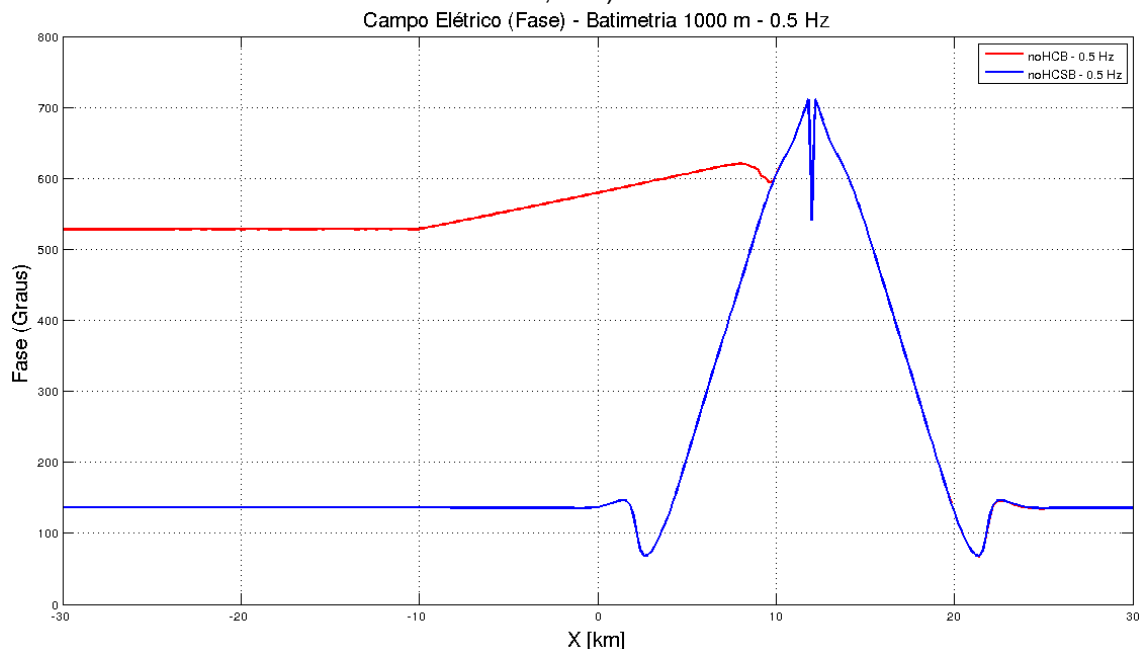


Fonte: Do autor (2016)

Neste gráfico observamos que o efeito da defasagem do campo devido a presença da rampa é pequeno, mas ainda assim é possível delimitar as bordas desta.

Na Figura (4.19) a seguir observamos as mudanças de fase do campo quando este é adquirido a uma frequência de 0,5 Hz.

Figura 4.19: Efeito da Batimetria com uma variação de 1000 m (Fase do Campo Elétrico – frequência 0,5 Hz).

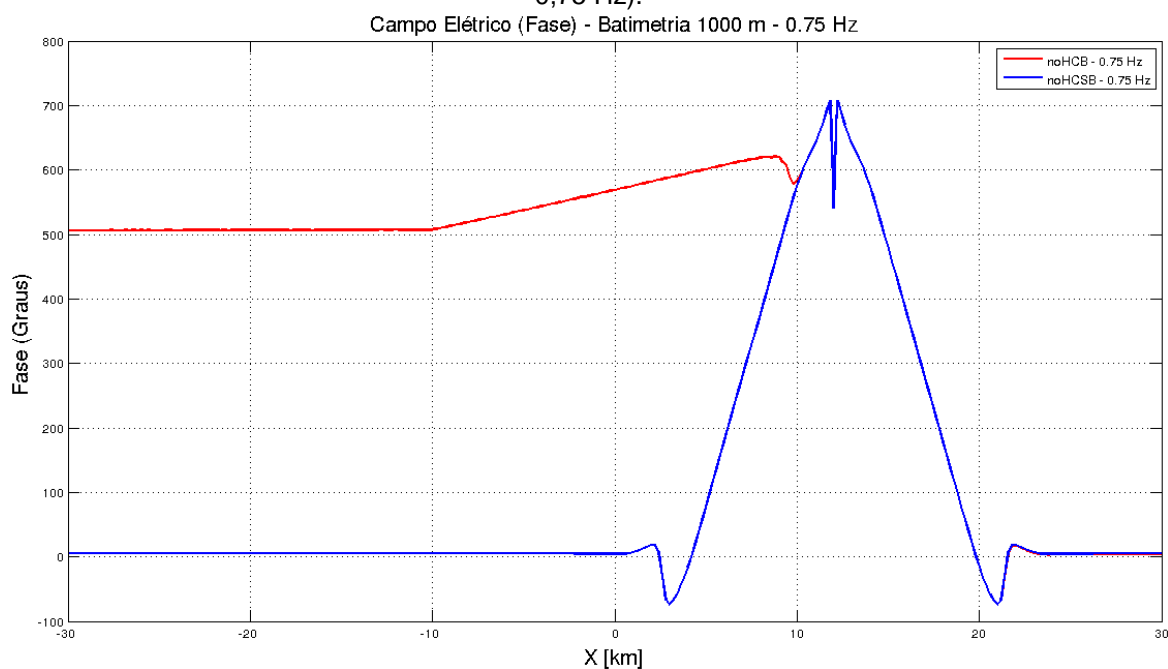


Fonte: Do autor (2016)

A mudança de fase do campo elétrico devido a presença da rampa permite a delimitação do seu topo e base.

A Figura (2.20) a seguir ilustra a defasagem de um campo adquirido a 0,75 Hz.

Figura 4.20: Efeito da Batimetria com uma variação de 1000 m (Fase do Campo Elétrico – frequência 0,75 Hz).



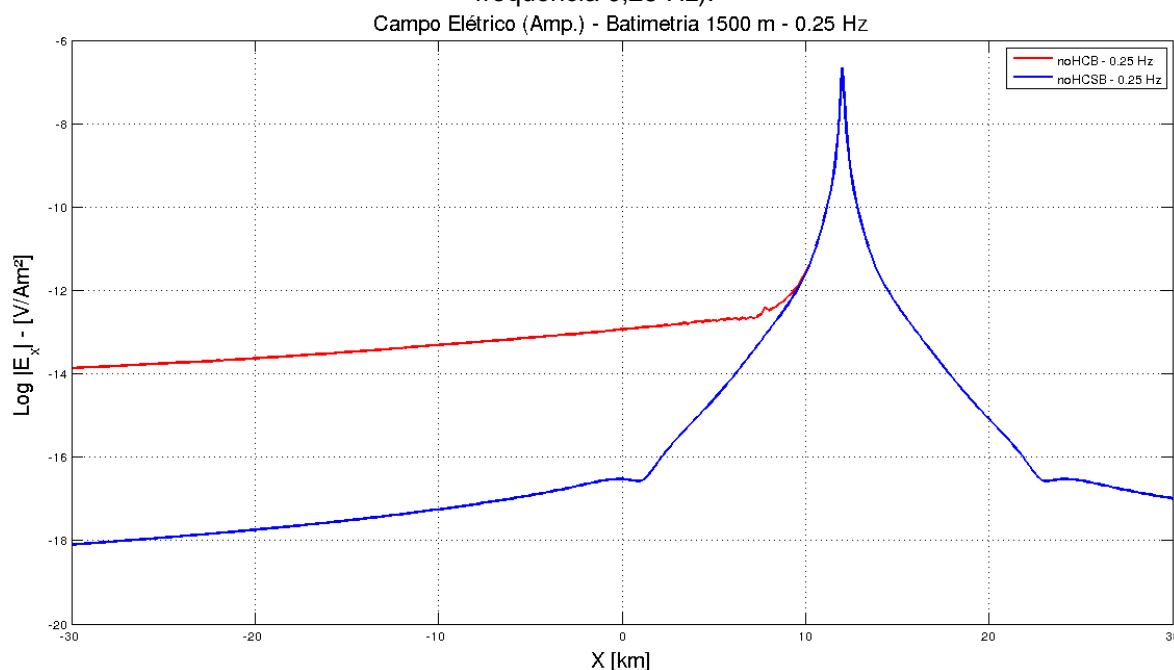
Fonte: Do autor (2016)

No gráfico anterior ainda é possível delimitar a extensão lateral da rampa devido a defasagem que ela causa no campo, bem como a extensão da região influenciada pelo campo emitido pela fonte.

Como pudemos perceber, num modelo onde a variação topográfica é mais suave, o efeito desta tornou-se mais acentuado quando uma frequência mais alta foi empregada.

Nos gráficos a seguir estaremos analisando o efeito que uma variação na batimetria devido a presença de uma rampa, cujo topo encontra-se a 1.500 m do nível do mar e a base a 2.000 m deste, têm sobre os campos eletromagnéticos. Na Figura (4.21) temos as amplitudes dos campos elétricos referentes ao modelo com variação na batimetria e ao modelo com fundo plano, adquirido numa frequência de 0,25 Hz.

Figura 4.21: Efeito da Batimetria com uma variação de 500 m (Amplitude do Campo Elétrico – frequência 0,25 Hz).

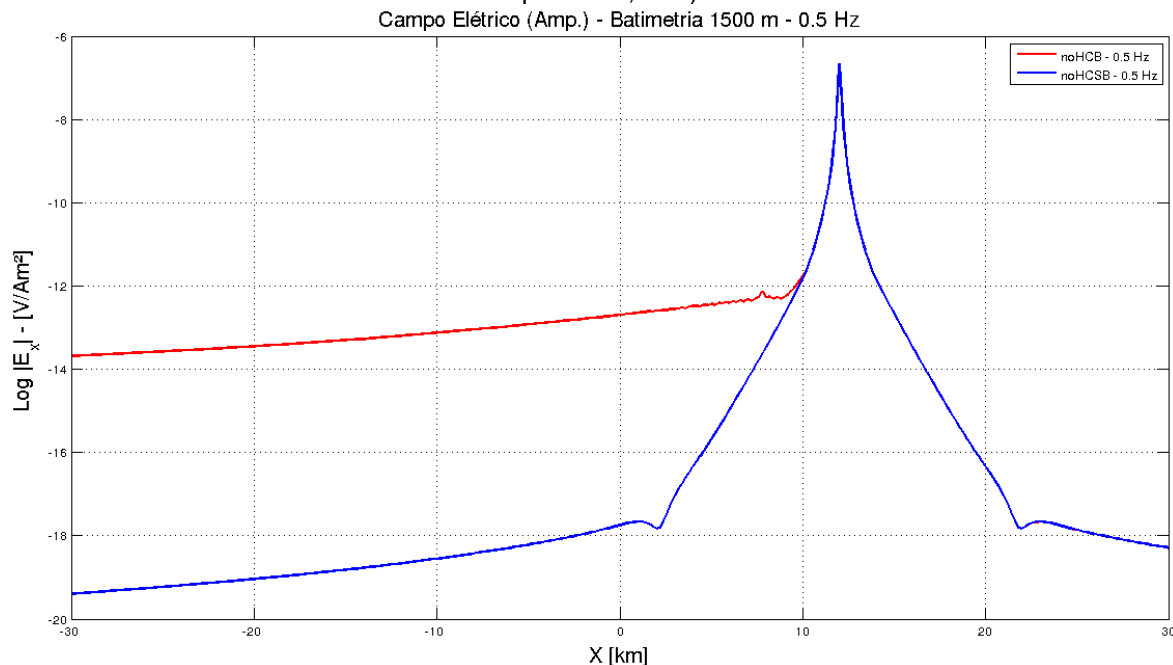


Fonte: Do autor (2016)

Como podemos perceber na região onde há uma quantidade maior de sedimentos devido a rampa, a amplitude do campo elétrico é maior quando comparada com a amplitude do campo elétrico do modelo com fundo plano, isso porque, esse volume de rocha compreendido acima de 2.000 m comporta-se como uma heterogeneidade, sendo fonte de campo secundário que somado ao campo primário, resulta em um campo total mais forte. Já para as regiões distantes desta heterogeneidade os campos são iguais, conforme relatado por Jiracek (1990).

Analisemos agora a amplitude de um campo obtido a uma frequência mais alta, 0,5 Hz, Figura (4.22).

Figura 4.22: Efeito da Batimetria com uma variação de 500 m (Amplitude do Campo Elétrico – frequência 0,5 Hz).

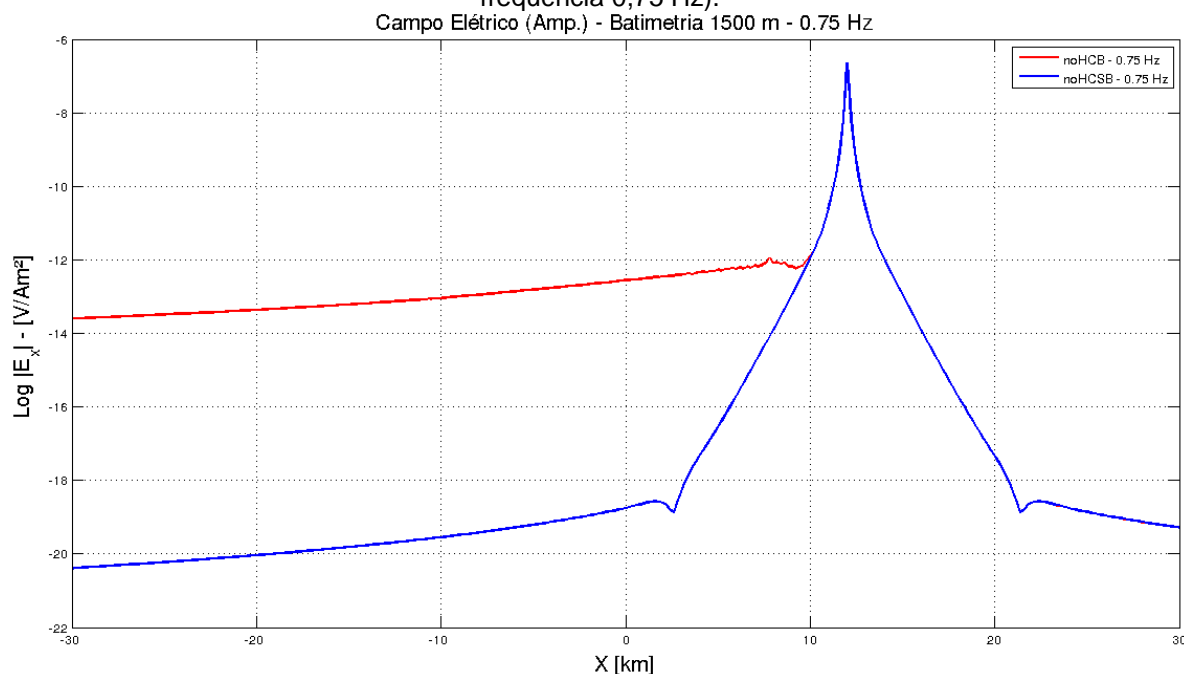


Fonte: Do autor (2016)

Como estamos tratando de uma batimetria com uma variação mais suave, e devido ao fato de um *skin deph* ser inversamente proporcional à frequência, o aumento da frequência implica numa investigação mais rasa, de modo que a amplitude do campo elétrico referente ao modelo com variação topográfica aumenta, curva vermelha, devido ao aumento da influência da massa rochosa acima de 2.000 m de profundidade, enquanto que a amplitude do campo elétrico devido ao modelo onde o assoalho oceânico é plano diminui, curva azul.

