



Detecção de reservatórios de hidrocarbonetos 1-D em ambiente marinho através de dipolo elétrico vertical

Thaynara Barroso Oliveira, Marcos Welby Correa da Silva, Victor Cezar Tocantins de Souza, Danusa Mayara de Souza

Copyright 2021, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation during the 17th International Congress of the Brazilian Geophysical Society, held in Rio de Janeiro, Brazil, August 16-19, 2021.

Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the 17th International Congress of the Brazilian Geophysical Society and do not necessarily represent any position of the SBGf, its officers or members. Electronic reproduction or storage of any part of this paper for commercial purposes without the written consent of The Brazilian Geophysical Society is prohibited.

Resumo

The Transient Electromagnetic Prospecting with Vertical Electrical Lines (TEMP-VEL), is a mCSEM method used for hydrocarbon prospecting, recently developed by the Norwegian geophysical company Petromarker. It is different from the other mCSEM methods because it uses the vertical transmitter-receiver configuration and measures in time domain. In this work we present the one-dimensional modeling of TEMP-VEL performed using the EMPYMOD in Python to simulate the propagation of the electromagnetic field in a simple geological environment with layers. Variations of the parameters of this model with reservoir are realized with the intention of analyzing how this electromagnetic field behaves and distinguish models with hydrocarbon reservoir from those without the reservoir of hydrocarbon, both in the presence of different parameters of the model. The parameters chosen to perform these variations were: receiver position, water depth, hydrocarbon reservoir depth, reservoir thickness, among others.

Introdução

Os métodos eletromagnéticos podem indicar a presença de hidrocarbonetos por meio do contraste de condutividade deste com o meio circundante que possui maior condutividade (Eidesmo et al., 2002). O método eletromagnético marinho de fonte controlada (mCSEM) foi desenvolvido nas últimas três décadas devido o avanço na computação e eletrônica, e tem sido amplamente utilizado na última década na exploração de hidrocarbonetos. Ele utiliza um dipolo horizontal e faz medidas no domínio da frequência (Edwards, 2005). Um método mCSEM desenvolvido recentemente é o método de Prospecção Eletromagnética Transiente com Linhas Elétricas Verticais (TEMP-VEL), também utilizado para prospecção de hidrocarbonetos. Desenvolvido pela empresa geofísica norueguesa Petromarker este método utiliza a configuração transmissor-receptor vertical e faz medidas no domínio do tempo. A corrente resultante de um transmissor vertical é sensível a camadas resistivas horizontais. Essas informações podem ser usadas tanto para localizar novos reservatórios como para monitorar a mudança nas propriedades do reservatório em produção (Flekkoj and Holten and Veiberg, 2009). Em meados de 2008, o novo método foi usado para um levantamento da

descoberta de gás, no Campo de Luva, Mar da Noruega pela Discover Petroleum AS, em colaboração com a StatoilHydro e a Royal Dutch Shell (Borven and Flekkoj, 2009). Outros dois levantamentos foram realizados para testar o TEMP-VEL, um no campo de Troll (Noruega) em 2007 (Holten and Singer and Flekkoj, 2010) e outro no campo de Snøhvi, no Mar de Barents (Helwig et al., 2013). Esses levantamentos comprovaram a eficácia do método.

Metodologia

Este é um método que opera no domínio do tempo e usa fontes estacionárias de Dipolo Elétrico Vertical (VED) que transmitem um sinal eletromagnético transiente. A tecnologia do sistema de pulsação da Petromarker consiste em dois geradores de pulsos trabalhando em paralelo com uma corrente com capacidade total de 5.000 A, ligados à embarcação com cabos. O eletrodo de pulso inferior, conectado ao cabo de pulso, é posicionado no fundo do mar. A posição do eletrodo inferior é medida pela média dos dados posicionais de um transponder acústico acoplado nele. A embarcação é movida para uma posição diretamente acima do eletrodo inferior estacionário e o eletrodo superior é baixado 50 m abaixo da superfície do mar e colocado de forma que a verticalidade seja alcançada como é possível ver na Figura 1 (Holten et al., 2009).

