



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

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Leticia Gonçalves Pureza

MCSEM como Ferramenta de Monitoramento de Reservatórios de Hidrocarbonetos

Belém-Pa
Junho, 2013

Leticia Gonçalves Pureza

**MCSEM como Ferramenta de Monitoramento de
Reservatórios de Hidrocarbonetos**

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

Orientador: Prof. Marcos Welby Correa Silva

Belém-Pa
Junho, 2013

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFPA

P985m Pureza, Leticia Gonçalves

MCSEM como ferramenta de monitoramento de reservatórios de hidrocarbonetos / Leticia Gonçalves Pureza; Orientadora: Marcos Welby Correa Silva – 2013

38 f. : il.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação em geofísica) – Universidade Federal do Pará, Instituto de Geociências, Faculdade de Geofísica, Belém, 2013.

1. Geofísica. 2. Geofísica aplicada. 3. Métodos eletromagnéticos. 4. MCSEM 2.5D. 5. Monitoramento. I. Silva, Marcos Welby Correa, *orient.* II. Universidade Federal do Pará. III. Título.

CDD 22^a ed.:550

Letícia Gonçalves Pureza


MCSEM como ferramenta de monitoramento de reservatório

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

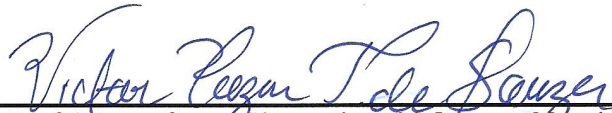
Data de aprovação: 24 / 06 / 2013

Conceito: EXCELENTE

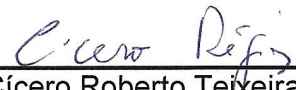
Banca examinadora:



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



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



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

Aos meus pais, sr. Odilson Quaresma Pureza e srs. Iralda Maria Gonçalves
Pureza, pela paciência na minha jornada de estudos além
de compreensão e suporte às minhas escolhas.

Aos meus familiares e amigos pelo
apoio direto e indireto.

AGRADECIMENTOS

A Deus por ter-me dado forças durante minha caminhada para concluir esta etapa de minha vida acadêmica e ter-me dado tantas oportunidades para seguir em frente com a mesma.

Aos meus queridos tios e tias Odifax Quaresma Pureza e família, Zelia Pureza Pantoja e Família, Odilea Pureza Castilho e família, Zenaide Pureza Maciel e família, Lucilene Gonçalves Modesto e família, Olgarina Pureza e família e Odalea Quaresma Pureza e família; que me receberam de braços abertos e me hospedaram em suas casas para que eu pudesse seguir com meus estudos.

Ao meu professor e orientador Dr. Marcos Welby Correa Silva pelo auxílio intensivo durante o desenvolvimento do projeto.

Aos professores da Faculdade de Geofísica por propiciarem além de conhecimento, incentivo para continuar o curso e ir além.

Aos colegas de turma pelo aprendizado através dos momentos que passamos juntos durante essa jornada.

Às instituições PETROBRAS e INCT-GP/CNPq pelo suporte financeiro enquanto bolsista.

*"No fim tudo dá certo, e se não deu certo
é porque ainda não chegou ao fim."
(Fernando Sabino)*

RESUMO

O monitoramento de reservatórios em seu processo de produção é muito importante para manter a uma boa produtividade e também para prever as características econômicas do reservatório. O Método Eletromagnético Marinho de Fonte Controlada (MCSEM) vem se mostrando uma fonte considerável de bons resultados para tal monitoramento. Trabalhos anteriores foram realizados utilizando o MCSEM e provaram a aplicabilidade do método. Esses trabalhos demonstraram a sensibilidade do MCSEM para com corpos resistivos de grande espessura e extensam lateral. Apesar de respostas de baixa intensidade, os resultados obtidos foram suficientes para identificar características referentes aos modelos de depleção basal e lateral do reservatório quando comparado ao modelo sem depleção. Partindo-se dessa perspectiva, este trabalho vem a analisar as respostas obtidas pelo MCSEM quando aplicadas à modelos de reservatórios que possuem características mais exigentes como: espessa lâmina d'água, maior profundidade de soterramento e menor resistividade do reservatório. Através desses modelos pôde-se identificar que o método MCSEM pode ser utilizado como ferramenta de monitoramento para casos mais exigentes, porém com limitações. Por fim, verificase que para modelos extremos, como para o modelo de reservatório brasileiro conhecido e utilizado neste trabalho, o referido método não pode ser utilizado como ferramenta de monitoramento.

Palavras-chave: Geofísica. Geofísica aplicada. Métodos eletromagnéticos. MCSEM 2.5D. Monitoramento.

ABSTRACT

In order to maintain a good productivity as well as to predict their economic characteristics is very important to monitor the reservoirs while they're productive. Good results for such monitoring is being shown by Marine Controlled Source Electromagnetic Method (MCSEM). The feasibility of the method was proven by previous works on this area. These works have shown MCSEM sensibility to lateral extents and thickness of resistive bodies. The results were sufficient to identify characteristics related to bottom and lateral flooding reservoir models when compared to the models without flooding, although it shows a weak power of magnitude. Extending these ideas, this work analyzes the responses obtained with MCSEM when applied to the depletion of reservoir models with more demanding characteristics such as thicker water layer, greater reservoir burial depth, and smaller reservoir resistivity values. From these models it was noticed that, although having limitations, the MCSEM method can be used as a monitoring tool of more demanding reservoir models. At last, it was analysed that for over demanding models, such as the known Brazilian reservoir model used on this work, the previously mentioned method cannot be utilized as a monitoring tool.

Keywords: Geophysics. Applied geophysics. Electromagnetic methods. MCSEM 1D. Monitoring. Brazilian reservoirs.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Representação esquemática de um levantamento com o método MCSEM. A figura superior demonstra as reflexões do campo nas camadas de um meio 1D sem o reservatório. Já a inferior demonstra o mesmo porém agora com a presença do reservatório.	15
Figura 2 – Descrição da geometria dos levantamentos.	16
Figura 3 – Descrição do modelo 1D de prospecção de hidrocarbonetos com e sem reservatório.	18
Figura 4 – Resposta do MCSEM para o modelo 1D de prospecção de hidrocarbonetos. Componentes de Amplitude (figura à esquerda) e Fase (figura à direita) do Campo Elétrico na geometria in-line. A curva vermelha representa a resposta sem o reservatório. Já a azul, representa a resposta com o reservatório	19
Figura 5 – Modelo utilizado esquemático utilizado para aplicação da modelagem de monitoramento de reservatório com MCSEM.	20
Figura 6 – Ilustração da depleção feita nos reservatórios. Os percentuais representam o quanto foi retirado do reservatório.	20
Figura 7 – Resposta da amplitude (à esquerda) e da fase (à direita) do Campo Elétrico in-line do modelo segundo Constable et al (2008). a) e c) Gerados pelo software de Silva (2009) b) e d) Gerados por Constable et al.(2009). Frequência 0,1 Hz. A curva de índice HC (curva cheia) refere-se ao modelo 1D de reservatório (camada infinita) e a de índice noHC (pontilhada) refere-se ao modelo 1D sem a presença do reservatório (dado de referência)	22
Figura 8 – Resposta da amplitude normalizada do Campo Elétrico in line do modelo de depleção lateral (a) e (b) e da base (c) e (d) do reservatório. Os percentuais fazem referência à quantidade depletada do reservatório.	23
Figura 9 – Modelo 1 - Modelo bidimensional de reservatório em ambiente sedimentar estratificado de 3 camadas com lâmina d'água de 1500m e com reservatório à 1000m do fundo do mar. Transmissor localizado à 2.000 m da esquerda do reservatório e estando à 50m do fundo do mar.	24

Figura 10	–Resposta da amplitude do Campo Elétrico in line (à esquerda) e da fase (à direita) do modelo 1 para várias frequências. a) e b) 0,125 Hz, c) e d) 0,5 Hz, e) e f) 0,5 Hz. A curva de índice HC (verde) refere-se ao modelo 1D de reservatório (camada infinita) e a de índice noHC (vermelho) refere-se ao modelo 1D sem a presença do reservatório (dado de referência).	26
Figura 11	–Resposta da amplitude do Campo Elétrico in line do modelo de depleção lateral (à esquerda) e da base (à direita) do reservatório do modelo 1 para várias frequências. a) e b) 0,125 Hz, c) e d) 0,25 Hz, e) e f) 0,5 Hz. Os percentuais fazem referência à quantidade depletada do reservatório	27
Figura 12	–Modelo 2 - Modelo bidimensional de reservatório em ambiente sedimentar estratificado de 3 camadas com lâmina d'água de 2000m e com reservatório à 1500m do fundo do mar. Transmissor localizado à 2.000 m da esquerda do reservatório e estando à 50m do fundo do mar.	28
Figura 13	–Resposta da amplitude do Campo Elétrico in line (à esquerda) e da fase (à direita) do modelo 2 para várias frequências. a) e b) 0,125 Hz, c) e d) 0,25 Hz, e) e f) 0,5 Hz. A curva de índice HC (verde) refere-se ao modelo 1D de reservatório (camada infinita) e a de índice noHC (vermelho) refere-se ao modelo 1D sem a presença do reservatório (dado de referência).	30
Figura 14	–Dado real coletado pela Petrobras juntamente com a Schlumberger da Bacia de Santos. A frequência utilizada foi de 0.5 Hz	31
Figura 15	–Resposta da amplitude normalizada do Campo Elétrico in line do modelo de depleção lateral (à esquerda) e da base (à direita) do reservatório do modelo 2 para várias frequências. a) e b) 0,125 Hz, c) e d) 0,25 Hz, e) e f) 0,5 Hz. Os percentuais fazem referência à quantidade depletada do reservatório.	32
Figura 16	–Modelo bidimensional real de reservatório em ambiente sedimentar estratificado de 3 camadas com lâmina d'água de 1300m e com reservatório à 2100m do fundo do mar. Transmissor localizado à 2.000 m da esquerda do reservatório e estando à 50m do fundo do mar.	33
Figura 17	–Resposta da amplitude do Campo Elétrico in line (à esquerda) e da fase (à direita) do modelo brasileiro para várias frequências. a) e b) 0,125 Hz, c) e d) 0,25 Hz. A curva de índice HC (verde) refere-se ao modelo 1D de reservatório (camada infinita) e a de índice noHC (vermelho) refere-se ao modelo 1D sem a presença do reservatório (dado de referência)	34

Figura 18 –Resposta da amplitude normalizada do Campo Elétrico in line do modelo de depleção lateral (à esquerda) e da base (à direita) do reservatório do modelo brasileiro para várias frequências. a) e b) 0,125 Hz, c) e d) 0,25 Hz. Os percentuais fazem referência à quantidade depletada do reservatório. 35

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	O MÉTODO MCSEM	15
2.1	PRINCÍPIOS FÍSICOS	16
2.2	APLICAÇÃO DO MÉTODO	18
3	RESULTADOS	21
3.1	VALIDAÇÃO DO MÉTODO	21
3.2	MODELO 1	23
3.2.1	Análise da frequência	24
3.2.2	Análise da depleção	25
3.3	MODELO 2	28
3.3.1	Análise da frequência	28
3.3.2	Análise da depleção	29
3.4	MODELO COM CARACTERÍSTICAS DE UM RESERVATÓRIO NA BACIA DE CAMPOS	31
3.4.1	Análise da frequência	31
3.4.2	Análise da depleção	33
4	CONCLUSÃO	36
	REFERÊNCIAS	37

1 INTRODUÇÃO

O Método Eletromagnético Marinho de Fonte Controlada (MCSEM) é uma das técnicas utilizadas pela indústria na exploração de hidrocarboneto (HC). O MCSEM funciona como um indicador de HC ao caracterizar a resistividade elétrica das estruturas indicadas pela sísmica. Os trabalhos com o MCSEM começaram com Charles Cox do Instituto Scripps de Oceanografia. O trabalho dele utilizava fontes de corrente de alta frequência e tinha como principal objetivo caracterizar zonas rasas e resistivas da crosta oceânica. A partir de então, outros estudos foram realizados sobre a utilização do método, com novas metodologias de aquisição e com o aperfeiçoamento de equipamentos (SINHA, et al., 1990 apud CONSTABLE; SRNKA, 2007), o que levou aos primeiros testes comerciais (EVANS, et al., 1991; MACGREGOR, et al., 1998; MACGREGOR, et al., 2001 apud CONSTABLE; SRNKA, op.cit.).