A Figura (4.23) a seguir ilustra o gráfico da amplitude do campo elétrico quando este é adquirido a uma frequência de 0,75 Hz.

Figura 4.23: Efeito da Batimetria com uma variação de 500 m (Amplitude do Campo Elétrico – frequência 0,75 Hz).



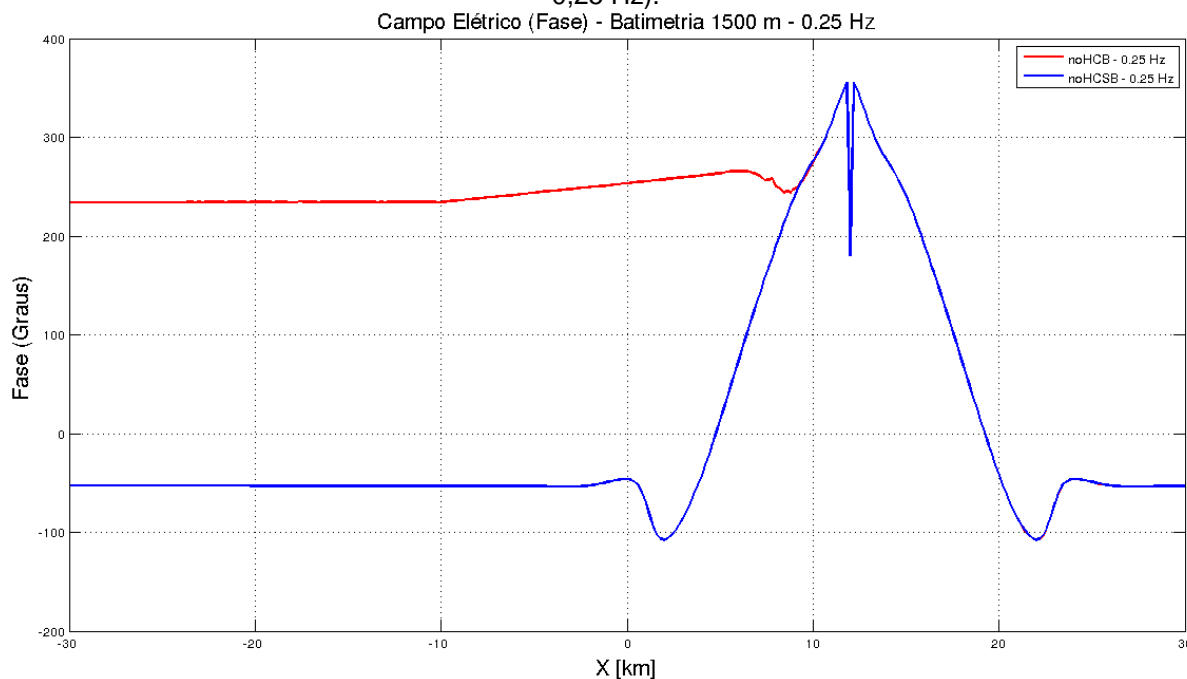
Fonte: Do autor (2016)

Numa frequência mais elevada os efeitos da rampa tornam-se ainda maiores, de modo que a diferença de amplitude entre os dois campos cresce mais ainda.

Entretanto, em nenhuma das frequências anteriores foi possível delimitar a extensão lateral da rampa, para tanto analisemos agora o espectro de fase dos campos elétricos referentes aos modelos com e sem variação topográfica.

Na Figura (4.24) apresentamos a diferença de fase quando ambos os campos elétricos são adquirido numa frequência de 0,25 Hz.

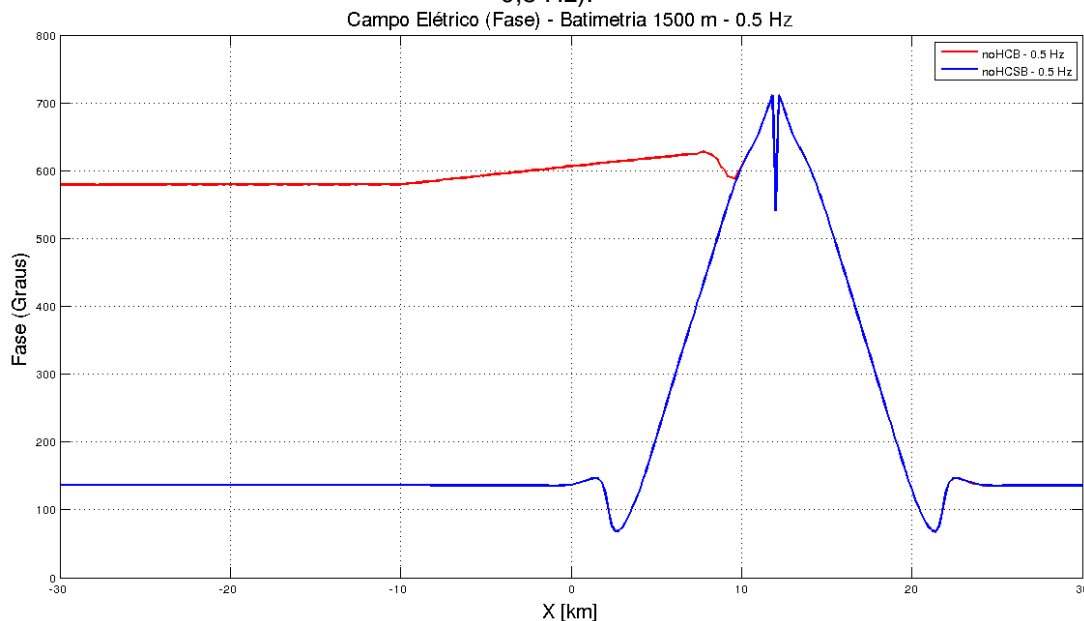
Figura 4.24: Efeito da Batimetria com uma variação de 500 m (Fase do Campo Elétrico – frequência 0,25 Hz).



Enquanto que o espectro de fase referente ao modelo no qual o fundo oceânico é plano varia apenas na região onde há influência do campo emitido pela fonte, curva azul, na curva vermelha, referente ao modelo cujo fundo oceânico apresenta uma rampa, apesar de sutil, ocorre uma defasagem do campo devido à presença desta, sendo possível inclusive a delimitação de sua extensão lateral.

A Figura (4.25) a seguir ilustra o gráfico do espectro de fase de um campo elétrico obtido a numa frequência de 0,5 Hz.

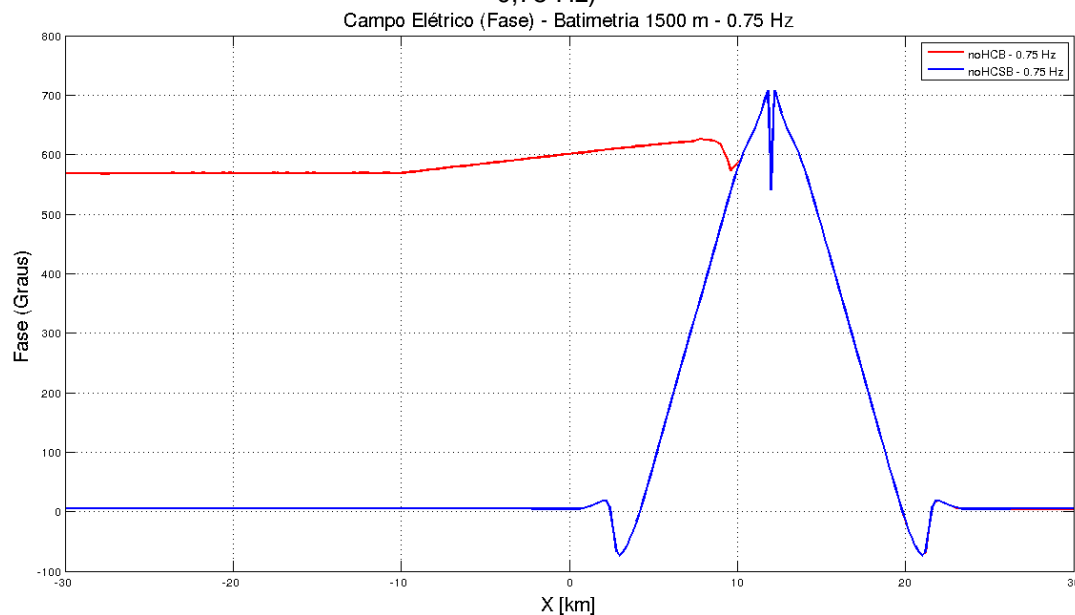
Figura 4.25: Efeito da Batimetria com uma variação de 500 m (Fase do Campo Elétrico – frequência 0,5 Hz).



Fonte: Do autor (2016)

Com o aumento da frequência observamos que a região do gráfico defasada devido à presença da rampa torna-se maior, aproximando-se mais das reais dimensões horizontais da rampa, 20.000 m. Quando empregamos uma frequência ainda maior, 0,75 Hz, esta região defasada do gráfico adquire proporções ainda mais próximas da extensão lateral da rampa, conforme podemos observar na Figura (4.26) a seguir.

Figura 4.26: Efeito da Batimetria com uma variação de 500 m (Fase do Campo Elétrico – frequência 0,75 Hz)

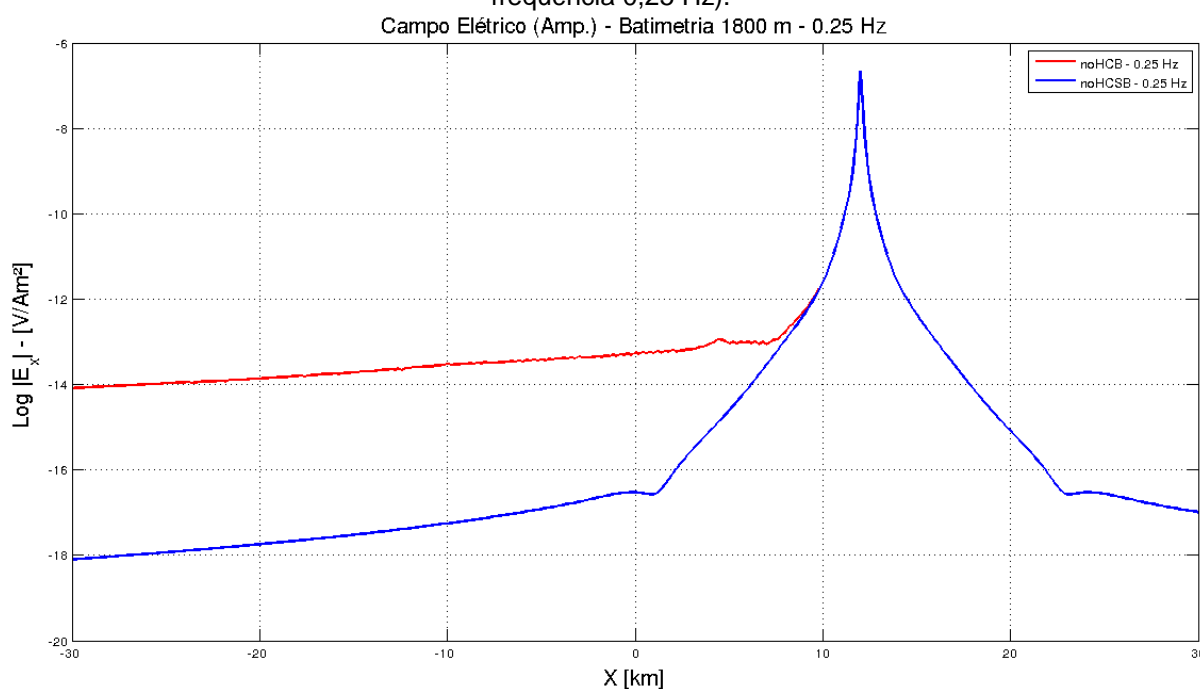


Fonte: Do autor (2016)

Em concordância com as conclusões obtidas a partir do modelo anterior, num modelo onde a variação topográfica é ainda mais suave, os efeitos do campo secundário devido a ela são mais nítidos quando simulamos uma aquisição de dados numa frequência mais elevada.

As figuras a seguir ilustram o comportamento dos campos eletromagnéticos quando o assoalho oceânico possui uma variação topográfica bem suave, neste caso, de 1.800 a 2.000 m abaixo do nível do mar. Inicialmente mostraremos o comportamento do campo quando este é adquirido a uma frequência de 0,25 Hz, Figura (4.27).

Figura 4.27: Efeito da Batimetria com uma variação de 200 m (Amplitude do Campo Elétrico – frequência 0,25 Hz).