O desafio ao medir a componente vertical do campo elétrico, em vez do horizontal, é a pequena amplitude do sinal. Nos últimos tempos, a resposta horizontal de um dipolo horizontal é 2 a 3 ordens de grandeza mais forte que a resposta vertical de um dipolo vertical. Portanto, tanto os ângulos de inclinação do transmissor quanto do receptor devem ser mantidos muito pequenos, um desafio que motivou o projeto de um tripé estável, no qual a verticalidade é alcançada por meio da ação da gravidade. A dependência dos dados medidos nas posições do transmissor e do receptor pode ser usada para controlar os efeitos de inclinação (Figura 2) (Holten et al., 2009).

Para obter as respostas do campo eletromagnético desse método foi utilizado o EMPYMOD que é um modelador eletromagnético capaz de modelar respostas elétricas ou magnéticas devido a uma fonte tridimensional elétrica ou magnética. O cálculo é realizado no domínio do número de onda da frequência, e vários métodos de transformação de Hankel e Fourier são incluídos para transformar as respostas nos domínios espaço-frequência e espaço-tempo (Werthmuller, 2017). A estrutura do empymod é composta por três principais rotinas de modelagem: bipolo, dipolo e analítico (Werthmuller, 2017).

O EMPYMOD foi usado em um programa chamado MVEM dentro do Anaconda (<https://www.anaconda.com>), que é

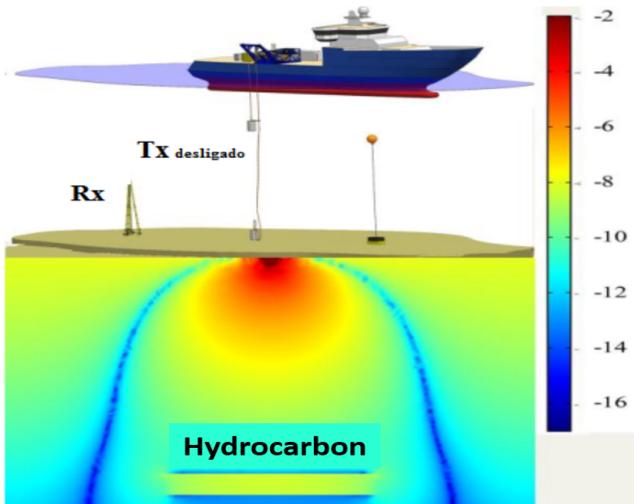


Figura 1: Embarcação com dipolo elétrico vertical desligado, em que o eletrodo superior se encontra 50m abaixo da superfície do mar e o eletrodo inferior se encontra na superfície da camada de sedimentos, o receptor está ligado. A escala de cores dos representa o campo elétrico vertical na presença do reservatório cheio de HC (amarelo) (Holten et al., 2009).

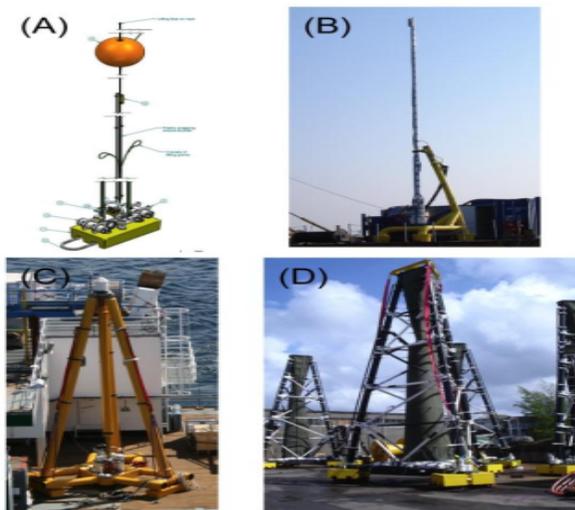


Figura 2: Diferentes modelos de receptores (a,b,c,d) criados para diminuir o ruído na resposta devido a inclinação dos receptores, que é o principal obstáculo do método TEMP-VEL (Flekoy and Holten and Haaland and Maloy, 2010).

uma distribuição livre e de código aberto da linguagem de programação Python usada para criação do programa. O EMPYMOD fornece ao programa os códigos prontos para o cálculo do bipolo, por isso não serão mostrados os cálculos neste trabalho.