A participação da indústria apareceu com a presença da Exxon (agora Exxon-Mobil) que através de Srnka (1986 apud CONSTABLE; SRNKA, op.cit.) gerou uma patente sobre a utilização do MCSEM na exploração de hidrocarbonetos e iniciou testes de campo. O sucesso deste experimento gerou interesse de outras empresas no MCSEM, tais como Amoco, Arco, Elf e Sohio (CONSTABLE; SRNKA, op.cit.). Com o trabalho de modelagem feito pela indústria juntamente com Steven Constable em 1999, o MCSEM mostrou-se uma ferramenta útil na prospecção de hidrocarbonetos contanto que o alvo não fosse muito pequeno comparado com a profundidade de soterramento e que a profundidade da coluna d'água fosse suficiente para suprimir as ondas aéreas. Esse resultado foi suficiente para Statoil iniciar uma coleta de dados experimentais nos campos de petróleo da Angola (CONSTABLE; SRNKA, op.cit.).

O MCSEM passou, então, a ser bastante utilizado pela indústria. Em 1995 e 1996 a Agip fez pesquisas comerciais em terrenos de carbonatos do Mediterrâneo; a Agip e a BP em 1998 fizeram o mesmo nos prospectos de subsal do Golfo do México; e em 2001 outro levantamento nos prospectos do Atlântico Norte foi feito pela Agip juntamente com a Statoil (CONSTABLE; SRNKA, op.cit.). Isso se deve ao fato de que além dos bons resultados obtidos com os trabalhos de Hoverstan et al (2000 apud CONSTABLE; SRNKA, op.cit.), Key et al. (2006 apud CONSTABLE; SRNKA, op.cit.), e Macgregor e Sinha (2000 apud CONSTABLE; SRNKA, op.cit.) sobre o MCSEM, a incapacidade dos dados sísmicos em distinguir características petrofísicas do reservatório, além do fato de que a perfuração de poços é muito dispendiosa. Todos esses fatores contribuíram para tornar o método uma ferramenta indispensável.

Com o sucesso do MCSEM na detecção de reservatórios de hidrocarbonetos, a

modelagem numérica associada ao método também teve grande avanço, começando com as modelagens 1-D e 2-D de modelos simples, com meios horizontalmente estratificados, chegando até à modelagem 3-D de meios com variação de batimetria. O desenvolvimento de tais algoritmos possibilita à indústria realizar estudos de viabilidade do emprego do método em áreas previamente indicadas pela sísmica. Além disso, a modelagem computacional permite a escolha adequada de parâmetros para o levantamento, tais como frequência, distancia entre receptores, geometria das linhas, entre outros.

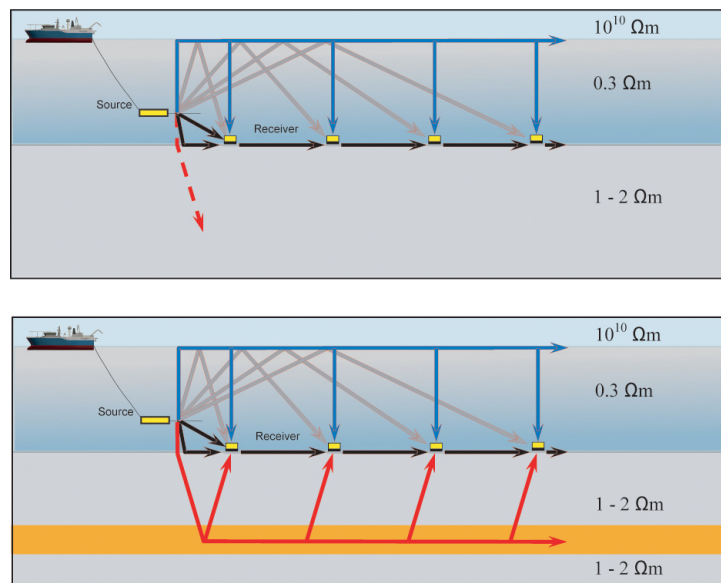
Mais recentemente, ainda fazendo-se uso de software, investigou-se a possibilidade do MCSEM como ferramenta de monitoramento de reservatório (ORANGE, KEY E CONSTABLE, 2009). Neste trabalho, o autor concluiu que as anomalias geradas no modelo 2D devido ao esgotamento do reservatório são fracas porém perceptíveis.

Contudo, no trabalho citado acima foram utilizados modelos geoeletricos que não correspondem à realidade das condições encontradas no Brasil. Desta forma, o objetivo deste TCC é aplicar o MCSEM ao monitoramento de reservatórios bidimensionais mais próximos das características brasileiras e verificar se ainda é possível se obter resultados satisfatórios.

2 O MÉTODO MCSEM

O MCSEM é um método relativamente novo na indústria. Ele utiliza-se de fonte e receptores eletromagnéticos para análise das reflexões do campo no fundo do mar. A fonte utilizada é o dipolo elétrico horizontal, que se desloca próximo ao leito marinho rebocado por um navio, e que emite sinal nas frequências desde 0.1 Hz até 10 Hz para energizar o leito oceânico. Os receptores são posicionados no fundo do mar, formando arranjos predeterminados pelos operadores. Um modelo de levantamento é mostrado na Figura 1, que também apresenta os padrões de reflexão do campo.

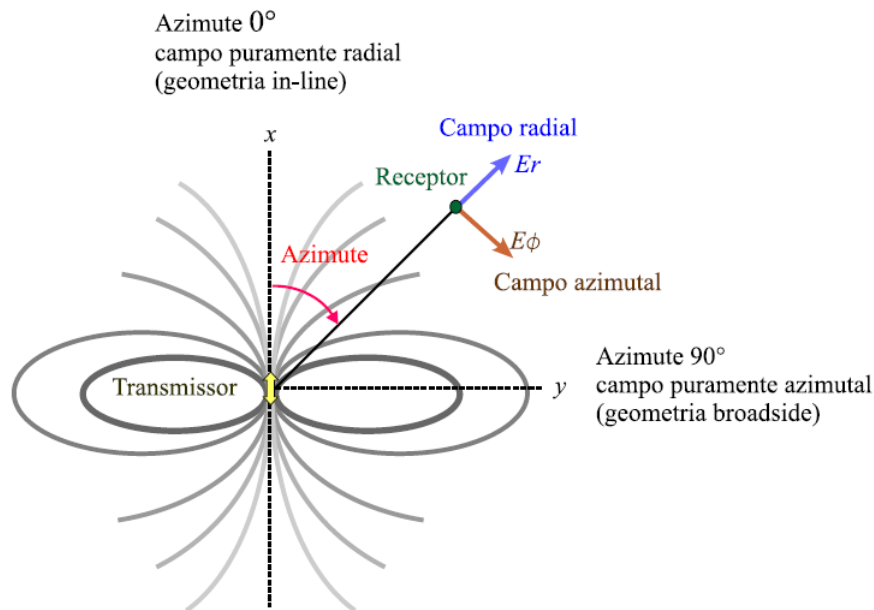
Figura 1 – Representação esquemática de um levantamento com o método MCSEM. A figura superior demonstra as reflexões do campo nas camadas de um meio 1D sem o reservatório. Já a inferior demonstra o mesmo porém agora com a presença do reservatório.



Fonte: Modificado de EMGS.

Existem dois tipos principais de medidas: as medidas das componentes radial e azimutal do campo, representadas na Figura 2. As medidas da componente radial são dadas na direção de menor distância entre receptor e transmissor e as medidas azimutais são perpendiculares à direção radial. Quando as medidas têm azimute de 0° ou 90° , os receptores estão alinhados com a fonte. Para o azimute de 0° a medida é considerada puramente radial, ou de geometria in-line. De contrapartida, para o azimute de 90° , o campo é considerado puramente azimutal, ou de geometria broadside.

Figura 2 – Descrição da geometria dos levantamentos.



Fonte: Souza (2007).

2.1 PRINCÍPIOS FÍSICOS

A interação entre correntes de baixa frequência e uma anomalia elétrica gerada por um corpo fino e resistivo num meio sem variações das propriedades magnéticas é primordialmente governado por duas condições de fronteira da teoria eletromagnética (UM; ALUMBAUGH, 2007). Quando o fluxo de corrente elétrica é paralela à fronteira do corpo, as componentes tangenciais do campo elétrico na superfície são contínuas, i. e.

$$E_T^1 = E_T^2 \quad (2.1)$$

na qual E representa o campo elétrico com unidade V/m, o índice numérico representa o meio em que o campo se encontra e o índice T representa que campo elétrico está tangencial à fronteira de separação dos meios.

Se o corpo é mais condutivo que o meio ao redor, dessa condição de fronteira (1) irá resultar uma forte corrente elétrica paralela à fronteira devido a lei de Ohm

$$J^i = \sigma^i E^i \quad (2.2)$$

na qual i faz referência ao meio e J e σ representam respectivamente a densidade de corrente, com unidade A/m^2 , e a condutividade, com unidade S/m. Essas fortes correntes dentro do corpo condutivo vão, por sua vez, gerar um campo magnético como implicação da lei de Ampère

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (2.3)$$

da qual H é o campo vetorial magnético com unidade A/m. Esse mecanismo de indução é a fonte primária de fortes respostas anômalas para alvos condutivos como minérios.

No entanto, a indução por si só não produz uma resposta perceptível para um corpo fino e resistivo do qual a espessura é muito menor que sua profundidade de soterramento abaixo da superfície de medida. É por esse motivo que camadas resistivas não são facilmente identificadas usando o método MT marinho (UM; ALUMBAUGH, 2007). Para detectar um corpo fino e resistivo é preciso gerar correntes que sejam normais à fronteira da discordância (CONSTABLE; WEISS, 2006). Quando isso ocorre, a condição de fronteira que governa é a da continuidade da densidade de corrente

$$J_N = J_N^1 = J_N^2 \quad (2.4)$$

na qual o índice N representa a componente normal da densidade de corrente à interface que separa os dois meios. A combinação da equação (4) com o Teorema de Gauss (WARD;HOHMANN, 1988 apud UM;ALUMBAUGH, op.cit.) mostra que essa condição de continuidade resulta em acúmulo de carga superficial na fronteira

$$\rho_s = J_N \left(\frac{\epsilon^1}{\sigma^1} - \frac{\epsilon^2}{\sigma^2} \right) \quad (2.5)$$

em que ρ_s é a densidade de carga superficial e ϵ é a permissividade dielétrica do vácuo com unidade F/m. Esse efeito galvânico resultante do acúmulo de carga gera, por sua vez, uma perturbação detectável nos campos EM medidos na superfície do mar.