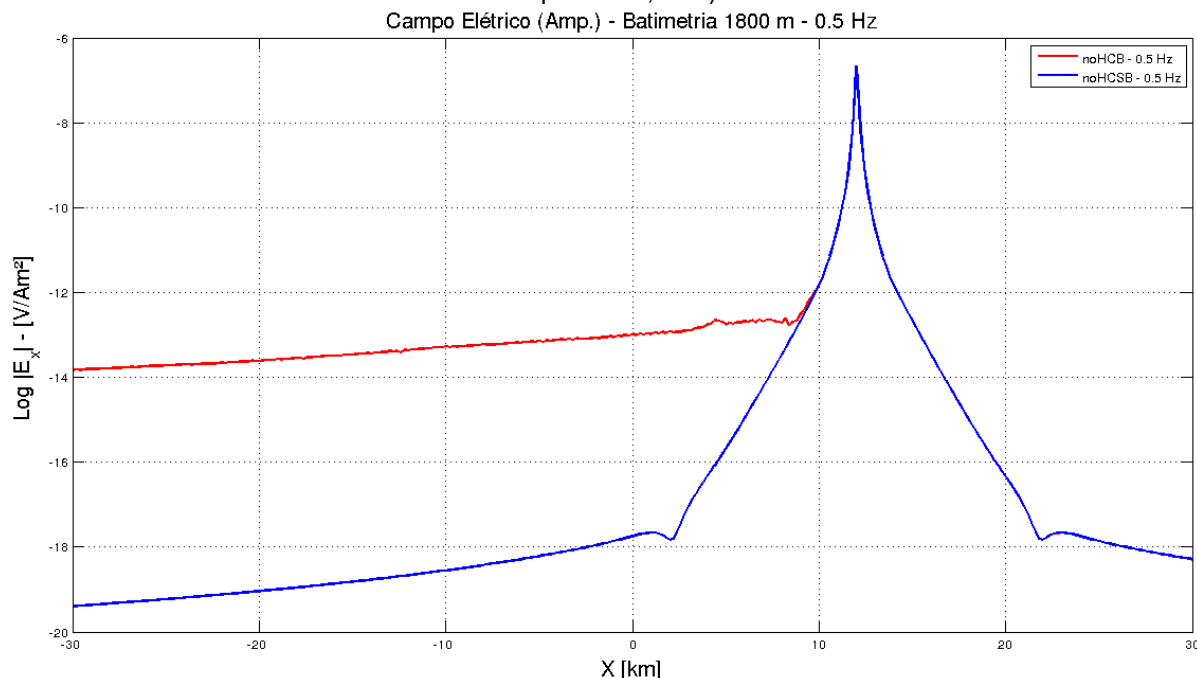


Fonte: Do autor (2016)

Apesar da variação na batimetria ser suave, o volume rochoso localizado acima de 2.000 m continua sendo uma fonte de campo secundário forte o suficiente para gerar uma diferença na amplitude entre os campos elétricos dos dois modelos. Enquanto que, para as regiões mais afastadas da heterogeneidade, os campos elétricos dos modelos onde há variação na batimetria, curva vermelha, e do modelo onde o fundo oceânico é plano, curva azul, possuem amplitudes iguais.

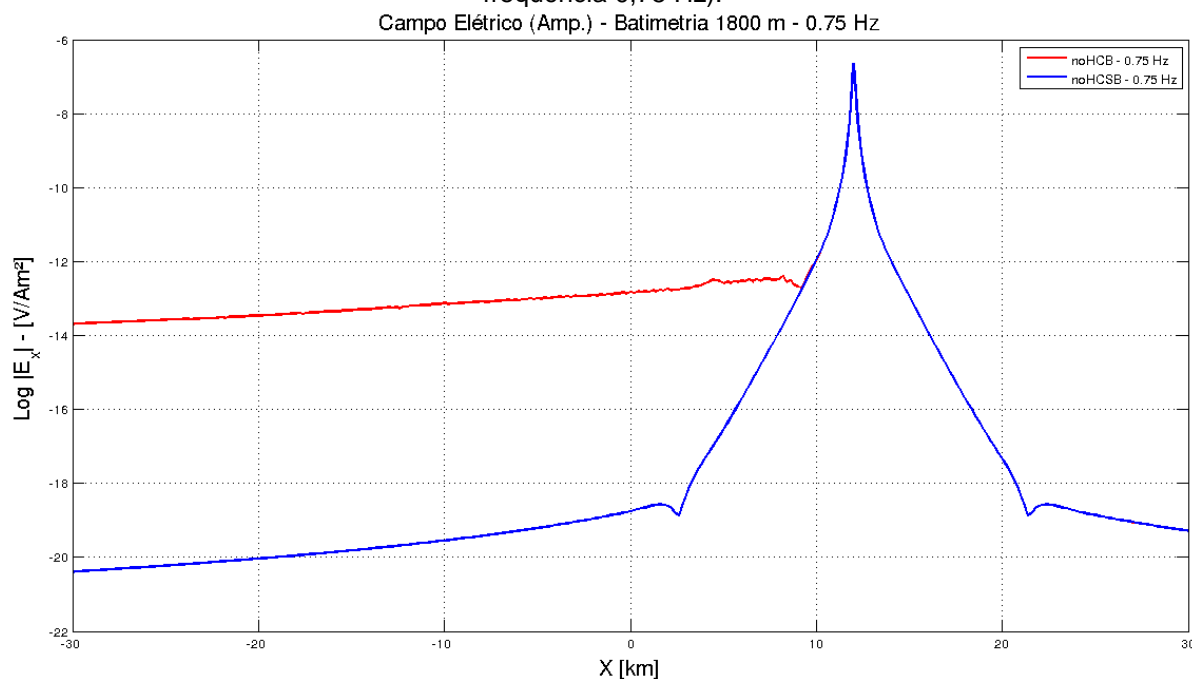
Na Figura (4.28) observamos as amplitudes dos campos elétricos de ambos os modelos quando estes são adquiridos a uma frequência de 0,5 Hz.

Figura 4.28: Efeito da Batimetria com uma variação de 200 m (Amplitude do Campo Elétrico – frequência 0,5 Hz).



O aumento da frequência implica na investigação de regiões mais rasas, de modo que, como temos apenas uma pequena variação na batimetria, o efeito desta acaba por ser amplificado, aumentando a amplitude do campo elétrico, enquanto que a amplitude do campo elétrico devido ao modelo com fundo plano diminui. Sendo assim, ao implementarmos uma frequência ainda maior a tendência é que a amplitude do campo elétrico referente ao modelo com variação topográfica, curva vermelha, aumente mais ainda, enquanto a amplitude do campo elétrico do modelo com camada plano-paralelas siga diminuindo, conforme observamos na Figura (4.29) a seguir.

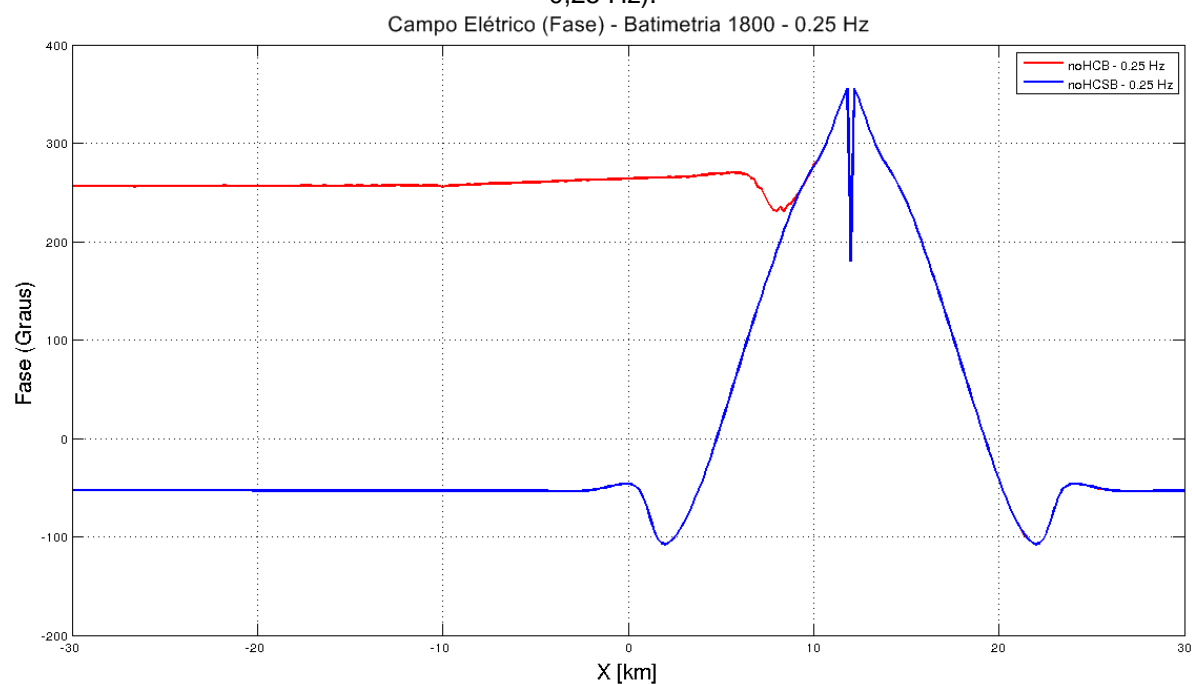
Figura 4.29: Efeito da Batimetria com uma variação de 200 m (Amplitude do Campo Elétrico – frequência 0,75 Hz).



Fonte: Do autor (2016)

Nas figuras a seguir procuraremos observar se uma rampa mesmo suave causa uma defasagem suficiente para que esta possa ser identificada, para tanto, analisemos primeiro a defasagem de um campo obtido numa frequência de 0,25 Hz na Figura (4.30) a seguir.

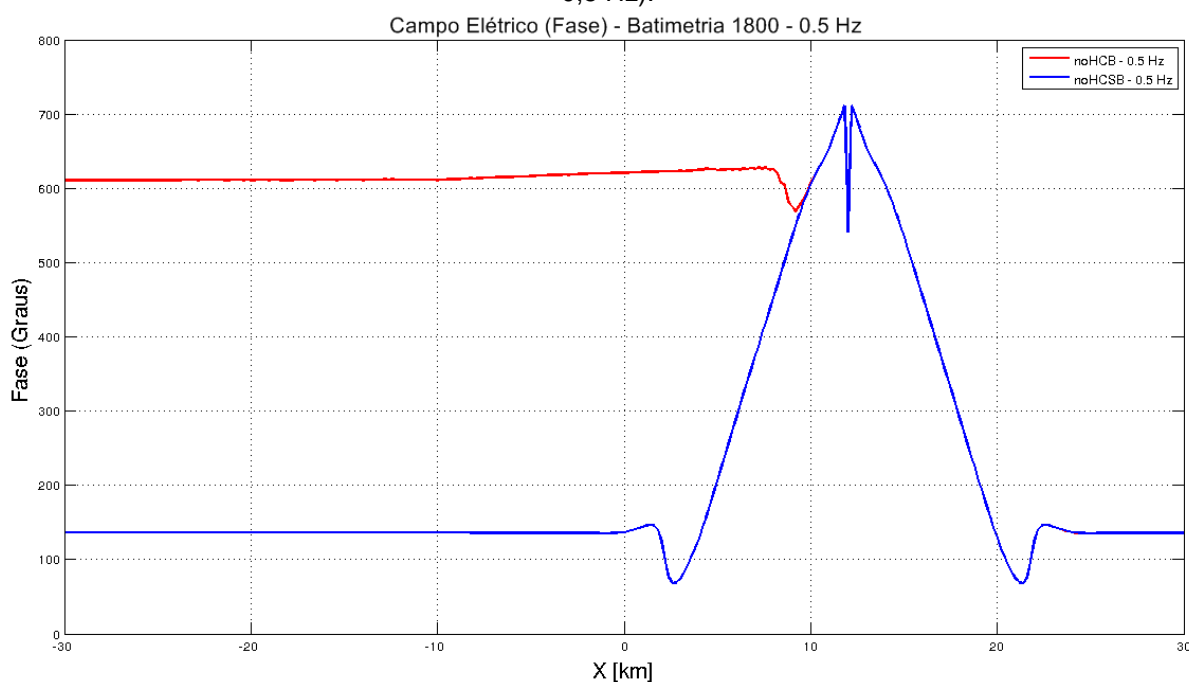
Figura 4.30: Efeito da Batimetria com uma variação de 200 m (Fase do Campo Elétrico – frequência 0,25 Hz).



Fonte: Do autor (2016)

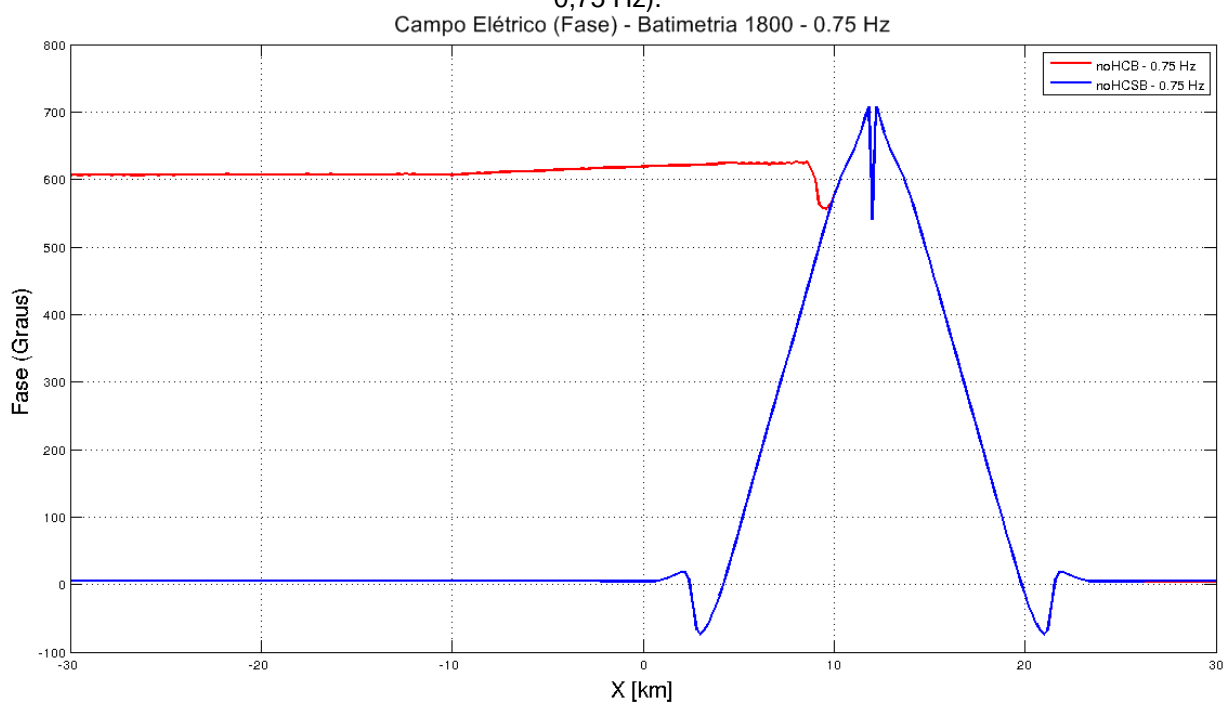
Analisando o gráfico anterior observamos a defasagem do campo devido à presença da fonte, região próxima a 12.000 m em ambos os campos, entretanto no campo adquirido a partir do modelo com variação topográfica, curva vermelha, observamos ainda um comportamento assimétrico da curva, que se deve ao volume de rocha localizado acima de 2.000 m, entretanto não é possível identificar os limites da rampa, de modo que os espectros de fase dos campos obtidos nas frequências de 0,5 e 0,75 Hz apresentam o mesmo comportamento, conforme podemos observar na Figuras (4.31) e (4.32) a seguir.