A Figura 3 mostra uma imagem do Anaconda Navigator, que é a interface gráfica de usuário incluída na distribuição do Anaconda, nesta interface é possível ver o jupyter notebook que foi usado para criação do programa MVEM, essa ferramenta já vem com o Anaconda e é utilizada para se escrever os códigos semelhante como no MATLAB.

Na Figura 4 o MVEM é mostrado. Este programa é composto por três blocos, no primeiro bloco é chamado o bipolo do EMPYMOD que é usado para modelar o campo, no segundo bloco os parâmetros offset, profundidade e resistividade são declarados, no terceiro bloco são realizados os comandos para plotar o gráfico dos modelos com e sem reservatório de hidrocarboneto.

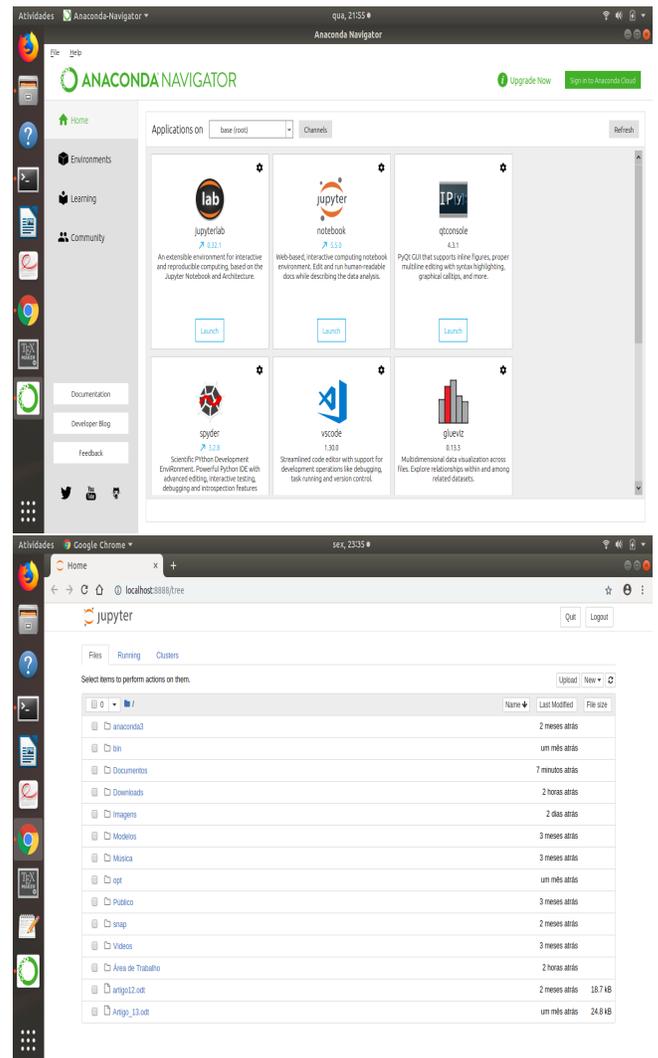


Figura 3: Anaconda Navigator e jupyter notebook usado para criação do programa MVEM.