Por último, outro fenômeno que define a física do processo de detecção do método MCSEM é a atenuação. A propagação de uma onda eletromagnética para características geológicas da Terra e para frequências menores que 10^5 Hz é descrita pelas equações de difusão do campo elétrico e magnético (NABIGHIAN, 1988). A partir da solução destas equações, pode-se encontrar o fator de atenuação da difusão de uma onda EM em um meio condutivo. Tal fator é comumente descrito em termos do skin depth, que é dado por:

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu \sigma}} \quad (2.6)$$

na qual δ é a frequência angular e μ é a permeabilidade magnética que é assumida como sendo a do vácuo e igual a $4\pi \times 10^{-7}$ H/m. O skin depth é definido como a distância na qual a onda plana EM será atenuada de 1/e do seu valor original.

Dessa forma, para otimizar a detecção de reservatórios resistivos em profundidade, a separação fonte-receptor deve ser de alguns skin depths para poder atenuar o campo primário gerado pela fonte e que percorre somente no mar, o qual não contém nenhuma informação do reservatório. Porém essa separação deve ser feita com

cautela, pois uma grande separação pode resultar na atenuação da resposta do reservatório. Segundo Um e Alumbaugh (2007), a escolha dessa separação, que depende da frequência, varia de acordo com a estrutura analisada.

2.2 APLICAÇÃO DO MÉTODO

A principal aplicação do método MCSEM é a detecção da resistividade de corpos alvos. As medições de resistividade elétrica são importantes pois têm a capacidade de distinguir entre reservatórios salinos e de hidrocarbonetos já que reservatórios de hidrocarbonetos na maioria das vezes são três ordens de grandeza mais resistivos que reservatórios salinos. O método MCSEM tem se mostrado eficiente na detecção de camadas finas resistivas de reservatórios de hidrocarbonetos e de gás na subsuperfície devido a medição de correntes galvânicas normais à superfície do reservatório (UM; ALUMBAUGH, op.cit.).

Como ilustração temos na Figura 3 um modelo 1D para prospecção, formado por camadas horizontais plano paralelas, no qual uma das camadas representa um reservatório unidimensional.

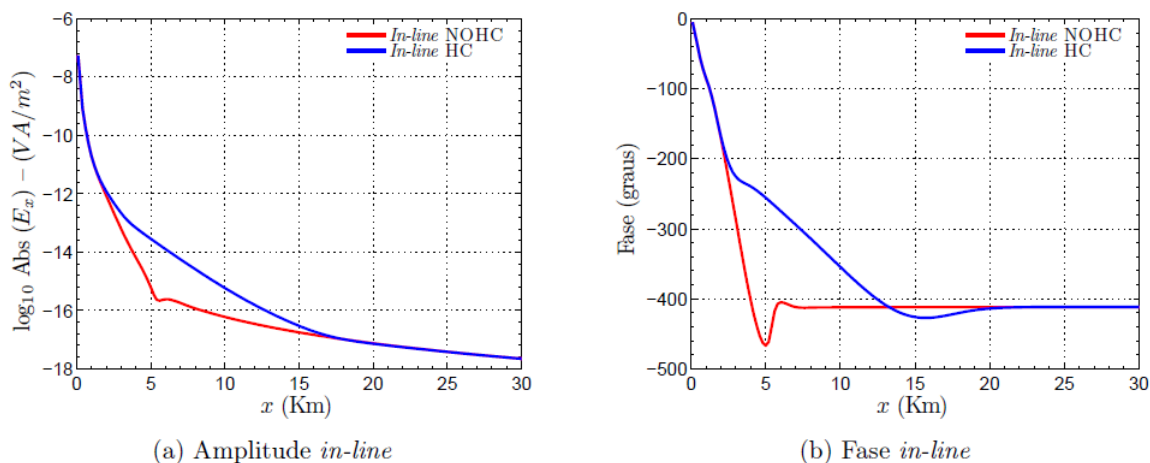
Figura 3 – Descrição do modelo 1D de prospecção de hidrocarbonetos com e sem reservatório.



Fonte: Souza (2007).

Logo a seguir, a Figura 4 representa a resposta da modelagem 1D para os modelos sem hidrocarboneto - NOHC e com hidrocarboneto - HC. É perceptível a mudança na característica da curva do modelo NOHC (em azul) quando comparada com a curva do modelo HC (em vermelho), tanto para fase quanto para amplitude, na região de 2 km a 15 km. Isso caracteriza a sensibilidade do método para a detecção de um reservatório plano horizontal infinito.

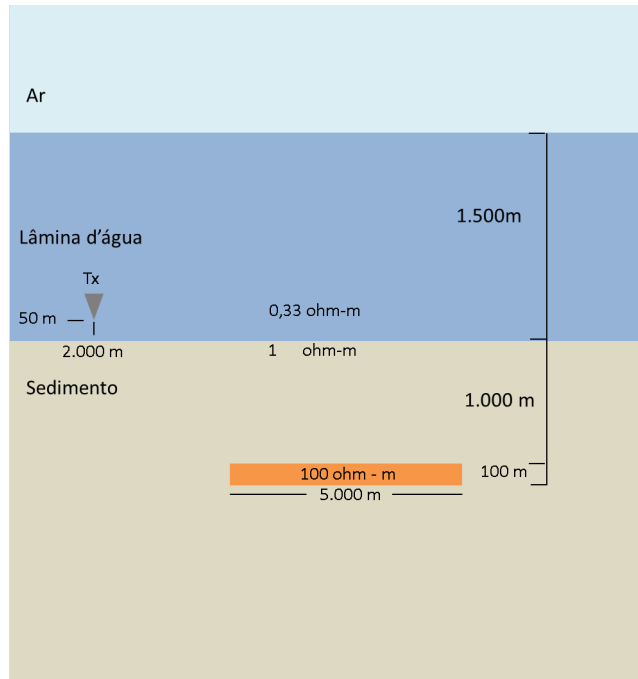
Figura 4 – Resposta do MCSEM para o modelo 1D de prospecção de hidrocarbonetos. Componentes de Amplitude (figura à esquerda) e Fase (figura à direita) do Campo Elétrico na geometria in-line. A curva vermelha representa a resposta sem o reservatório. Já a azul, representa a resposta com o reservatório



Fonte: Souza (2007).

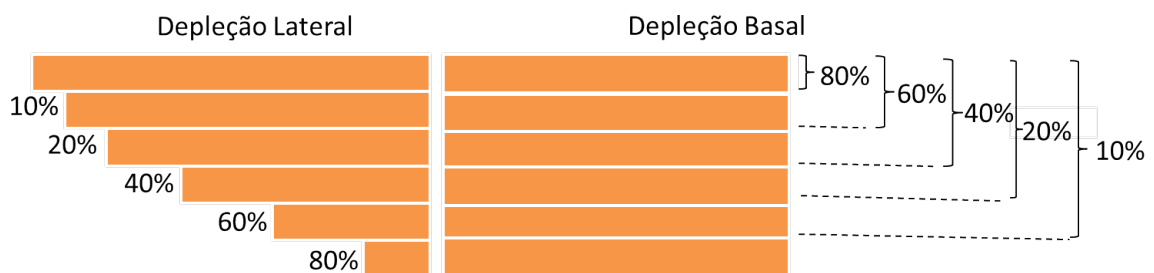
Outra aplicação mais recente foi na utilização do MCSEM como ferramenta não mais de exploração mas agora de monitoramento (ORANGE; KEY; CONSTABLE, 2009). Aqui, o modelo 1D não se aplica, pois estamos interessados em analisar respostas anômalas do campo para variações laterais e verticais do reservatório. O modelo utilizado no referido trabalho (Figura 5) é composto por uma lâmina d'água 1,5 km e resistividade de 0.33 ohm-m e logo abaixo uma camada de sedimentos de 1 km de espessura, com resistividade de 1 ohm-m. O transmissor encontra-se 50 m acima da camada de sedimentos e as medidas são feitas no assoalho oceânico. Ainda na camada de sedimentos, está contido um reservatório com topo a 1 km do fundo do mar e possuindo 100 m de espessura e 100 ohm-m de resistividade (vide Figura 5). O modelo de depleção do reservatório utilizado foi de depleção com material de mesma resistividade que o meio encaixante nas proporções 10, 20, 40, 60 e 80 %. O efeito dessas depleções foram analisadas separadamente na lateral esquerda do reservatório e na base do reservatório, como ilustrado na Figura 6. Vale ressaltar que a identificação do sentido de escoamento do fluido no reservatório é de extrema importância para a uma melhor aplicação de estratégia de recuperação desse fluido.

Figura 5 – Modelo esquemático utilizado para aplicação da modelagem de monitoramento de reservatório com MCSEM.



Fonte: Elaborada pela Autora

Figura 6 – Ilustração da depleção feita nos reservatórios. Os percentuais representam o quanto foi retirado do reservatório.



Fonte: Elaborado pela Autora

3 RESULTADOS

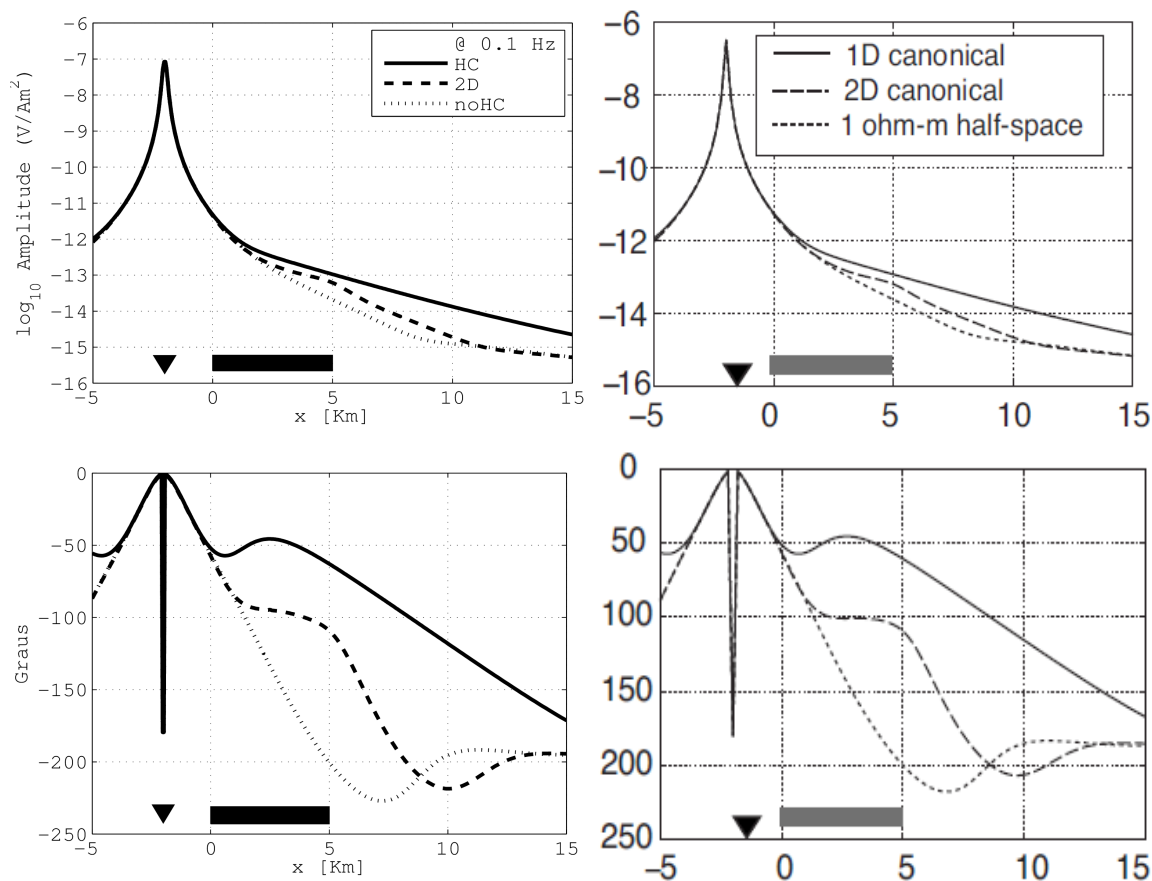
Neste capítulo será feita a validação do método a partir da comparação dos resultados gerados pelo programa de Silva (2009), que estamos utilizando neste trabalho, com os resultados de Orange, Key e Constable (2009), além da análise da possível utilização do MCSEM como ferramenta de exploração de hidrocarbonetos em ambientes com características mais rigorosas que as apresentadas por Orange, Key e Constable (2009), utilizando o software de Silva (2009). O modelo de reservatório utilizado para a validação é tal como descrito previamente no capítulo 2 e ilustrado na Figura 5 e os demais modelos serão introduzidos posteriormente.