Figura 4.31: Efeito da Batimetria com uma variação de 200 m (Fase do Campo Elétrico – frequência 0,5 Hz).



Fonte: Do autor (2016)

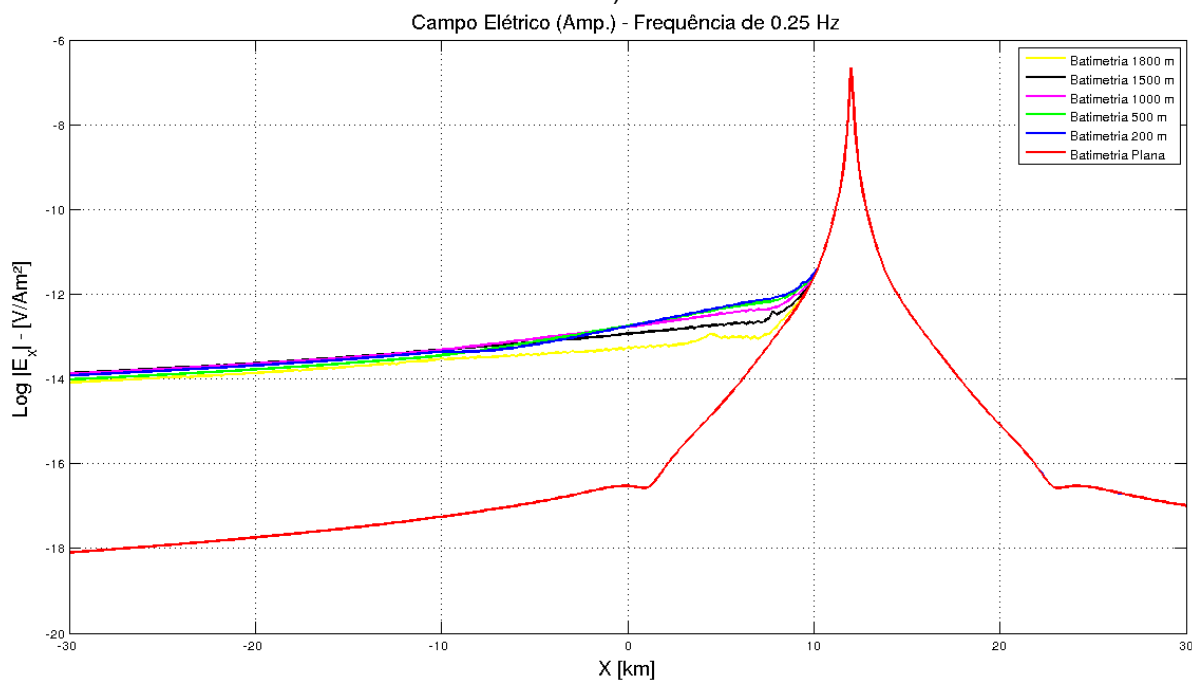
Figura 4.32: Efeito da Batimetria com uma variação de 200 m (Fase do Campo Elétrico – frequência 0,75 Hz).



Ou seja, mesmo quando o ambiente possui uma variação suave na batimetria ela continua exercendo forte influência sobre os dados, entretanto, a delimitação dos limites em que essa variação começa e termina, torna-se mais difícil, o que é tão problemático quanto o domínio que o campo gerado devido a fortes variações na batimetria exerce sobre o sinal em geral. Para que possamos observar melhor o efeito batimetria sobre o sinal analisemos a seguir gráficos que reúnem as variações topográficas apresentadas anteriormente para uma mesma frequência.

Na Figura (4.33) observamos o efeito das diversas variações topográficas sobre a amplitude do campo elétrico para a frequência de 0,25 Hz.

Figura 4.33: Efeito da Variação da Batimetria na Amplitude do Campo Elétrico (Frequência de 0,25 Hz).

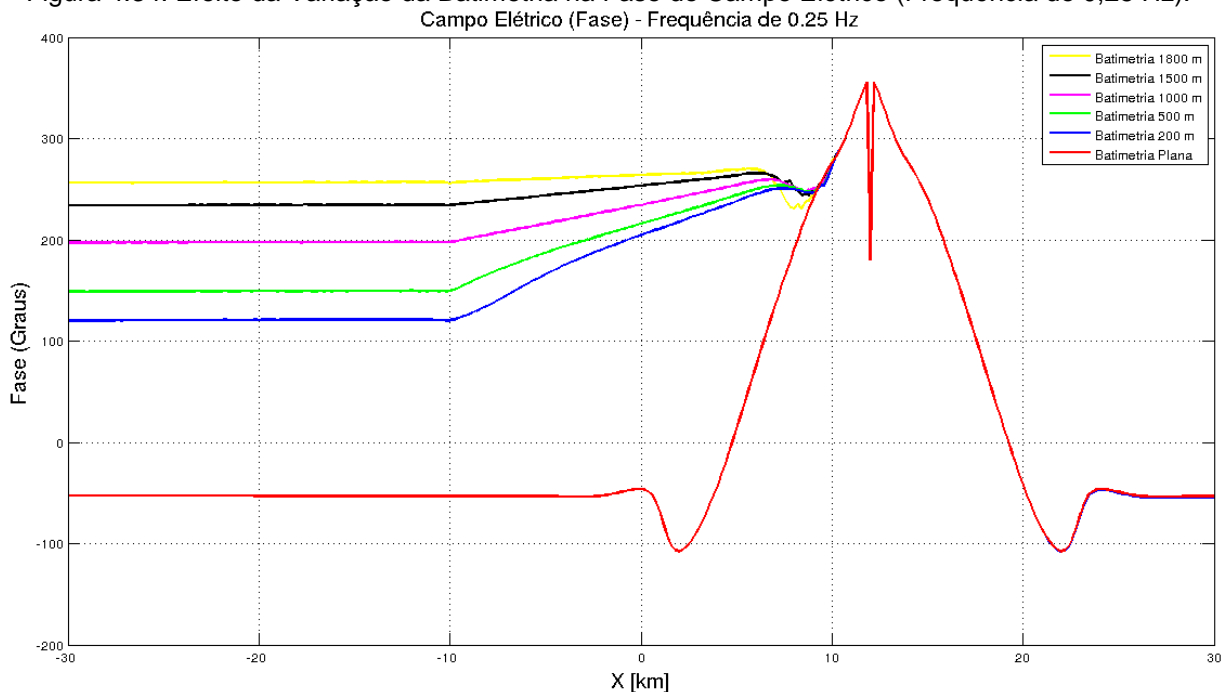


Fonte: Do autor (2016)

Para uma frequência baixa, como ela permite que os campos tenham um raio de investigação maior, quanto mais abrupta é variação da batimetria, maior é amplitude do campo elétrico.

A seguir, na Figura (4.34) observamos o efeito das diversas variações topográficas sobre o espectro de fase do campo elétrico para a frequência de 0,25 Hz.

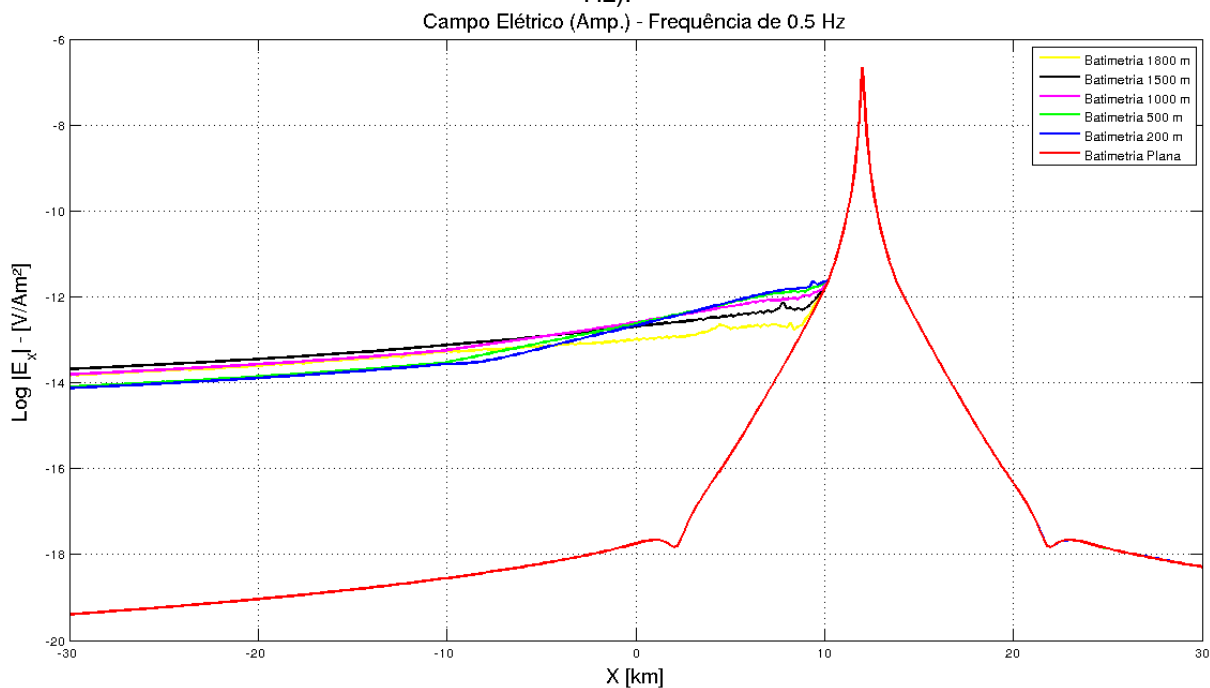
Figura 4.34: Efeito da Variação da Batimetria na Fase do Campo Elétrico (Frequência de 0,25 Hz).



Como já previsto, quando o campo elétrico possui uma frequência baixa, ele sofrerá interferências que provocarão mudanças de fase maiores, quanto mais distante a estrutura estiver, como é caso das batimetrias com variação mais abrupta, sendo possível delimitar com maior precisão a extensão das mesmas.

Na Figura (4.35) observamos o efeito das diversas variações topográficas sobre a amplitude do campo elétrico para a frequência de 0,5 Hz.

Figura 4.35: Efeito da Variação da Batimetria na Amplitude do Campo Elétrico (Frequência de 0,5 Hz).

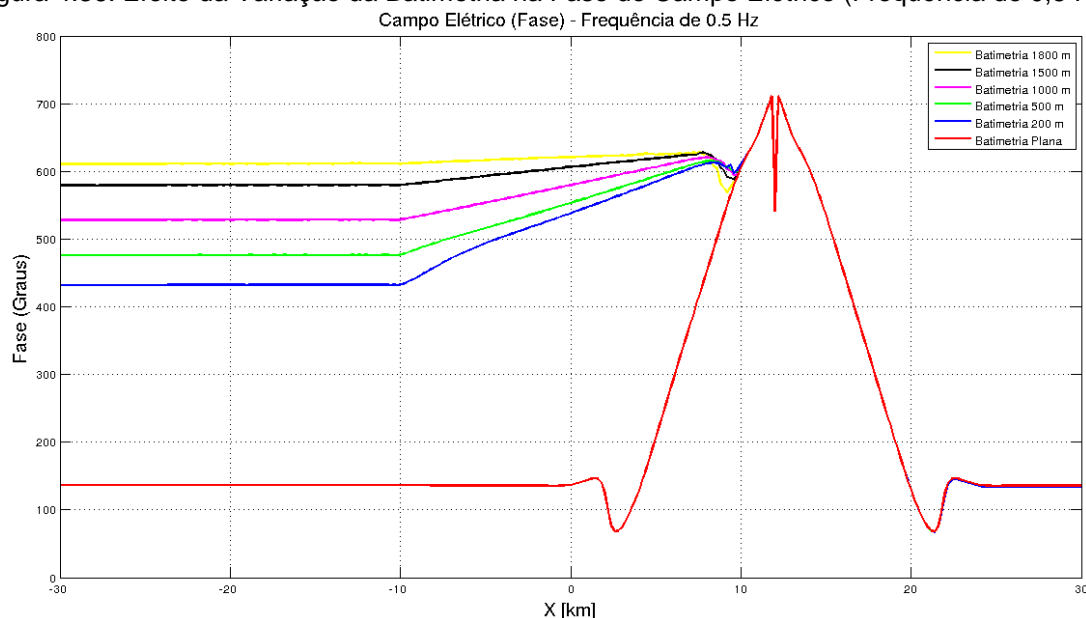


Fonte: Do autor (2016)

Quando empregamos uma frequência mais alta na modelagem do campo elétrico ocorre o efeito inverso do observado no caso anterior, as batimetrias mais suaves dão origem a campos elétricos com amplitude maior, que os campos devido à batimetrias com variações mais abruptas, devido à relação de proporcionalidade inversa entre o *skin depth* e a frequência.

A seguir, na Figura (4.36) observamos o efeito das diversas variações topográficas sobre o espectro de fase do campo elétrico para a frequência de 0,5 Hz.

Figura 4.36: Efeito da Variação da Batimetria na Fase do Campo Elétrico (Frequência de 0,5 Hz).

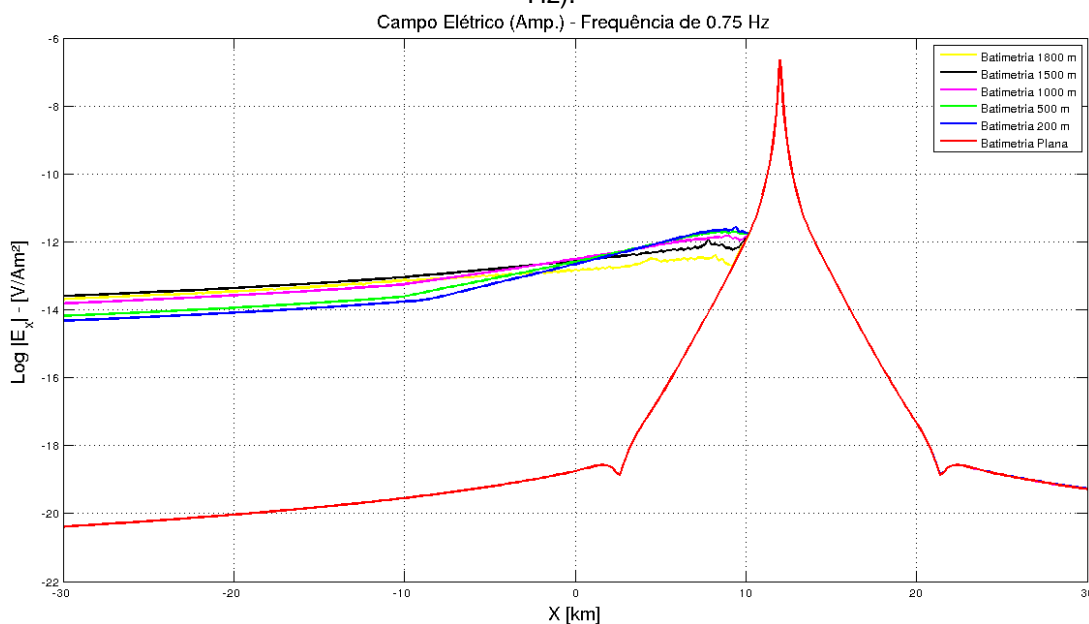


Fonte: Do autor (2016)

Entretanto, apesar da amplificação dos campos referentes à batimetrias mais suaves para a frequência mais elevada, a delimitação dos limites das rampas associadas a essas batimetrias torna-se mais difícil.

Na Figura (4.37) observamos o efeito das diversas variações topográficas sobre a amplitude do campo elétrico para a frequência de 0,75 Hz.

Figura 4.37: Efeito da Variação da Batimetria na Amplitude do Campo Elétrico (Frequência de 0,75 Hz).

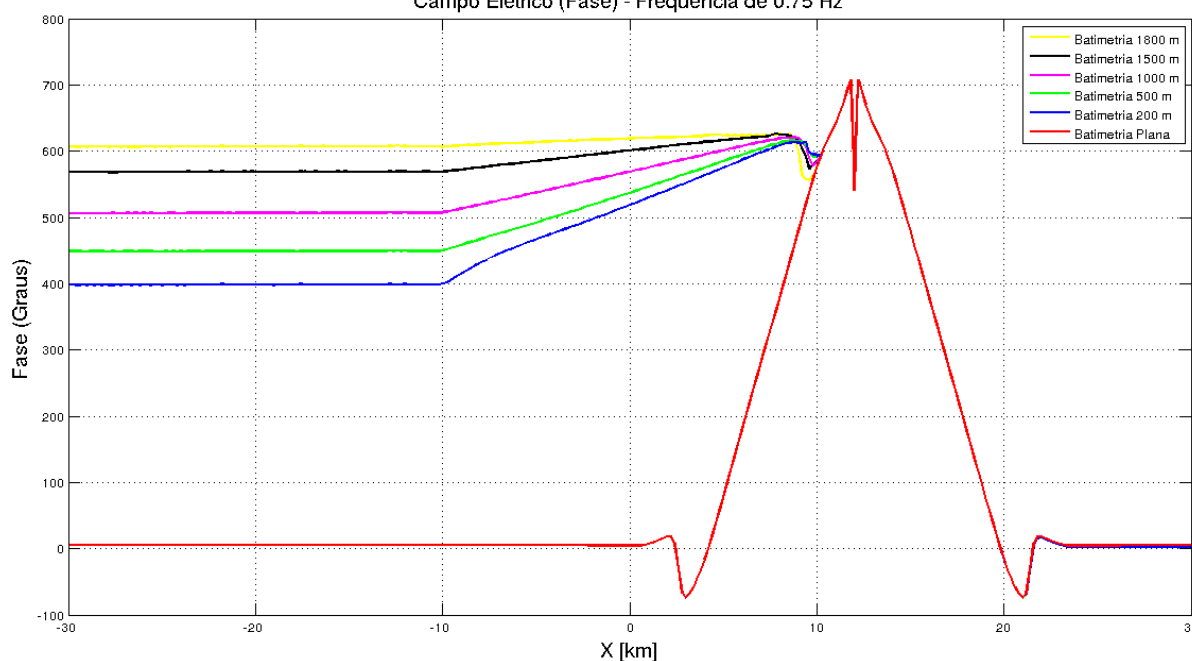


Fonte: Do autor (2016)

Assim como no caso anterior, com a implementação de uma frequência ainda maior na modelagem, a amplitude dos campos devido a variações na batimetria mais suaves aumentou mais ainda, enquanto que a amplitude dos campos obtidos a partir de modelos com variação mais abrupta na batimetria diminuiu. Isso porque, campos com frequências mais altas tendem a investigar regiões mais rasas, amplificando o efeito destas.

A seguir, na Figura (4.38) observamos o efeito das diversas variações topográficas sobre o espectro de fase do campo elétrico para a frequência de 0,5 Hz.

Figura 4.38: Efeito da Variação da Batimetria na Fase do Campo Elétrico (Frequência de 0,75 Hz).
Campo Elétrico (Fase) - Frequência de 0.75 Hz



Fonte: Do autor (2016)

Assim como no caso anterior, apesar do campo devido à batimetrias mais suaves ter sido amplificado devido ao emprego de uma frequência mais alta, a delimitação dos limites das rampas tornou-se ainda mais difícil que para os campos na frequência de 0,5 Hz, de modo que o espectro de fase para uma variação de 200 m na batimetria chega a ser constante na região compreendida pela rampa.

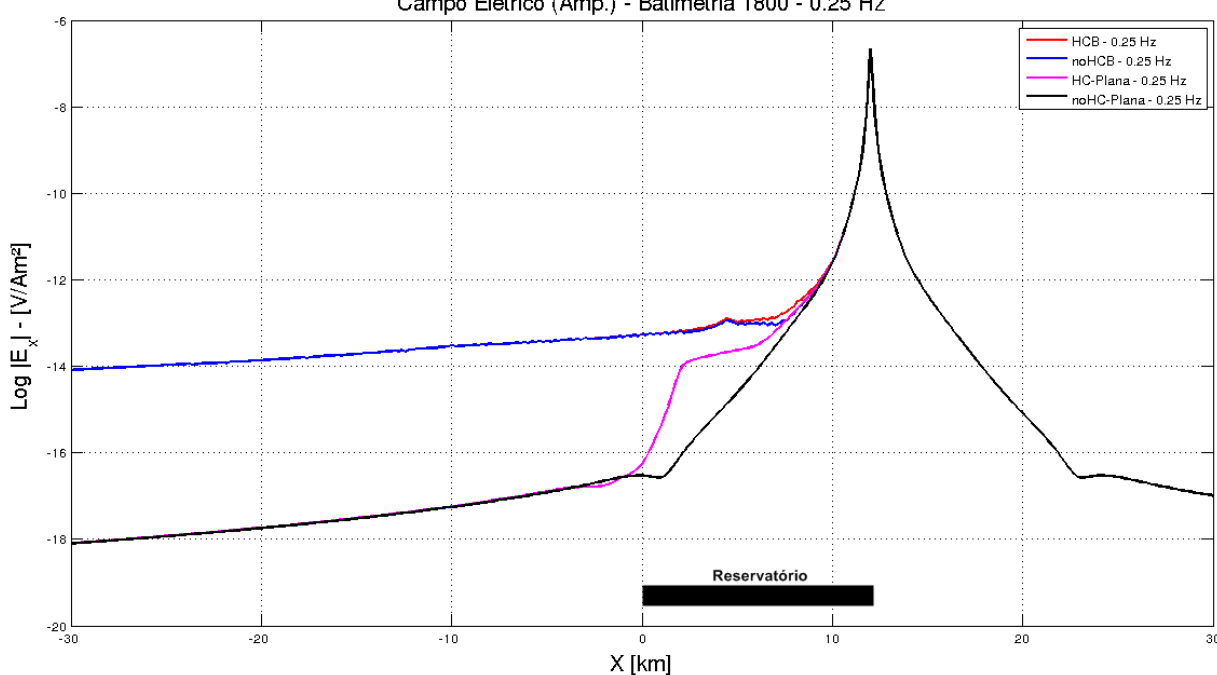
4.1.EFEITO DO RESERVATÓRIO NA MODELAGEM DE AMBIENTES COM BATIMETRIA

Nesta secção, nosso objetivo é avaliar o nível de influencia que a batimetria do ambiente em que os dados foram adquiridos tem na identificação de reservatórios de hidrocarboneto, em uma aquisição empregando o MCSEM. Para tanto modelamos ambientes com e sem reservatório, aos quais iremos nos referir como HCB e noHCB, respectivamente, de modo que avaliamos seus resultados para diferentes frequências e para topografias com diferentes inclinações, comparando-os com os resultados para um modelo no qual o fundo oceânico é plano.

Nos gráficos a seguir buscamos identificar a presença de um reservatório localizado a 500 m de profundidade da parte mais profunda do fundo oceânico, com uma extensão lateral de 12 km, quando a aquisição de dados é realizada num ambiente com uma variação topográfica de 200 m. Para tanto, a cada 200 m foram dispostos receptores ao longo do assoalho oceânico e o transmissor foi posto a uma distância de 12 km da origem do modelo.

A Figura (4.39) ilustra a amplitude do campo elétrico referente ao modelo anteriormente descrito, quando a frequência de aquisição de dados é 0,25 Hz.

Figura 4.39: Efeito do Reservatório num Ambiente com Variação de Batimetria de 200 m (Amplitude do Campo Elétrico – frequência de 0,25 Hz).
Campo Elétrico (Amp.) - Batimetria 1800 - 0.25 Hz

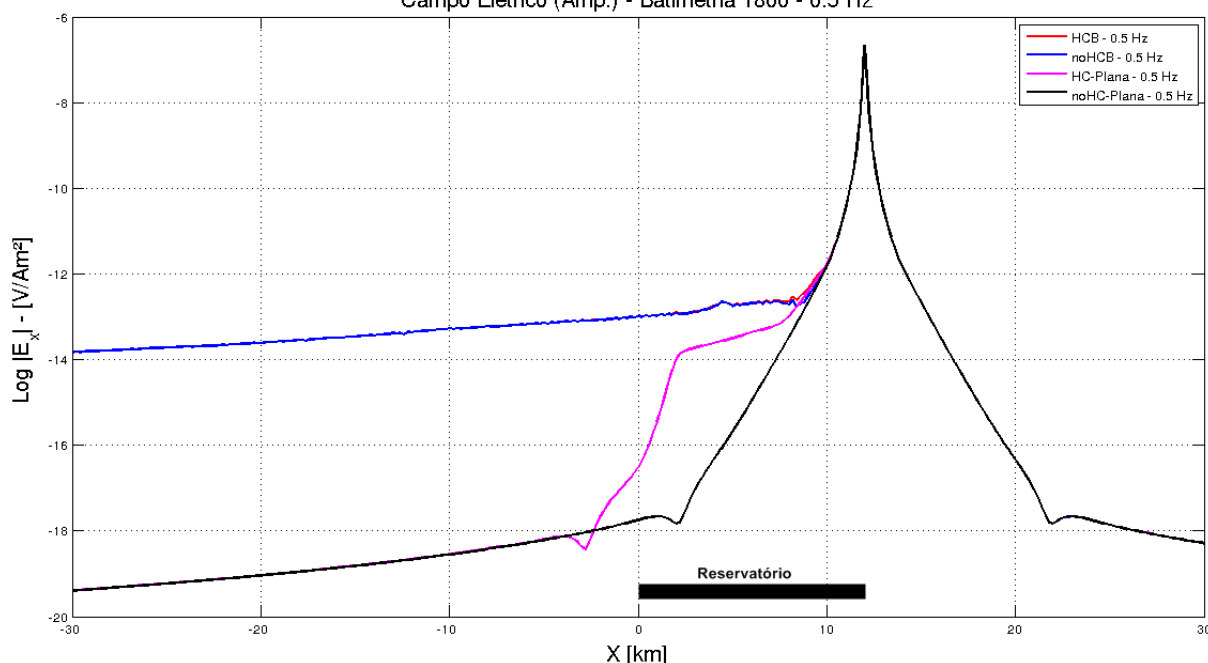


Fonte: Do autor (2016)

Apesar de estarmos tratando de um modelo com uma variação de batimetria suave, é nítida a diferença de amplitude entre os modelos com e sem reservatório para o modelo onde o fundo do mar é plano, quando comparada com a diferença de amplitude entre os campos na presença e na ausência do reservatório de ambientes com variação de batimetria, comprovando que a batimetria ainda domina o sinal, isso porque, além de termos um grande volume de rocha acima de 2.000 m, os receptores estão localizados bem acima desta, que se comporta como uma heterogeneidade. Entretanto, como a variação da batimetria é bem suave a assimetria da curva é menor, devido ao ambiente simulado aproximar-se do plano.

A Figura (4.40) a seguir ilustra a amplitude do campo elétrico quando este é adquirido a uma frequência mais elevada, 0,5 Hz, permitindo a investigação de regiões mais rasas.