O código de Silva (op.cit.) apresenta a modelagem 2.5D de respostas do MCSEM para camadas plano paralelas e para uma fonte 3D. Para tanto, esse código faz uso do conhecido método dos elementos finitos. Para maiores detalhes sobre o método e/ou código, consultar Silva (op.cit.)

3.1 VALIDAÇÃO DO MÉTODO

O software de Silva (op.cit) se mostrou eficiente na resolução do problema 2.5D de MCSEM utilizando o método dos elementos finitos. A Figura 7(a) mostra a amplitude do campo elétrico in-line gerada pelo modelo numérico de Silva (2009) e logo ao lado, a Figura 7(b) mostra a mesma amplitude dos resultados de Orange, Key e Constable (op.cit.). Em $x = 5$ Km, a curva da Figura 7(a) para o modelo HC (em verde) apresenta aproximadamente $-13 V/m^2$ de amplitude, porém mais acima, e o mesmo vê-se para curva cheia na Figura 7(b), que representa o mesmo modelo. Ainda em 5 Km, a equivalência de resultados é perceptível para o modelo 2D e noHC (azul e vermelho respectivamente) com os modelos equivalentes 2D canônico e semi espaço de 1 ohm-m (curva com tracejado maior e curva com tracejado menor, respectivamente). É importante notar também que as curvas referentes ao modelo 2D e ao modelo noHC tornam-se equivalente em aproximadamente 10 Km em ambas as figuras previamente descritas. Outro aspecto a ser analisado é fato de que em aproximadamente -2 Km o pico do gráfico gerado pelo software de Silva (op.cit.) apresenta o valor de $-7 V/m^2$, já o gráfico de Orange, Key e Constable (op.cit.) mostra um valor um pouco mais forte, próximo à $-6.5 V/m^2$. Isso se dá devido a discretização utilizada no programa de Silva (op.cit.), a qual faz com que haja uma perda de informação na região deste pico, tornando-o achatado devido à interpolação dos valores próximos a ele. Mesmo assim, isso não invalida a referida solução.

Figura 7 – Resposta da amplitude (à esquerda) e da fase (à direita) do Campo Elétrico in-line do modelo segundo Constable et al (2008). a) e c) Gerados pelo software de Silva (2009) b) e d) Gerados por Constable et al.(2009). Frequência 0,1 Hz. A curva de índice HC (curva cheia) refere-se ao modelo 1D de reservatório (camada infinita) e a de índice noHC (pontilhada) refere-se ao modelo 1D sem a presença do reservatório (dado de referência)

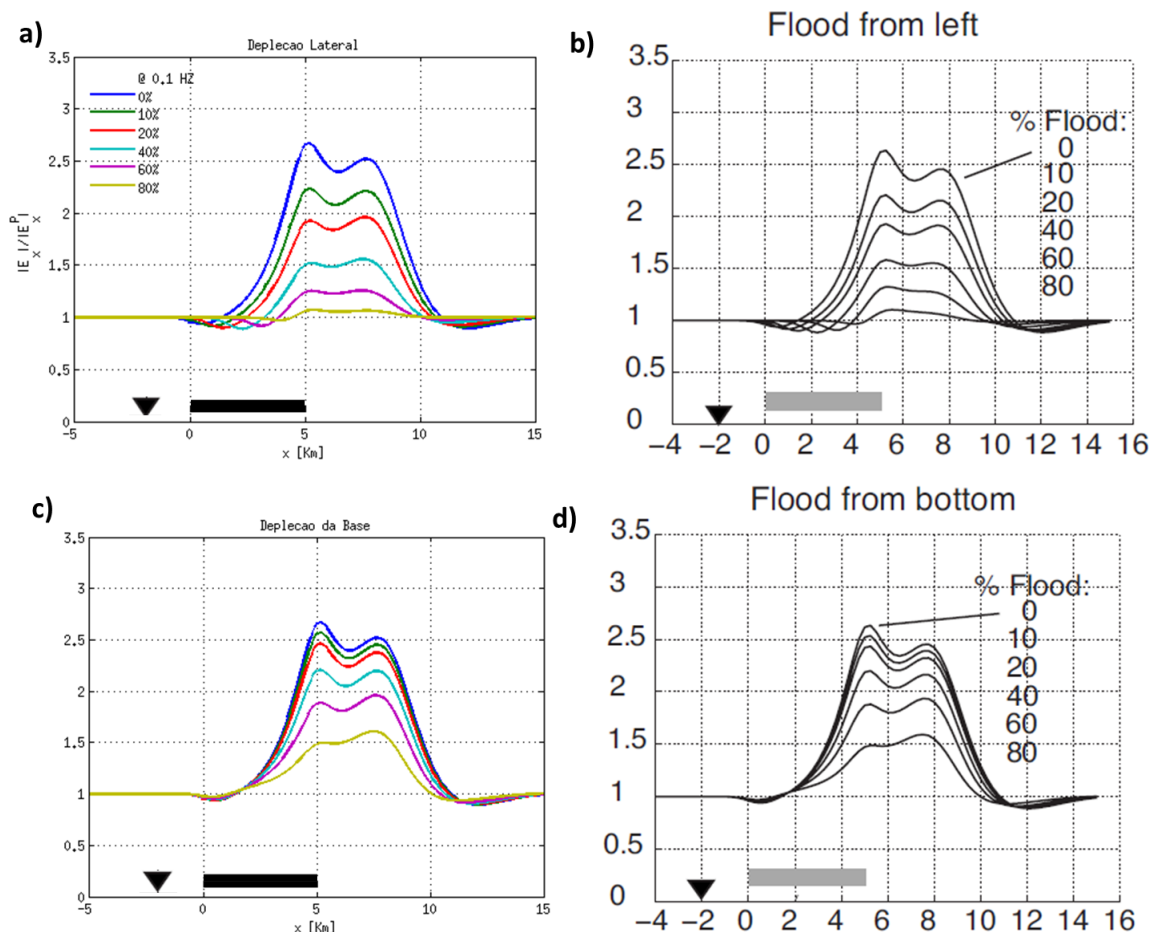


Fonte: Elaborado pela Autora

A fase também apresenta valores esperados. A Figura 7(c) representa os resultados gerados a partir do programa de Silva (op.cit.) e, ao lado, na Figura 7(d) os mesmos resultados obtidos por Orange, Key e Constable (op.cit.). Note que o eixo da amplitude da fase de Orange, Key e Constable (op.cit.) cresce positivamente para baixo, porém o certo seria indicar os valores negativos, já que assim são os valores abaixo de zero. De posse desta análise, veja que em aproximadamente 2 Km a fase para o modelo noHC e para o modelo 2D apresentam valores de aproximadamente 95 graus em ambas as figuras. Já em aproximadamente 3 Km, o gráfico que representa o modelo HC mostra um valor de aproximadamente 49 graus em ambas as figuras.

A figura 8 mostra a amplitude do campo elétrico normalizado para o modelo de depleção lateral e da base. À esquerda, os resultados gerados pelo software de Silva (op.cit.) e à direita as respostas de Orange, Key e Constable (op.cit.). Nota-se que as repostas são muito semelhantes, sendo esse o resultado esperado.

Figura 8 – Resposta da amplitude normalizada do Campo Elétrico in line do modelo de depleção lateral (a) e (b) e da base (c) e (d) do reservatório. Os percentuais fazem referência à quantidade depleta do reservatório.



Fonte: Elaborado pela Autora

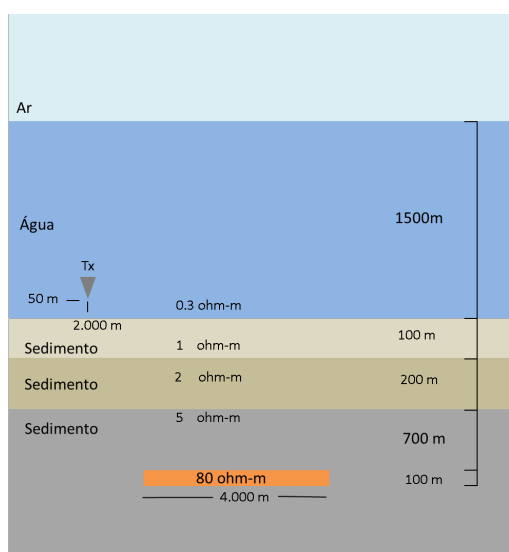
Esses resultados de amplitude e de fase mostram-se satisfatórios para considerar o software de Silva (2009) adequado para ser utilizado neste trabalho, já que os resultados não apresentam diferenças significantes quando comparados com os resultados obtidos por Orange, Key e Constable (2009). Este fato nos permite seguir com o objetivo principal do nosso trabalho que é o de utilizar o método MCSEM como ferramenta de monitoramento de reservatórios para modelos mais exigentes.

3.2 MODELO 1

Agora, com referência aos modelos utilizados nesse trabalho, utiliza-se o programa da dissertação de Silva (op.cit.) para gerar os dados e iremos analisar o efeito da depleção basal e da lateral direita (note que não será a lateral esquerda como anteriormente) de 2 modelos de reservatórios, os quais podem ser considerados mais

semelhantes a reservatórios brasileiros. O primeiro modelo, apresenta lâmina de água de 1.500 metros, seguida por duas camadas de sedimento, a primeira com 100 metros de espessura e a outra com 200 metros. O reservatório se encontra a 1000 metros do fundo do mar, possui uma resistividade de 80 ohm-m, espessura de 100 metros e largura de 4.000 metros (vide Figura 9).

Figura 9 – Modelo 1 - Modelo bidimensional de reservatório em ambiente sedimentar estratificado de 3 camadas com lâmina d'água de 1500m e com reservatório à 1000m do fundo do mar. Transmissor localizado à 2.000 m da esquerda do reservatório e estando à 50m do fundo do mar.