Figura 4.40: Efeito do Reservatório num Ambiente com Variação de Batimetria de 200 m (Amplitude do Campo Elétrico – frequência de 0,5 Hz).
Campo Elétrico (Amp.) - Batimetria 1800 - 0.5 Hz



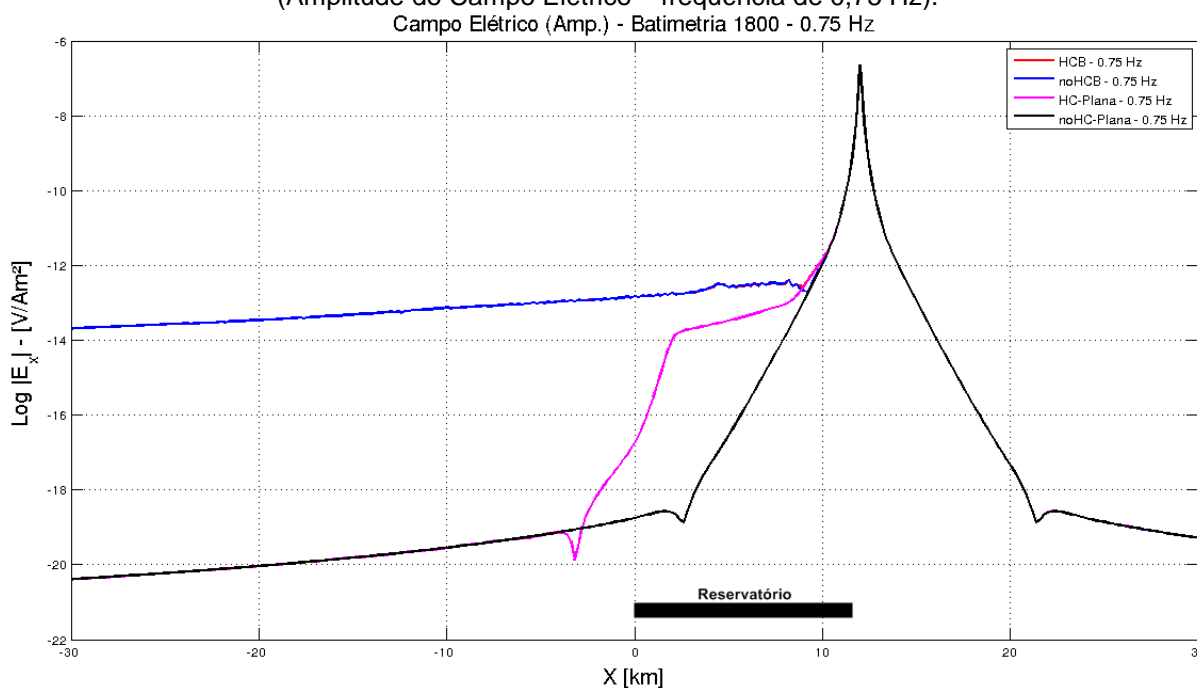
Fonte: Do autor (2016)

Com o aumento da frequência a amplitude de ambas as curvas referentes aos modelos onde há variação da batimetria aumentam, devido ao campo secundário gerado pelo volume de rocha localizada acima de 2.000 m tornar-se mais forte, e ao *skin depth* ser menor, permitindo a investigação de regiões mais rasas, o que deveria favorecer uma melhor detecção do reservatório de hidrocarboneto, que se encontra numa distância relativamente baixa, entretanto nota-se uma diferença menor entre as amplitudes das curvas azul, com batimetria e sem reservatório, e vermelha, com

batimetria e com reservatório. Entretanto, como já era de se esperar, a amplitude das curvas referentes ao modelo sem variação na batimetria diminuem, porém a diferença entre campos referentes ao modelo com reservatório, curva magenta, e sem reservatório, curva preta, aumenta.

A Figura (4.41) a seguir ilustra a amplitude do campo elétrico quando implementamos uma frequência ainda mais elevada, 0,75 Hz.

Figura 4.41: Efeito do Reservatório num Ambiente com Variação de Batimetria de 200 m (Amplitude do Campo Elétrico – frequência de 0,75 Hz).



Fonte: Do autor (2016)

Com o aumento da frequência a amplitude dos gráficos associados ao modelo sem variação na batimetria diminui mais ainda, entretanto a diferença de amplitude dos campos na presença e na ausência do reservatório, curvas magenta e preta respectivamente, segue aumentando.

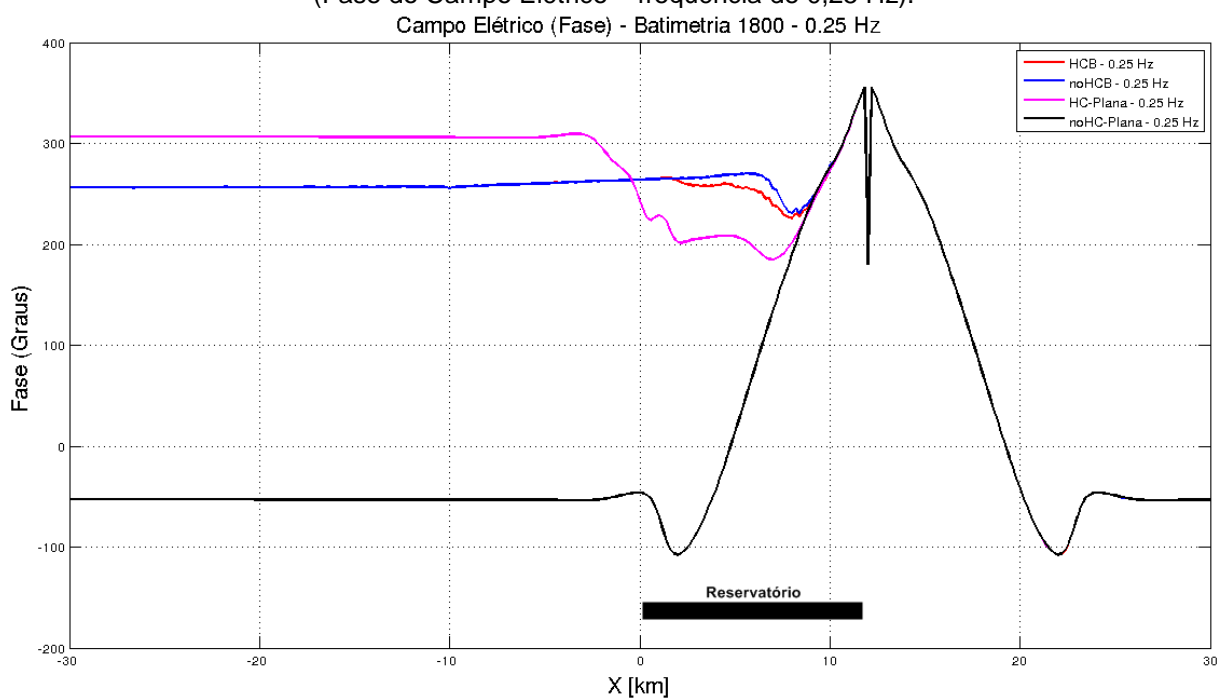
Já para os modelos com variação da batimetria, com o aumento da frequência a amplitude dos campos também aumenta, entretanto a diferença de amplitude entre as curvas referentes aos modelos com reservatório, curva vermelha, e sem reservatório, curva azul, torna-se imperceptível, isso provavelmente se deve a um *skin depth* muito baixo que leva a uma atenuação do campo numa profundidade muito rasa, de modo que o efeito do reservatório é completamente mascarado pelo efeito da batimetria.

Sendo assim, em nenhuma das curvas anteriores foi possível delimitar a extensão lateral do reservatório, que é de 12 km, para tanto analisemos agora o

espectro de fase do campo elétrico, o qual sofre interferência sempre que o campo intercepta a interface de uma heterogeneidade.

A Figura (4.42) ilustra o espectro de fase do campo elétrico adquirido para a frequência de 0,25 Hz.

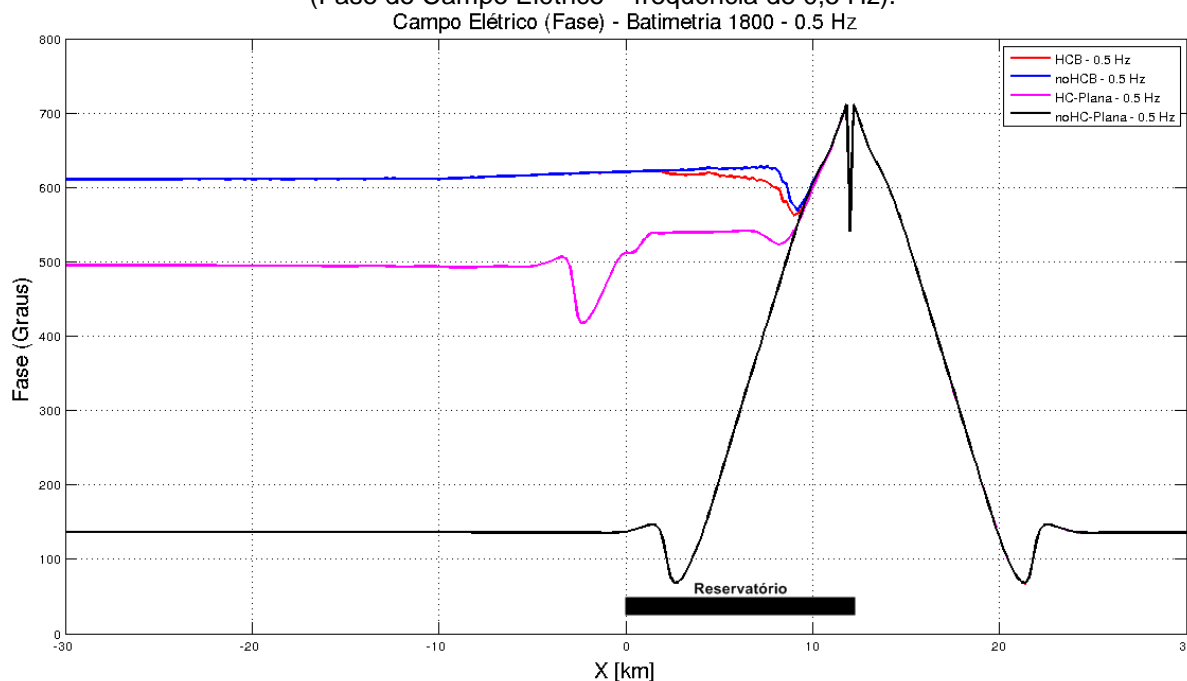
Figura 4.42: Efeito do Reservatório num Ambiente com Variação de Batimetria de 200 m (Fase do Campo Elétrico – frequência de 0,25 Hz).



Podemos observar um comportamento assimétrico dos campos associados ao modelo com variação na batimetria devido ao volume de rocha localizado acima de 2.000 m, entretanto, enquanto a defasagem do campo devido à presença da rampa tornou-se imperceptível, a defasagem do campo devido à presença do reservatório de hidrocarboneto é evidente, e possui quase a mesma extensão do corpo. Já no modelo onde o assoalho oceânico é plano, o campo só sofre defasagem nas regiões próximas ao corpo e a fonte, nas outras regiões o espectro de fase segue constante.

A Figura (4.43) a seguir ilustra o espectro de fase do campo elétrico adquirido numa frequência de 0,5 Hz.

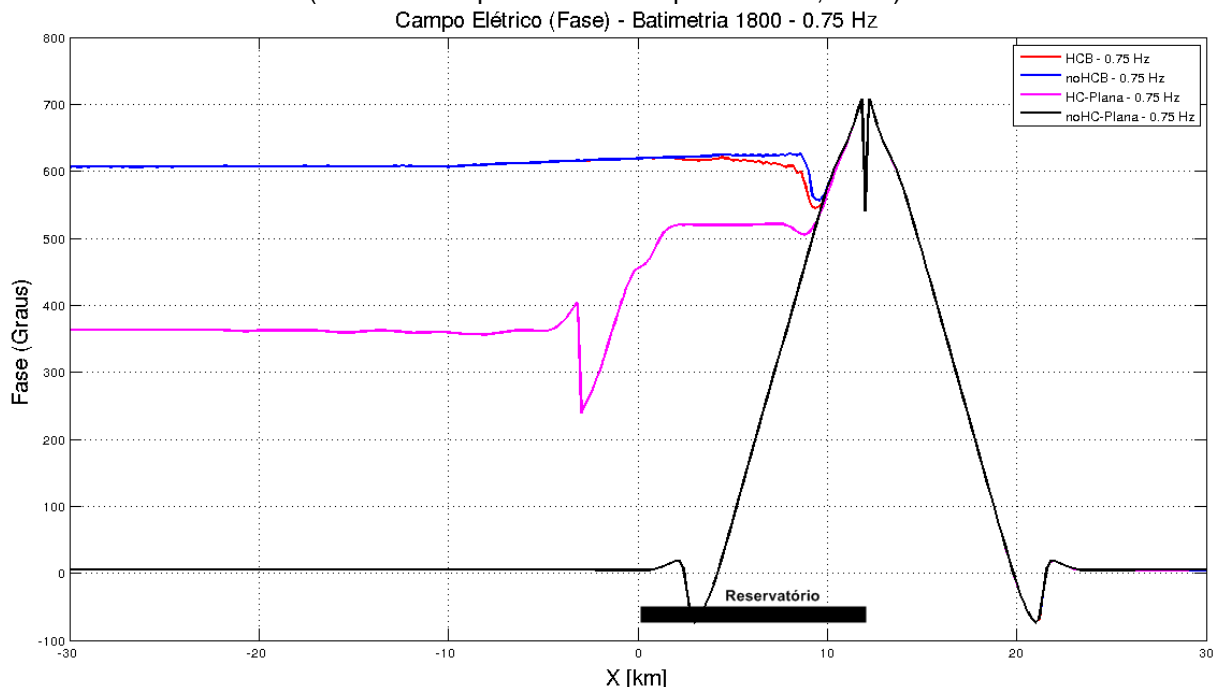
Figura 4.43: Efeito do Reservatório num Ambiente com Variação de Batimetria de 200 m (Fase do Campo Elétrico – frequência de 0,5 Hz).



Assim como nos gráficos da amplitude do campo elétrico, com o aumento da frequência o efeito da defasagem do campo devido a presença do reservatório de hidrocarboneto para o modelo onde o assoalho oceânico é plano diminuiu, enquanto que a defasagem do campo devido a presença do reservatório para o modelo onde há variação da batimetria tornou-se ainda mais evidente, aproximando-se inclusive das dimensões reais do corpo.

Na Figura (4.44) a seguir temos o espectro de fase do campo elétrico, quando este é adquirido numa frequência de 0,75 Hz.

Figura 4.44: Efeito do Reservatório num Ambiente com Variação de Batimetria de 200 m (Fase do Campo Elétrico – frequência de 0,75 Hz).



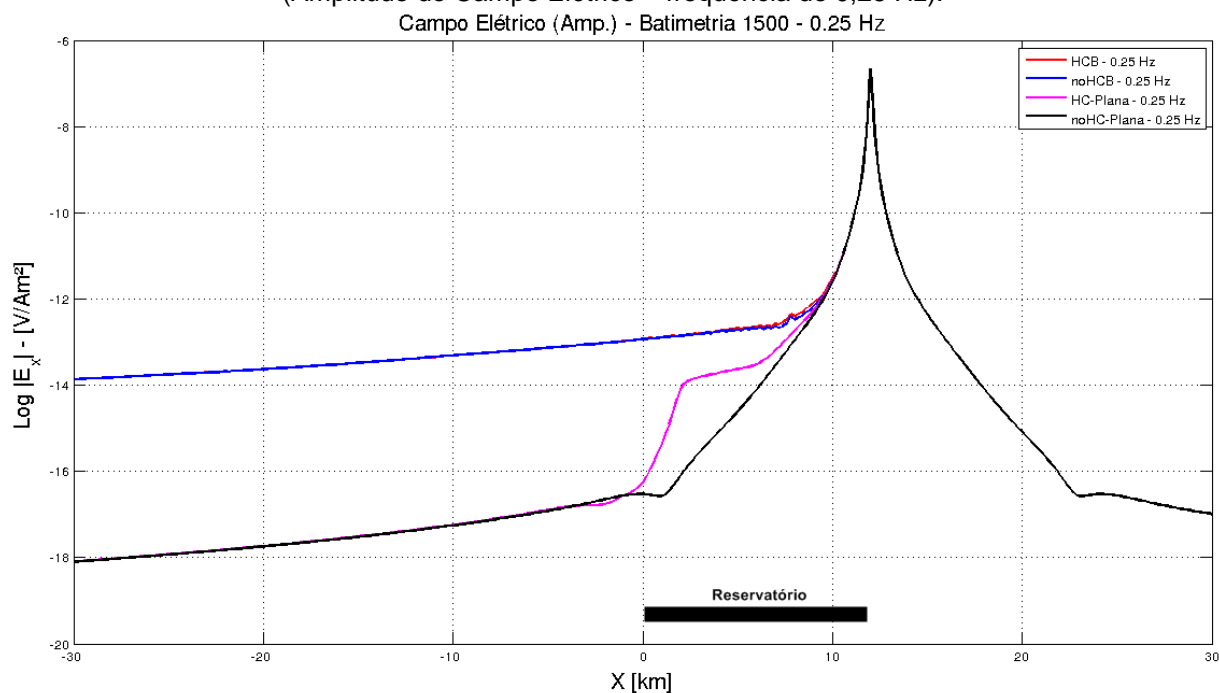
A diferença de fase entre os modelos com e sem reservatório quando o fundo do mar é plano diminuiu um pouco mais, enquanto que a diferença de fase entre os modelos com e sem reservatório quando o fundo do mar apresenta uma variação da batimetria aumentou mais ainda.

Sendo assim, mesmo quando as variações no relevo do fundo do mar são pequenas, elas possuem uma grande influência sobre o sinal, principalmente no que se refere a amplitude do campo elétrico a altas frequências, mesmo assim, ainda é possível identificar algum efeito deste, tanto na amplitude quanto no espectro de fase do campo, sendo este último ideal para delimitação dos limites do reservatório, independente da frequência empregada.

Nas figuras a seguir estaremos analisando o comportamento dos campos eletromagnéticos, quando a aquisição de dados é empregada num ambiente onde a batimetria sofre uma variação de 500 m.

Na Figura (4.45) a seguir temos a amplitude do campo elétrico referente ao modelo descrito anteriormente, quando este é adquirido a uma frequência de 0,25 Hz.

Figura 4.45: Efeito do Reservatório num Ambiente com Variação de Batimetria de 500 m (Amplitude do Campo Elétrico – frequência de 0,25 Hz).



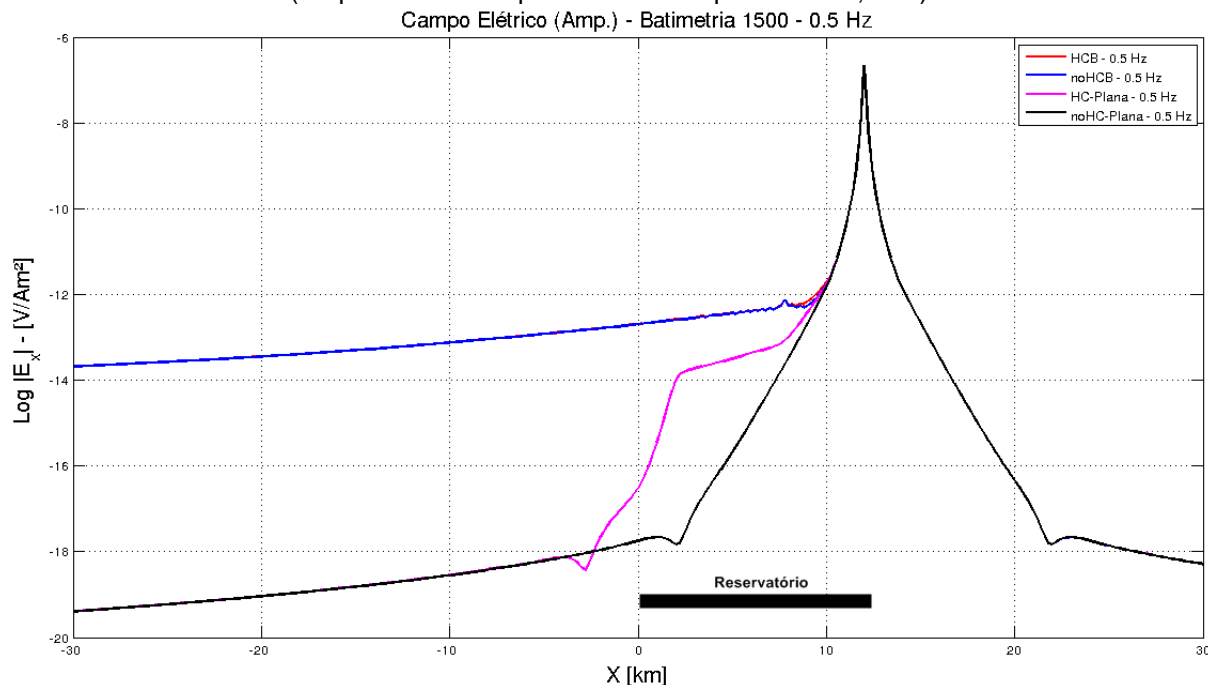
Fonte: Do autor (2016)

Como podemos perceber, apesar de não ser tão profundo e de possuir 12 km de extensão, o campo secundário gerado pelo reservatório de hidrocarboneto não é forte o suficiente para fazer com que o campo gerado a partir do modelo onde não há reservatório possua uma amplitude maior para os modelos com variação de batimetria, ao contrário do modelo onde o assoalho marinho é plano, onde a presença do reservatório é nítida, de modo que podemos observar apenas um campo com amplitude maior do lado esquerdo da curva, devido à presença de sedimentos localizados acima de 2.000 m, que se comportam como uma heterogeneidade, gerando uma curva assimétrica.

Mesmo empregando frequências mais altas, 0,5 e 0,75 Hz, cujo raio de investigação é menor devido ao fato de o *skin depth* ser inversamente proporcional à frequência, que teoricamente seriam mais adequadas a este ambiente por este apresentar pouca variação topográfica e um reservatório relativamente raso, ainda assim, a anomalia devido a presença do reservatório segue quase que imperceptível, reduzindo-se a um leve contorno vermelho, curva referente ao modelo

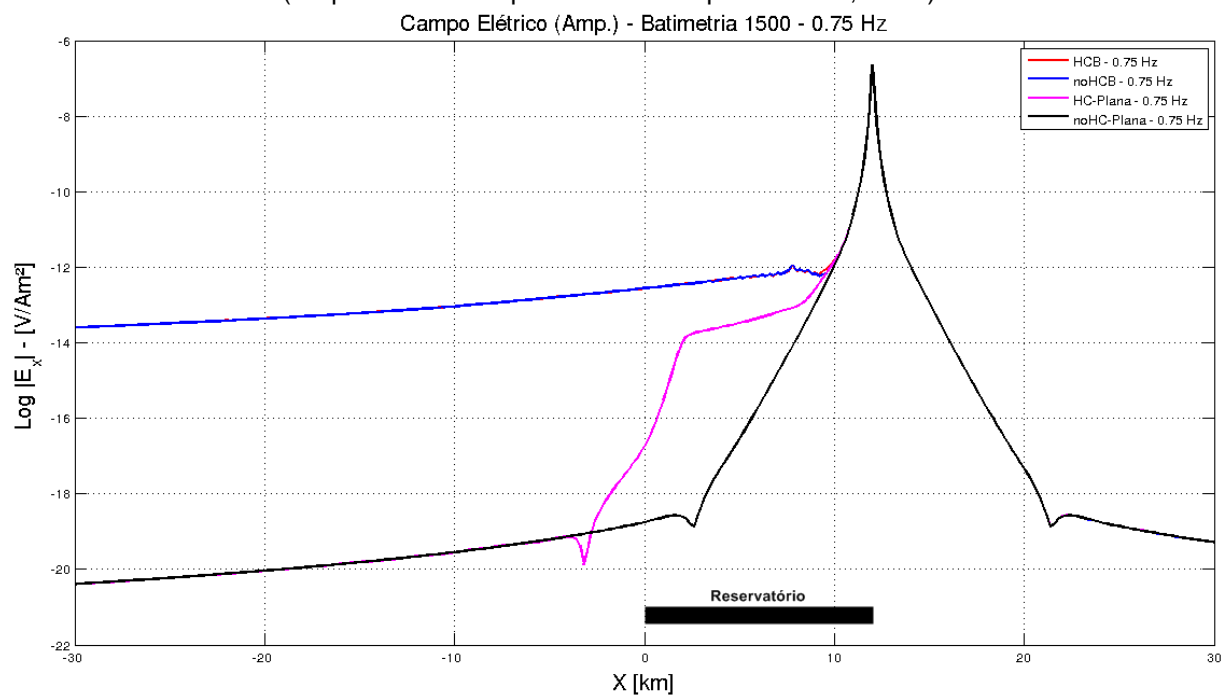
HCB, próximo a região compreendida pelo reservatório de hidrocarboneto, conforme está ilustrado nas Figuras (4.46) e (4.47).

Figura 4.46: Efeito do Reservatório num Ambiente com Variação de Batimetria de 500 m (Amplitude do Campo Elétrico – frequência de 0,5 Hz).



Fonte: Do autor (2016)

Figura 4.47: Efeito do Reservatório num Ambiente com Variação de Batimetria de 500 m (Amplitude do Campo Elétrico – frequência de 0,75 Hz).



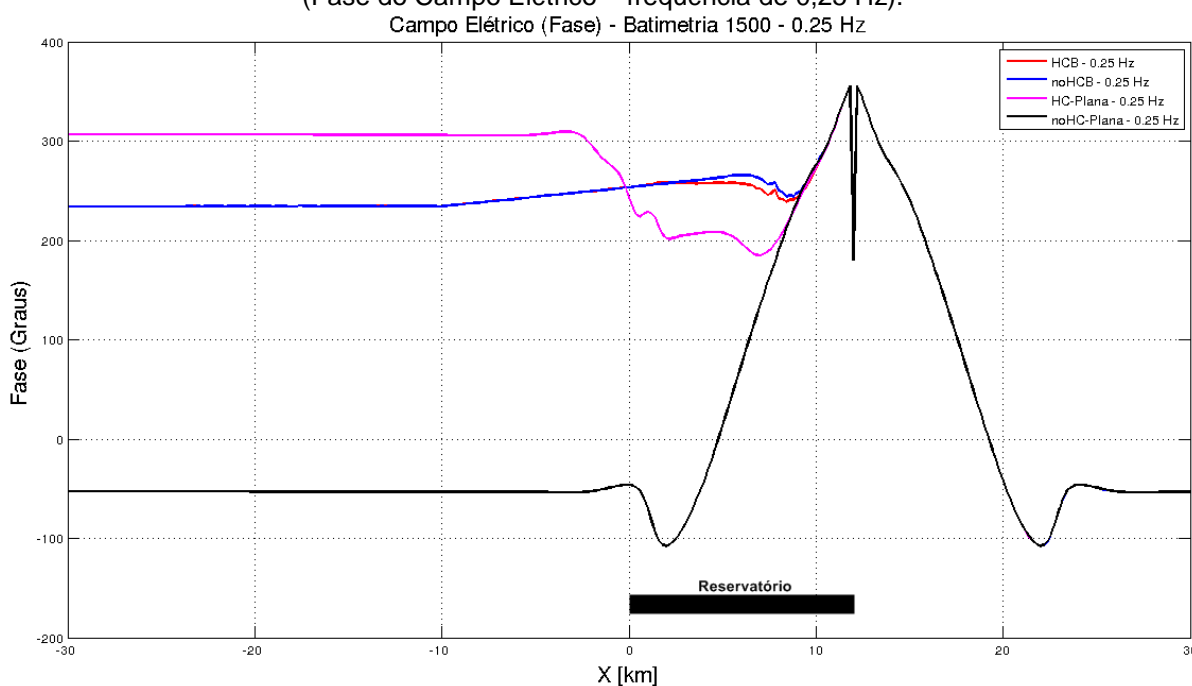
Fonte: Do autor (2016)

Enquanto isso, em geral a amplitude das curvas referentes ao modelo com assoalho marinho plano diminui, mas a diferença de amplitude entre elas devido a presença do reservatório de hidrocarboneto aumenta com o aumento da frequência.

Comparando os gráficos das Figuras (4.45), (4.46) e (4.47) percebemos que conforme a frequência diminui a amplitude dos campos referente aos modelos onde há variação do relevo do fundo do mar aumenta, o que comprova que o efeito do campo secundário produzido pela variação da batimetria está mascarando o efeito reservatório. Analisemos agora os gráficos referentes ao espectro de fase dos campos obtidos nas frequências citadas anteriormente.

A seguir, na Figura (4.48) temos o gráfico do espectro de fase do campo adquirida a 0.25 Hz de frequência.

Figura 4.48: Efeito do Reservatório num Ambiente com Variação de Batimetria de 500 m (Fase do Campo Elétrico – frequência de 0,25 Hz).