Fonte: Elaborada pela Autora

Os valores de resistividade utilizados foram 0,33 ohm-m para a água, 1 ohm-m para a primeira camada de sedimentos, 2 ohm-m para a seguinte e 5 ohm-m para a camada infinita que contém o reservatório. O transmissor encontra-se à 2000m da borda esquerda do reservatório à 50 metros acima do fundo do mar e as medidas foram realizadas no assoalho oceânico sendo que as frequências utilizadas foram de 0,125, 0,25 e 0,5 Hz.

3.2.1 Análise da Frequência

A partir da análise da Figura 10 observa-se que a região de influência do reservatório começa em aproximadamente 2 Km para todas as frequências, onde o modelo 2D (curva azul) começa a apresentar maiores valores que o modelo noHC (curva vermelha). Essa influência torna-se cada vez menos perceptível a partir de aproximadamente 6 Km para a frequência 0,125 Hz. Já para as frequências 0,25 Hz e 0,5 Hz a influência do reservatório prevalece até regiões depois de 10 Km. Apesar de

pouco perceptível nos gráficos da amplitude do campo anômalo, o reservatório pode ser melhor identificado na resposta da fase.

É importante ressaltar que com o aumento da frequência a dissipação da energia também aumenta, como pode-se notar nas Figuras 10 a, 10 c e 10 e, na qual a primeira com frequência 0,125 Hz apresenta o campo elétrico mais intenso em 10 Km que na segunda com frequência 0,25 Hz e as duas primeiras apresentam maiores valores de campo elétrico também em 10 Km que na terceira, com frequência 0,5 Hz.

Isso nos mostra que apesar de apresentar maiores valores de intensidade do campo elétrico, para menores frequências a influência do reservatório é menos perceptível para o modelo apresentado.

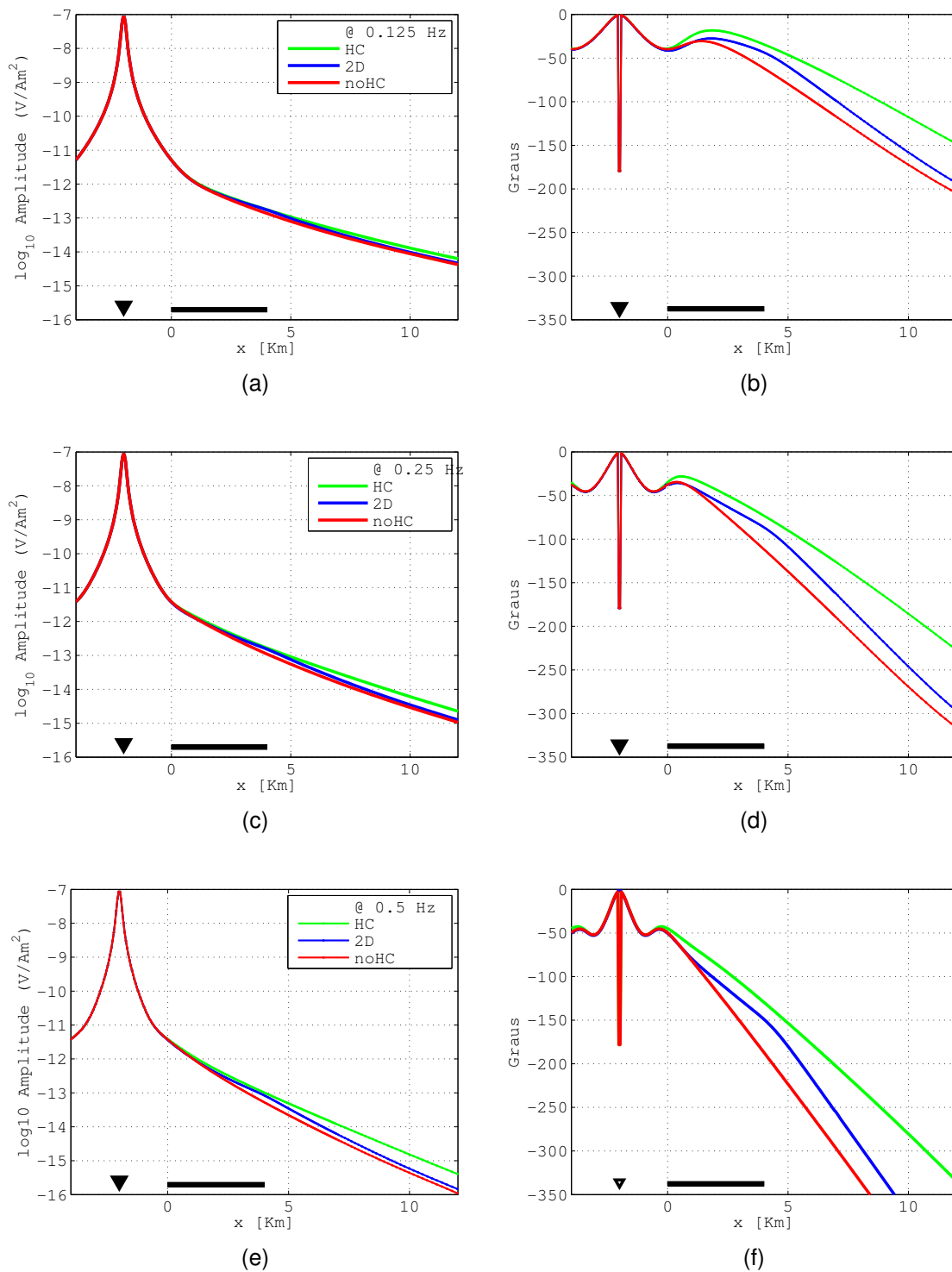
3.2.2 Análise da Depleção

O modelo apresenta resposta muito fraca próximo à borda de 0 Km. Já na borda de 4 Km, a resposta é mais forte e é onde o sinal apresenta variação significativa para os diversos modelos de depleção e para todas as frequências (vide Figura 11).2009 Esta informação é útil para efetuar um posicionamento correto de receptores. Com a depleção lateral é perceptível o deslocamento da curva com a diminuição da borda em 4 Km. Isso implica que o método é sensível para a identificação da posição da borda e, conseqüentemente, para identificar qual a direção que está ocorrendo a depleção. Esses fatos também foram salientados no trabalho de Orange, Key e Constable (2009).

Nota-se ao comparar as respostas de depleção de 80% lateral e da base que os reservatórios finos e compridos apresentam maior resposta que os reservatórios espessos e curtos, como também observado por Orange, Key e Constable (op.cit.). Esse fato é relevante para uma possível aplicação do método no Brasil, onde os reservatórios apresentam-se por vezes espessos e curtos.

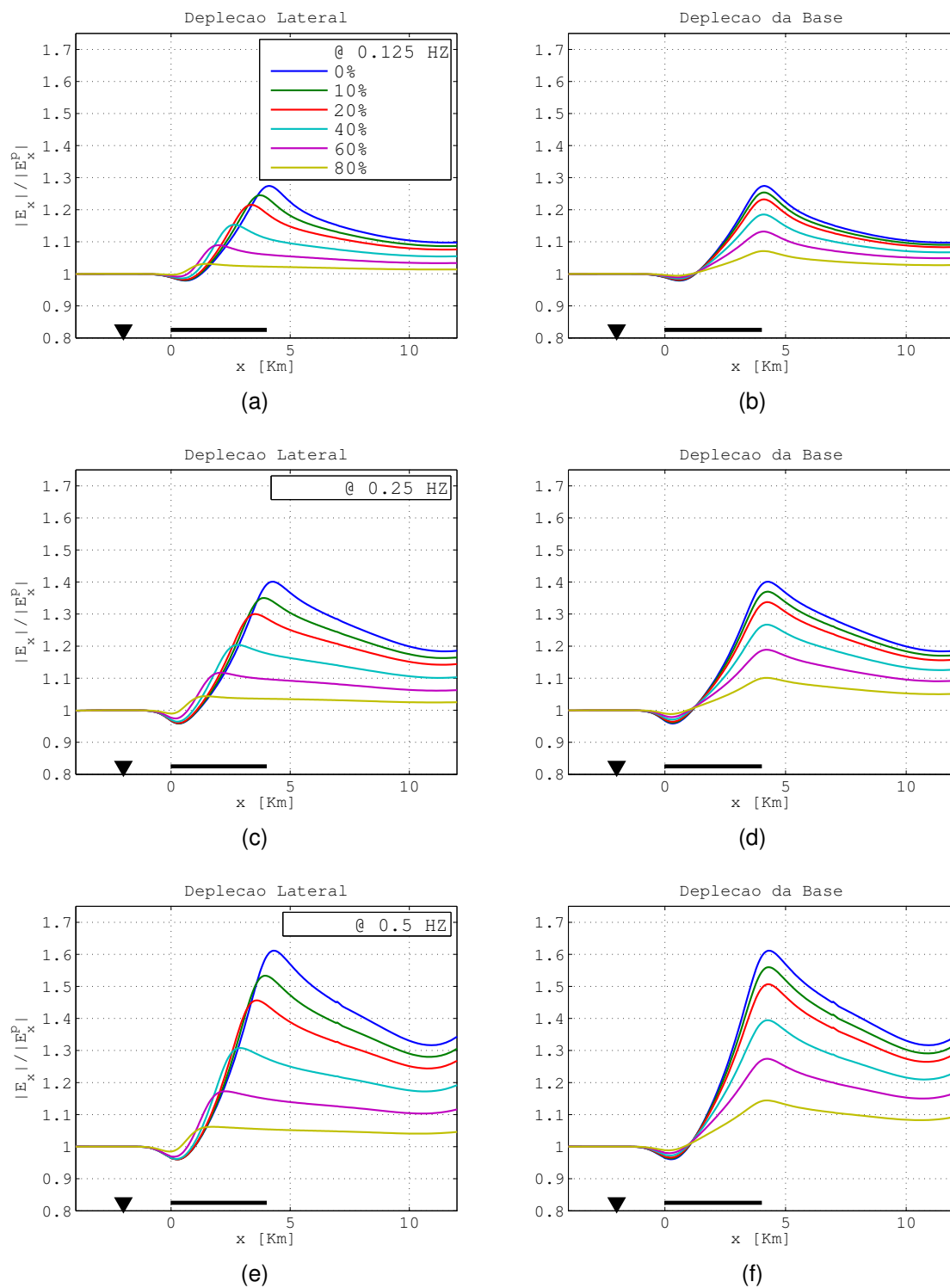
Sabe-se que na geofísica deve-se considerar a presença de ruído na aquisição devido à fatores espaciais (ou de localização) e ruído intrínseco à eletrônica do equipamento. Considerando valores abaixo 5% de anomalia como uma boa estimativa de região de ruído em um levantamento, para o modelo com 1500m de lâmina de água e com reservatório à 1000m do assoalho oceânico, tem-se que para a frequência 0,125 Hz a resposta da depleção lateral de 80% assim como da depleção basal de 80% não seriam confiáveis em um dado real devido a presença de ruído, da mesma forma que não seriam confiáveis as respostas de depleção lateral de 80% para as frequências de 0,25 Hz e 0,5 Hz.

Figura 10 – Resposta da amplitude do Campo Elétrico in line (à esquerda) e da fase (à direita) do modelo 1 para várias frequências. a) e b) 0,125 Hz, c) e d) 0,25 Hz, e) e f) 0,5 Hz. A curva de índice HC (verde) refere-se ao modelo 1D de reservatório (camada infinita) e a de índice noHC (vermelho) refere-se ao modelo 1D sem a presença do reservatório (dado de referência).