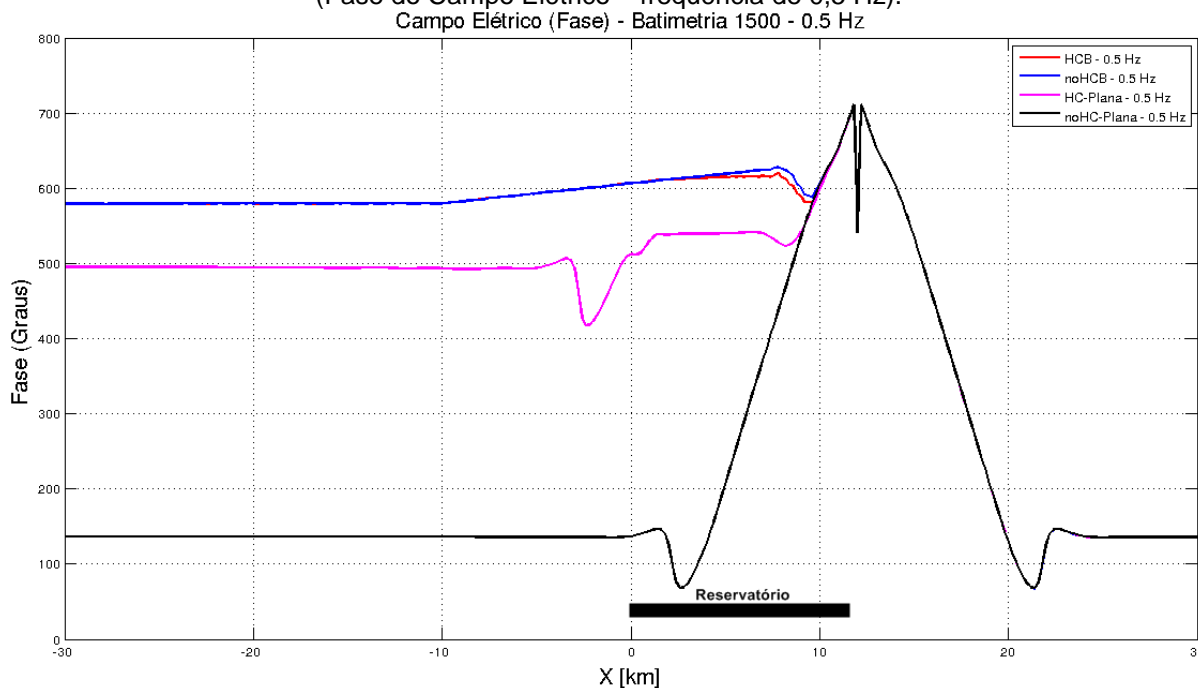


Fonte: Do autor (2016)

Devido ao fato de o espectro de fase ser sensível às interferências que o campo sofre ao longo de sua propagação, no modelo onde o fundo do mar é plano, o espectro de fase varia apenas para as regiões influenciadas pelo campo emitido pela fonte e pela presença do corpo, já no modelo onde o fundo do mar sofre variações topográficas, é possível delimitar inclusive os limites horizontais da rampa, além de perceber a defasagem causada devido a presença do reservatório de hidrocarboneto, entretanto a dimensão desta ainda não é suficiente para a delimitação da extensão do reservatório.

Na Figura (4.49) a seguir temos o espectro de fase do campo elétrico adquirido a uma frequência de 0,5 Hz.

Figura 4.49: Efeito do Reservatório num Ambiente com Variação de Batimetria de 500 m (Fase do Campo Elétrico – frequência de 0,5 Hz).

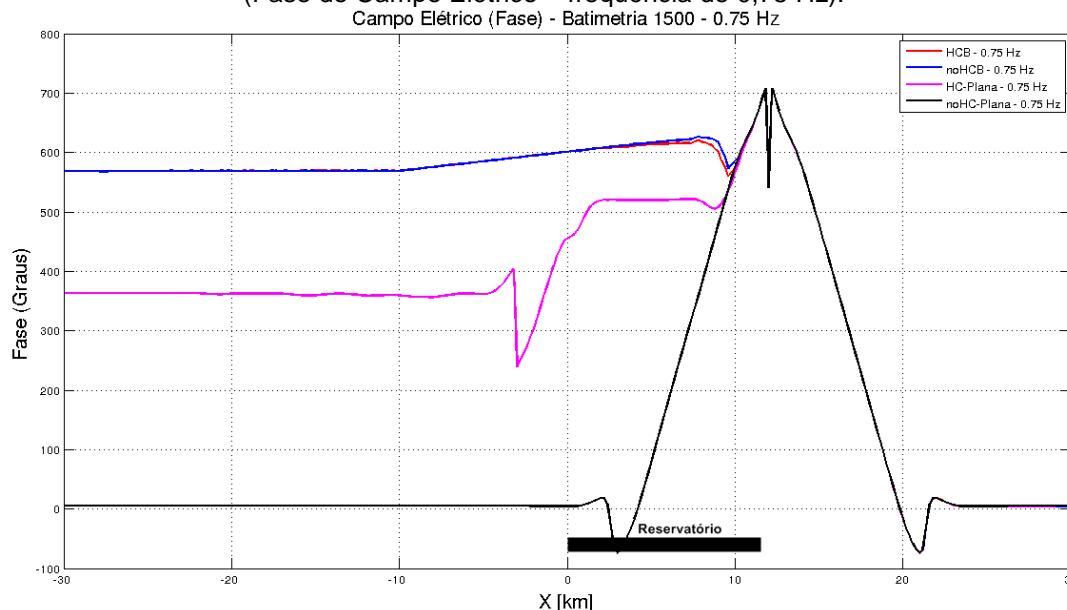


Fonte: Do autor (2016)

A defasagem do campo elétrico devido à presença do reservatório de hidrocarboneto diminuiu ao analisarmos as curvas referentes aos modelos onde o assoalho marinho é plano, curvas magenta e preta, entretanto para as curvas referentes ao modelo com variação topográfica, azul e vermelha, esta defasagem aumentou, aproximando-se das dimensões horizontais do corpo. Aumentou também a defasagem do campo devido à presença da rampa, de modo que sua extensão aproximou-se mais da extensão verdadeira da rampa, de -10.000 a 10.000 m, em relação à origem do modelo.

Na Figura (4.50) a seguir temos o espectro de fase do campo elétrico adquirido a uma frequência de 0,75 Hz.

Figura 4.50: Efeito do Reservatório num Ambiente com Variação de Batimetria de 500 m (Fase do Campo Elétrico – frequência de 0,75 Hz).



Com uma frequência ainda maior, a defasagem dos campos devido ao modelo com variação de batimetria novamente aumentou, aproximando-se um pouco mais da real extensão do reservatório, 12 km, enquanto que a defasagem dos campos com e sem a influência do reservatório de hidrocarboneto para o modelo onde o assoalho marinho é plano, diminuiu mais ainda. A defasagem do campo devido à presença da rampa também sofreu um aumento.

Sendo assim, novamente concluímos que, mesmo quando a variação topográfica for pequena, o reservatório muitas vezes só é identificado a partir do espectro de fase, de modo que para variações topográficas mais elevadas devido a presença de uma rampa com inclinações maiores, o efeito da anomalia gerada a partir do campo secundário produzido pelo reservatório de hidrocarboneto é completamente mitigado pelo efeito da anomalia gerada a partir do campo secundário produzido pela rampa, fazendo-se desnecessária sua apresentação.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho abordou a necessidade de considerar as variações do relevo do ambiente no qual o MCSEM é empregado, visto que elas são uma fonte relevante de campo secundário, que por vezes termina por mitigar as anomalias associadas ao reservatório de hidrocarboneto. Sendo que, para tal análise, buscou-se primeiramente conhecer o comportamento dos campos elétricos associados a modelos 1-D diante dos parâmetros que seriam abordados nos modelos 2-D, neste caso, a espessura da lâmina d'água e a frequência, de modo que, para uma mesma frequência e para um reservatório a uma mesma profundidade relativa ao assoalho oceânico, o aumento da espessura da lâmina d'água implica no aumento da amplitude do campo elétrico referente ao modelo com hidrocarboneto, bem como no aumento da extensão da porção do gráfico associada à interação do campo elétrico com as estruturas em subsuperfície. Já no espectro de fase dos modelos em que analisamos a variação da espessura da lâmina d'água para uma mesma frequência, notou-se que a região na qual as ondas planas dominam o sinal torna-se gradativamente mais distante com o aumento da espessura da lâmina d'água.

Quando analisamos o comportamento dos campos eletromagnéticos para modelos em que a distância relativa entre a superfície do mar e o fundo oceânico manteve-se constante e fez-se variar a frequência notou-se que, quanto mais elevada for a frequência na qual os dados forem adquiridos, menor será a amplitude dos campos.

A partir destas conclusões fez-se a modelagem de ambientes 2-D com variação topográfica e a presença de um reservatório de hidrocarboneto 2-D, nos quais os dados seriam adquiridos a partir do MCSEM. Para tanto, implementamos uma malha não estruturada, desenvolvida a partir do *software* livre Triangle, e o método SuperLU para a solução do sistema de equações associado ao acoplamento entre os modos TM e TE, que corresponderam às nossas expectativas num tempo hábil de execução.

Sendo que, a fim de avaliarmos o nível de influência que as variações na topografia do ambiente têm sobre o comportamento dos campos eletromagnéticos, primeiramente comparamos os resultados dos modelos com variação na batimetria com modelos nos quais o assoalho marinho era plano, para uma mesma frequência.

Desta maneira, ao analisarmos o comportamento dos campos para uma frequência baixa, de 0,25 Hz, percebemos que, se o ambiente apresentar uma forte variação na topografia, a amplitude de seu campo elétrico será maior que para ambientes com pouca variação topográfica. Já quando empregamos frequências progressivamente maiores, 0,5 e 0,75 Hz, ocorre o efeito contrário, a amplitude dos campos elétricos associados a modelos com grande variação topográfica, vai diminuindo conforme essa variação aumenta, enquanto que a amplitude dos campos elétricos associados a modelos cuja variação no relevo do assoalho marinho é pequena aumenta conforme a variação topográfica produzida no relevo diminui.

Os campos eletromagnéticos associados a modelos cujo reservatório possui dimensões 2-D possuem naturalmente uma amplitude inferior que os associados a modelos nos quais os reservatórios possuem dimensão 1-D, devido ao fato de os primeiros possuírem uma dimensão limitada. Sabendo disso, modelamos um ambiente no qual o reservatório possui dimensões 2-D e está imerso num meio com variações no relevo. Observamos que na maioria das vezes o efeito do campo secundário produzido pelo reservatório é mitigado devido ao efeito produzido pela variação na topografia, por vezes só sendo possível a identificação da anomalia associada a presença do reservatório por meio do espectro de fase. Mesmo quando a variação na topografia do terreno é pequena, de 200 m, o ideal é que se empregue uma frequência baixa, pois numa frequência alta o efeito da batimetria é amplificado.

Sendo assim, fazer um estudo prévio da topografia do terreno e da história geológica da área, para que se possa ter uma noção das possíveis estruturas geológicas em subsuperfície e suas possíveis profundidades, torna-se essencial para fazermos uma boa interpretação dos dados adquiridos por meio do MCSEM.

Sugerimos que, em trabalhos futuros, seja implementada uma malha não estruturada auto restritiva, de estruturas mais complexas associadas ao assoalho marinho, como horsts e grabens.

REFERÊNCIAS

- ANDRÉIS, D.; MACGREGOR, L. Controlled-source electromagnetic sounding in shallow water: principles and applications. **Geophysics**, v. 73, n. 1, p. F21 – F32, abr. 2008.
- CONSTABLE, S. Marine electromagnetic methods – a new tool for offshore exploration. **The Leading Edge**, p. 438 – 444, abr. 2006
- CONSTABLE, Steven; SRNKA, Leonard J. An introduction to marine controlled-source electromagnetic methods for hydrocarbon exploration. **Geophysics**, v. 72, n. 2, p. WA3 – WA12, abr. 2007.
- Electromagnetic Geoservices (EMGS). **Method illustrations**. Disponível em: <http://www.emgs.com/image_library/method_illustrations/>. Acesso em: 16 maio 2016
- JIRACEK, George R. Near surface and topographic distortions. **Surveys in Geophysics**, v. 11, p. 162 – 203, 1990.
- LI, Xiaoye S. et al. **SuperLU Users' Guide**. 1999. 16f.
- LI, Yuguo; CONSTABLE, Steven. 2D Marine controlled-source electromagnetic modeling: part 2 – the effect of bathymetry. **Geophysics**, v. 72, n. 2, p. WA63 – WA71, abr. 2007.
- LUIZ, José Gouvêa; SILVA, Lúcia Maria da Costa e. **Curso de geofísica de prospecção**. Editora Universitária UFPA. 1983.
- NABIGHIAN, Misac N. **Electromagnetic methods in applied geophysics** – Volume 2, Applications, Part A and Part B. Society of Exploration Geophysicists, 2008.
- NUNES, Carlos Mateus Barriga. **Modelagem 2,5D por elementos finitos dos efeitos da topografia do terreno sobre os dados obtidos com o método eletromagnético a multifrequência**. 2014. 24f. Dissertação (Mestrado em Geofísica) - Programa de Pós-Graduação em Geofísica da Universidade Federal do Pará, Belém, 2014.
- SANTOS, Walleson Gomes dos. **Modelagem 1D e 2,5D de dados do método CSEM marinho em meios com anisotropia transversal inclinada**. 2014. Dissertação (Mestrado em Geofísica) – Programa de Pós-Graduação em Geofísica da Universidade Federal do Pará, Belém, 2014.
- SILVA, Hilton Farias da. **Modelagem numérica de dados MCSEM 2,5-D**. 2012. Dissertação (Mestrado em Geofísica) – Programa de Pós-Graduação em Geofísica da Universidade Federal do Pará, Belém, 2012.

SOUZA, Victor Cezar Tocantins de. **Modelagem numérica de dados MCSEM 3D usando computação paralela**. Tese (Doutorado em Geofísica) – Curso de Pós-Graduação em Geofísica da Universidade Federal do Pará, Belém, 2007.

SHEWCHUK, Jonathan Richard. Triangle: Engineering a 2D Quality Mesh Generator and Delaunay Triangulator, in "Applied Computational Geometry: Towards Geometric Engineering" (Ming C. Lin and Dinesh Manocha, editors). Lecture Notes in Computer Science, v. 1148, p. 203-222, maio 1996.

UM, Evan Schankee; ALUMBAUGH, David Lee. On the physics of the marine controlled-source electromagnetic method. **Geophysics**, v. 72, n. 2, p. WA13 – WA26, abr. 2007.