Fonte: Elaborado pela Autora

Figura 11 – Resposta da amplitude do Campo Elétrico in line do modelo de depleção lateral (à esquerda) e da base (à direita) do reservatório do modelo 1 para várias frequências. a) e b) 0,125 Hz, c) e d) 0,25 Hz, e) e f) 0,5 Hz. Os percentuais fazem referência à quantidade depletada do reservatório

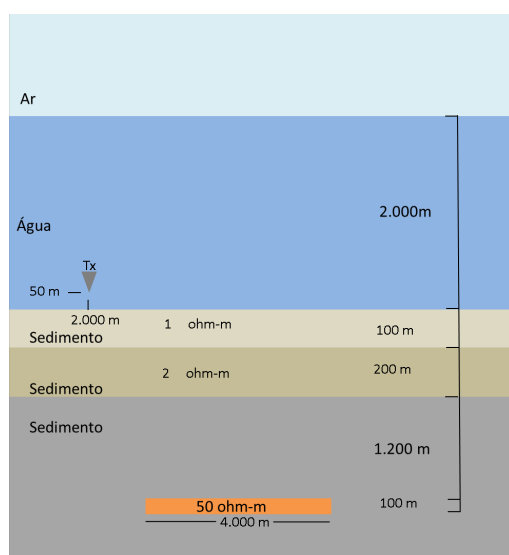


Fonte: Elaborado pela Autora

3.3 MODELO 2

O segundo modelo, apresenta apresenta lâmina d'água de 2000 metros, seguida por duas camadas de sedimento, a primeira com 100 metros de espessura e a outra com 200 metros. O reservatório se encontra a 1500 metros do fundo do mar, possui uma resistividade de 50 ohm-m, espessura de 100 metros e largura de 4000 metros (vide Figura 12)

Figura 12 – Modelo 2 - Modelo bidimensional de reservatório em ambiente sedimentar estratificado de 3 camadas com lâmina d'água de 2000m e com reservatório à 1500m do fundo do mar. Transmissor localizado à 2.000 m da esquerda do reservatório e estando à 50m do fundo do mar.



Fonte: Elaborada pelo Autor

Os valores de resistividade utilizados foram 0,33 ohm-m para a água, 1 ohm-m para a primeira camada de sedimentos, 2 ohm-m para a seguinte e 5 ohm-m para a camada infinita que contém o reservatório. O transmissor encontra-se à 2000m da borda esquerda do reservatório à 50 metros acima do fundo mar e as medidas foram realizadas no assoalho oceânico sendo que as frequências utilizadas foram de 0,125, 0,25 e 0,5 Hz.

3.3.1 Análise da Frequência

Nota-se que para o modelo de reservatório menos resistivo e à 1500m do fundo do mar, torna-se mais difícil observar a presença do reservatório. Da Figura 13a) é impossível tirar alguma informação para a frequência 0,125 Hz pois as curvas apresentam-se quase que sobrepostas. Aqui a utilização da resposta da fase é imprescindível para caracterizar com mais eficiência a presença do corpo anômalo resis-

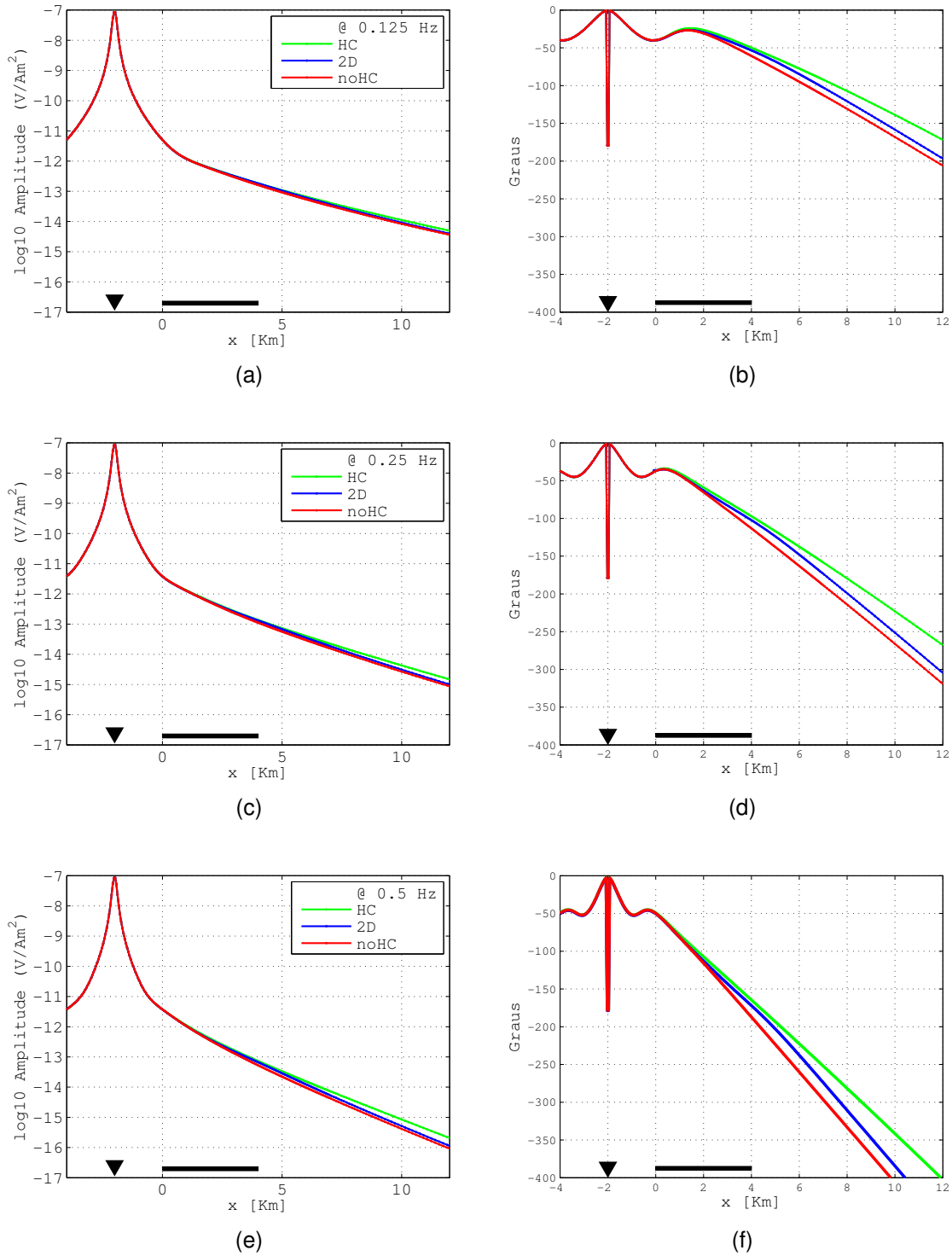
tivo. Fazendo uma análise mais cautelosa da Figura 13c) e da Figura 13e), pode-se identificar uma ínfima influência do reservatório devido à sobrevalência da curva 2D (azul) a partir de aproximadamente 2.5 Km para as frequências 0,25 Hz e 0,5 Hz. A partir de então, a influência do reservatório pode ser mais perceptível analisando a Figura 13e) do que analisando a Figura 13c), similarmente ao Modelo 1. Portanto, as mesmas conclusões podem ser aplicadas com relação à frequência, intensidade do sinal e resposta do corpo.

O aumento do soterramento do reservatório implica em uma diminuição significativa da amplitude do campo elétrico anômalo, como pode-se identificar ao comparar as escalas das Figuras 11 e 15. Contudo, ambos os modelos 1 e 2 apresentam um aumento da amplitude do campo elétrico com o aumento da frequência, como analisado anteriormente. Sabe-se que esse aumento de amplitude se deve ao fato da menor influência da onda aérea com o aumento da frequência e maior resposta do corpo. Embora para efeitos computacionais, o dado com frequência 0,5 Hz mostra-se com melhor anomalia e apresenta as mesmas curvas características para os modelos de depleção comparativamente às demais frequências, do ponto de vista da aquisição, o equipamento só mede valores até 10^{-5} . Logo, um aumento de frequência implica em uma menor aquisição de informação do corpo anômalo. Esse valor máximo de medida pode ser visto na Figura 14 que representa um dado MCSEM real da Bacia de Campos de uma região de reservatório conhecida, onde vê-se que o sinal (em vermelho) morre na região de 10^{-5} . Das informações de reservatório que representam esse dado foram retiradas as características do modelo brasileiro que será discutido na próxima seção 3.4.

3.3.2 Análise da Depleção

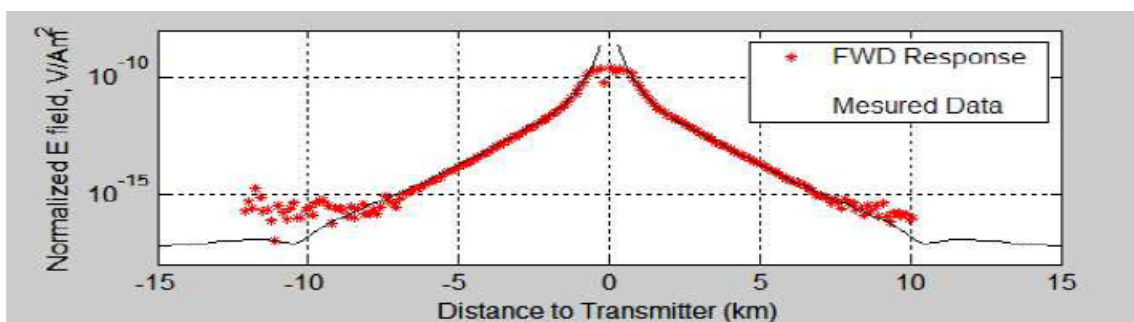
Para o modelo com 2.000m de lâmina de água e contendo um corpo resistivo à 1.500m do fundo do mar, a resposta é bem mais fraca. Dessa forma, devido ao ruído presente na aquisição geofísica os percentuais de 60% e 80% de depleção lateral e os percentuais 60% e 80% de depleção basal para a frequência de 0,125 Hz não seriam confiáveis (veja figura 15). Pelo mesmo motivo não seriam confiáveis, os percentuais 60% e 80% de depleção lateral assim como o percentual de 80% de depleção basal para a frequência de 0,25 Hz além dos percentuais de 80% de depleção lateral para a frequência 0,5 Hz. Vale ressaltar que a depleção de 60% basal para a frequência 0,125Hz assim como a depleção lateral de 60% para a frequência 0,25Hz apesar de estarem com anomalia maior que 5%, a resposta ainda é muito próxima de 5% e, por isso, foram consideradas de como sendo de baixa confiança. No mais, as mesmas conclusões encontradas por Orange, Key e Constable (2009) e citadas no modelo 1 podem ser tomadas.

Figura 13 – Resposta da amplitude do Campo Elétrico in line (à esquerda) e da fase (à direita) do modelo 2 para várias frequências. a) e b) 0,125 Hz, c) e d) 0,25 Hz, e) e f) 0,5 Hz. A curva de índice HC (verde) refere-se ao modelo 1D de reservatório (camada infinita) e a de índice noHC (vermelho) refere-se ao modelo 1D sem a presença do reservatório (dado de referência).



Fonte: Elaborado pela Autora

Figura 14 – Dado real coletado pela Petrobras juntamente com a Schlumberger da Bacia de Santos. A frequência utilizada foi de 0.5 Hz



Fonte: BUONORA, et. al. (2005)

3.4 MODELO COM CARACTERÍSTICAS DE UM RESERVATÓRIO NA BACIA DE CAMPOS

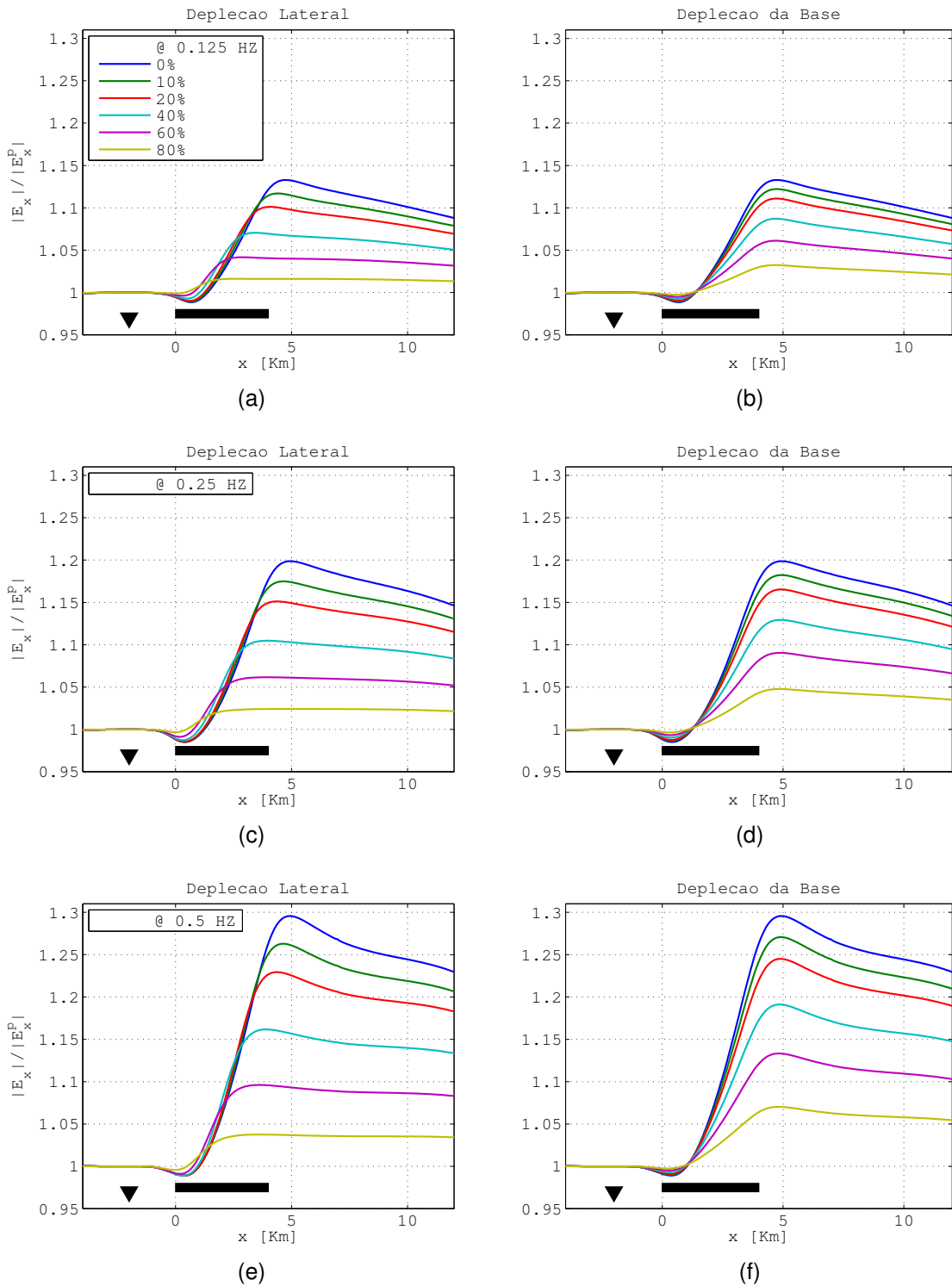
Finalmente, iremos aplicar o modelo de depleção da lateral direita e da base em modelo real de reservatório. As características deste são as de um reservatório conhecido da Bacia de Santos e as informações foram retiradas a partir do trabalho de BUONORA, et. al. (2005). O modelo, apresenta lâmina de água de 1.300 metros, seguida por três camadas de sedimento, a primeira com 850 metros de espessura, a segunda com 250 metros e a última com 450 metros. O reservatório encontra-se com topo à 2100 metros do fundo do mar, possui uma resistividade de 20 ohm-m, espessura de 20 metros e largura de 3.000 metros (vide Figura 16).

Os valores de resistividade utilizados foram 0,33 ohm-m para a água, 1,2 ohm-m para a primeira camada de sedimentos, 1,4 ohm-m para a segunda camada, 1,2 ohm-m para a terceira camada e 0,7 ohm-m para a camada infinita que contém o reservatório. O transmissor encontra-se à 3000m da borda esquerda do reservatório à 50 metros acima do fundo mar e as medidas foram realizadas no assoalho oceânico sendo que as frequências utilizadas foram de 0,125 e 0,25 Hz. Aqui não utilizamos a frequência de 0,5 Hz pois como ela não foi possível focalizar o corpo, já que nesta frequência o sinal eletromagnético alcança menor profundidade de investigação.

3.4.1 Análise da Frequência

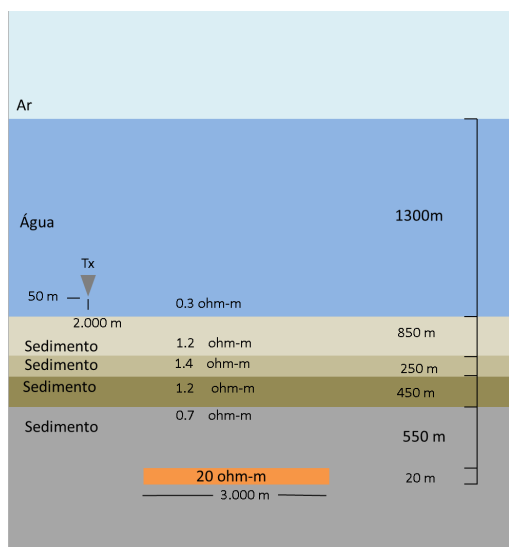
Para o caso de um modelo de reservatório característico de bacias brasileiras e que possuem dados reais conhecidos, a resposta anômala calculada do MCSEM é, como era de se esperar, muito fraca devido a espessura de 20 m e resistividade de 20 Ohm-m. Por exemplo, temos as Figuras 17a) e 17c) onde empregamos as frequências 0,125 Hz e 0,25 Hz. Nelas torna-se claro que a presença do corpo é imperceptível

Figura 15 – Resposta da amplitude normalizada do Campo Elétrico in line do modelo de depleção lateral (à esquerda) e da base (à direita) do reservatório do modelo 2 para várias frequências. a) e b) 0,125 Hz, c) e d) 0,25 Hz, e) e f) 0,5 Hz. Os percentuais fazem referência à quantidade depletada do reservatório.



Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura 16 – Modelo bidimensional real de reservatório em ambiente sedimentar estratificado de 3 camadas com lâmina d'água de 1300m e com reservatório à 2100m do fundo do mar. Transmissor localizado à 2.000 m da esquerda do reservatório e estando à 50m do fundo do mar.



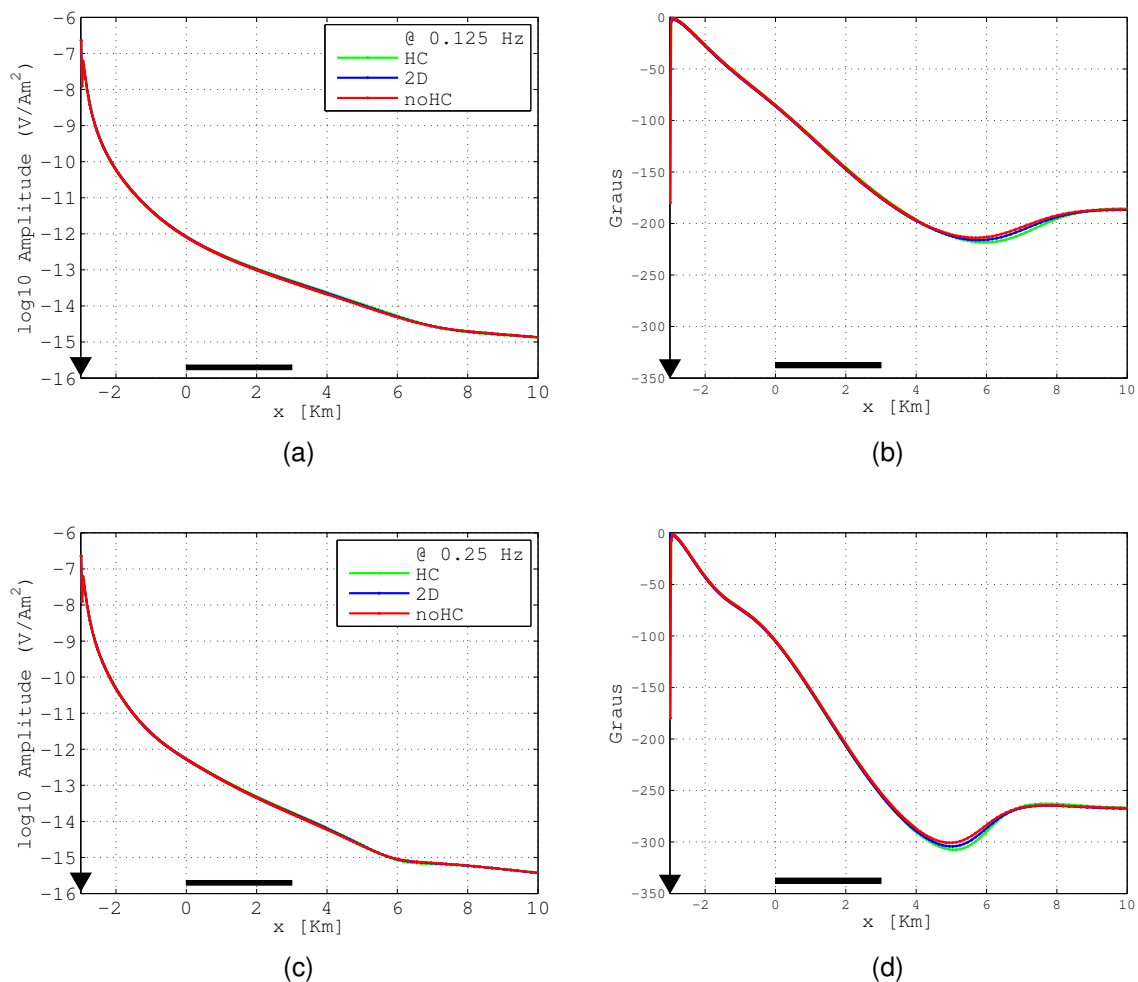
Fonte: Elaborada pela Autora

pela análise da amplitude do campo elétrico. Pela análise da fase, Figuras 17b) 17d), podemos perceber uma variação muito pequena dada pela presença do reservatório, principalmente entre as posições de 6 e 7 km para a frequência de 0,125 Hz e 4 e 6 Km para a frequência de 0,25 Hz. Valores maiores de frequências não dão respostas satisfatórias devido à profundidade do reservatório e as suas dimensões e resistividades reduzidas. Além disso, a camada de sedimento de 0,7 Ohm-m contribui para maior atenuação do sinal do que em modelos de sedimentos com resistividade que sempre aumentam com a profundidade, como nos modelos anteriores.

3.4.2 Análise da Depleção

Como foi visto na seção anterior, é imperceptível a presença do corpo anômalo para as frequência de 0,125 Hz e 0,25 Hz analisando a amplitude do campo elétrico. Isso se reflete na Figura 18a) que representa o campo elétrico normalizado. Apesar de graficamente as respostas serem maiores que 1, todas elas possuem anomalias abaixo de 5% do valor de referência. Como citado anteriormente, anomalias abaixo de 5% não são confiáveis para identificar um reservatório devido ao ruído inerente à aquisição. Isto ocorre tanto para frequência de 0,125 Hz quanto para a frequência de 0,25 Hz, e obviamente, em todos os modelos simulação o mesmo acontece para todas as depleções e também para o dado sem depleção. Isso mostra que esse modelo de reservatório ainda pode ser identificado pela frequência 0,125 Hz, no entanto a

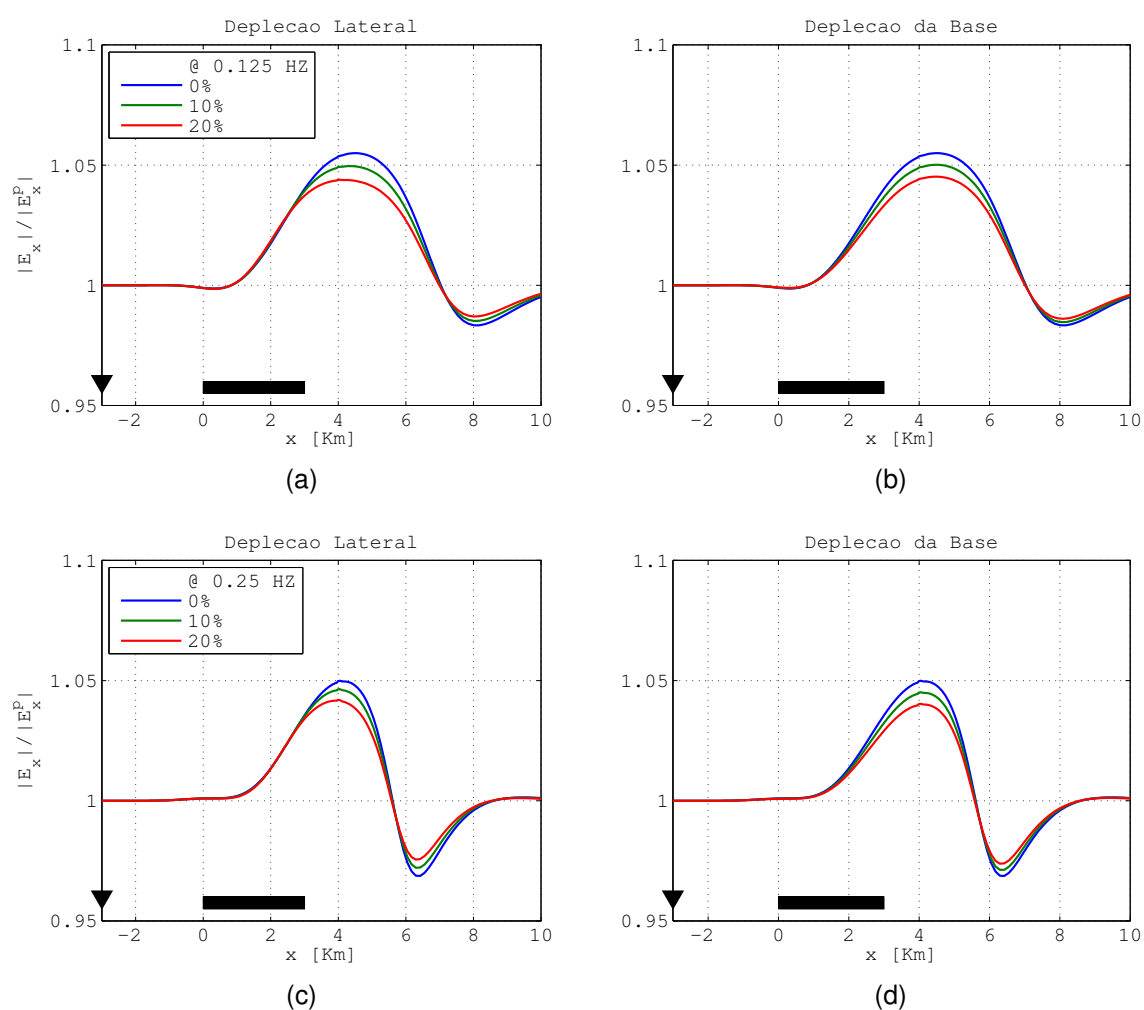
Figura 17 – Resposta da amplitude do Campo Elétrico in line (à esquerda) e da fase (à direita) do modelo brasileiro para várias frequências. a) e b) 0,125 Hz, c) e d) 0,25 Hz. A curva de índice HC (verde) refere-se ao modelo 1D de reservatório (camada infinita) e a de índice noHC (vermelho) refere-se ao modelo 1D sem a presença do reservatório (dado de referência)



Fonte: Elaborado pelo Autor

utilização do método MCSEM para a análise da depleção não se aplica.

Figura 18 – Resposta da amplitude normalizada do Campo Elétrico in line do modelo de depleção lateral (à esquerda) e da base (à direita) do reservatório do modelo brasileiro para várias frequências. a) e b) 0,125 Hz, c) e d) 0,25 Hz. Os percentuais fazem referência à quantidade depletada do reservatório.



Fonte: Elaborado pelo Autor

4 CONCLUSÕES

Este trabalho dispôs-se à analisar as respostas do método MCSEM como ferramenta de monitoramento para de reservatórios para modelos mais exigentes que os apresentados por Orange, Key e Constable (2009). Para tanto foram utilizados 3 modelos, dentre os quais o último mostrado tem suas características retiradas de um reservatório real na bacia de Campos.

Através do modelo 1 e 2 foi possível identificar que as mesmas conclusões tiradas por Orange, Key e Constable (op.cit.) ainda são válidas, apesar de os reservatórios estarem mais profundos, com menores resistividades e espessuras e os modelos terem maiores colunas d'água que o modelo dos referidos autores. Tais conclusões foram que a maior resposta anômala do reservatório se dá na região da borda e isso permite melhor posicionar os receptores na hora do levantamento além de identificar a direção de depleção lateral. Também que a resposta para reservatórios finos e compridos são mais fortes que para espessos e curtos.

Como esperado, o aumento da profundidade de soterramento do reservatório fez com que o sinal de campo elétrico anômalo diminuísse consideravelmente. Para compensar esse fato, foi sugerido a utilização de frequências mais altas, como a de 0.5 Hz ou maiores. Porém frequências muito altas podem não identificar depleções muito acentuadas como de 60% e de 80% tanto lateral como basal devido à limitação de medições dos atuais equipamentos e devido ao fato de que há uma maior perda de energia do sinal com o aumento da frequência (efeito do *skin depth*).

Para o modelo brasileiro as respostas foram de baixa intensidade. Tanto a frequência de 0,125 Hz como a de 0,25 Hz não mostraram nenhuma anomalia acima do limite de 5% adotado neste trabalho. Nossas simulações nos mostram que o método apresenta resposta relevante para os modelos mais exigentes, contudo em modelos mais extremos, onde o sinal anômalo é muito fraco, o monitoramento com o MCSEM apresenta limitações. Dessa forma, o monitoramento de reservatórios com variação de até cerca de 50% de suas medidas geométricas, representadas aqui como suas depleções, podem ser identificadas pelo método MCSEM para os modelos exigentes aqui apresentados. No entanto, em nosso último modelo representando um reservatório realista de bacias brasileiras, o MCSEM não pode ser tomado como uma ferramenta de monitoramento de depleção.

REFERÊNCIAS

CHAVE, A. D.; COX, C. S. Em Induction by ocean currents and the conductivity of the oceanic lithosphere. *Geomagn. Geoelectr.*, v. 35, p. 204–217, 1983.

CONSTABLE, S.; SRNKA, L. J. An Introduction to marine controlled-source electromagnetic methods for hydrocarbon exploration. *Geophysics*, v. 72, n. 2, p. WA3–WA12. 2006.

EVANS, R. L., S. C. CONSTABLE, M. C. SINHA, and C. S. COX, 1991, Upper crustal resistivity structure of the East Pacific Rise near 13°N: *Geophysical Research Letters*, 18, 1917–1920.

HOVERSTEN, G. M., S. Constable, and H. F. Morrison, 2000, Marine magnetotellurics for base salt mapping: Gulf of Mexico field-test at the Gemini structure. *Geophysics*, 65, 1476–1488.

KEY, K., S. CONSTABLE, and C. J. WEISS, 2006, Mapping 3D salt using the 2D marine magnetotelluric method: Case study from Gemini Prospect, Gulf of Mexico. *Geophysics*, 71, No. 1, B17–B27

MACGREGOR, L. M., S. CONSTABLE, and M. C. SINHA, 1998, The RAMESSES experiment III: Controlled source electromagnetic sounding of the Reykjanes Ridge at 57°45'_N. *Geophysical Journal International*, 135, 773–789.

MacGregor, L., and S. Sinha, 2000, Use of marine controlled-source electromagnetic sounding for sub-basalt exploration: *Geophysical prospecting*, 48, 1091–1106.

MACGREGOR, L., M. SINHA, and S. CONSTABLE, 2001, Electrical resistivity structure of the Valu Fa Ridge, Lau Basin, from marine controlled-source electromagnetic sounding. *Geophysical Journal International*, 146, 217–236.

NABIGHIAN, M. N. Electromagnetic methods in applied geophysics - theory. Tulsa, Oklahoma. Society of Exploration Geophysicists-SEG, 1988. (Investigations in Geophysics, v.3)

ORANGE, A.; KEY, K.; CONSTABLE, S. The Feasibility of reservoir monitoring using time-lapse marine csem. *Geophysics*, v. 74, n. 2, p. 21–29. 2009.

RIJO, L. *Electrical geophysics – multidimensional earth*. [S.l.: s.n.], 2002.

SILVA, H. F. da. *Modelagem numérica de dados MCSEM 2.5-D*. 2012. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Pará, Instituto de Geociências, Belém, 2012.

SINHA, M. C., P. D. PATEL, M. J. UNSWORTH, T. R. E. Owen, and M. R. J. MacCormack, 1990, *An active source EM sounding system for marine use: Marine Geophysical Research*, 12, 59–68.

SOUZA, V. C. T. de. *Modelagem numérica de dados MCSEM usando computação paralela*. 2007. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Pará, Centro de Geociências, Belém, 2007.

SRNKA, L. J., 1986, Method and apparatus for offshore electromagnetic sounding utilizing wavelength effects to determine optimum source and detector positions. *U. S. Patent* 4,617,518.

UM, E.S.; ALUMBAUGH, D. L. On the Physics of the marine controlled-source electromagnetic method. *Geophysics*, v. 72, p. WA13–WA26. 2007.

WARD, S. H., and G. W. HOHMANN, 1988, Electromagnetic theory for geophysical applications, in M. Nabighian, ed., *Electromagnetic methods in applied geophysics*, vol. 1: SEG, 131–311.

WEISS, C. J.; CONSTABLE, S. C. Mapping thin resistors and hydrocarbons with marine EM methods: Insights from 1d modeling. *Geophysics*, v. 71, p. 43–51. 2006.