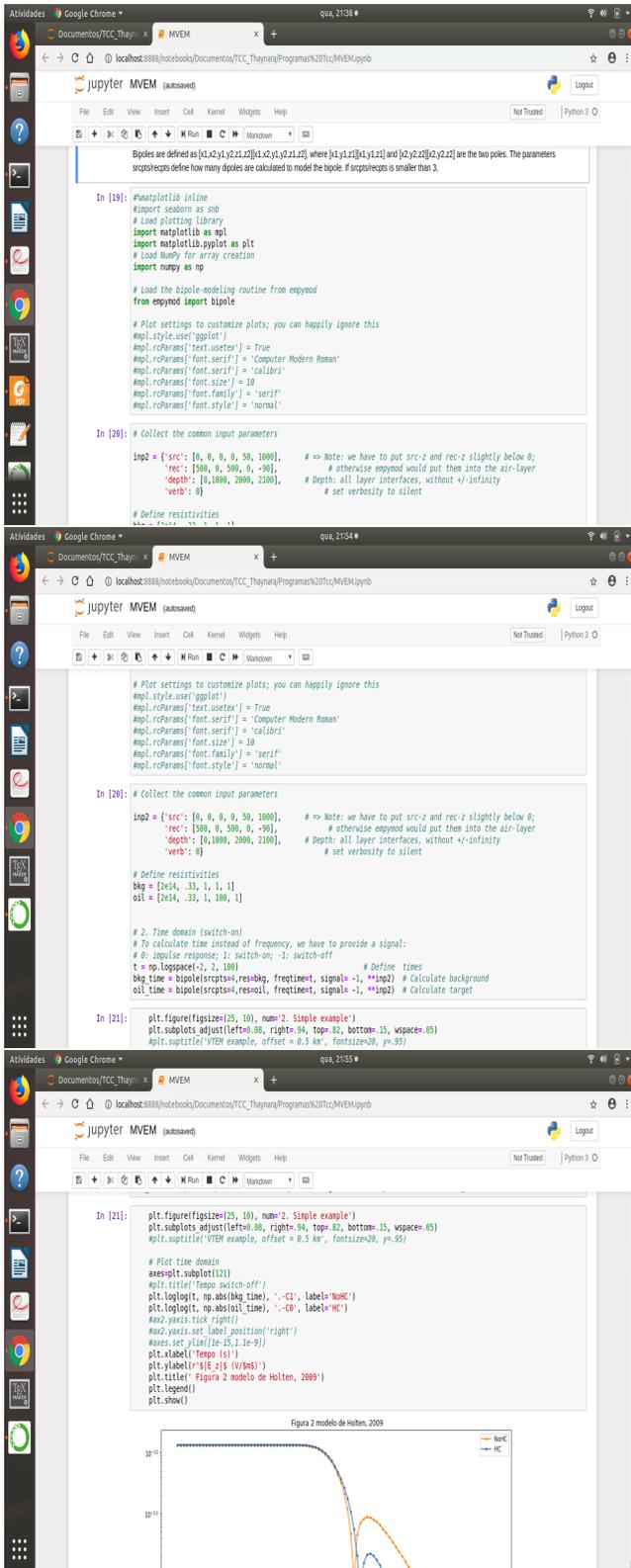


Figura 4: Programa MVEM dividido em três blocos, no primeiro bloco o bipole é chamado, no segundo bloco são declarados os parâmetros e no terceiro bloco são realizados os comandos para plotar o gráfico.

Resultados

Serão apresentados aqui os resultados da modelagem 1-D do TEMP-VEL obtidos com o código Empymod do Python. Primeiro será apresentado o modelo canônico (Figura 5) que é geologicamente simples, e servirá como referência para os casos estudados com variação de propriedades físicas e parâmetros geométricos. Os modelos de variação foram gerados a partir de mudanças nos parâmetros do modelo canônico.

O modelo unidimensional canônico possui uma camada infinita representando o ar, uma camada inferior representando a lâmina d'água com espessura igual a 1000 metros e resistividade igual a $0.33 \Omega m$, em seguida uma camada de sedimento com espessura igual a 1000 metros e resistividade igual a $1 \Omega m$, abaixo desta para o modelo com hidrocarboneto é usada uma camada de reservatório com espessura igual a 100 metros e a sua resistividade igual a $100 \Omega m$, e por uma outra camada de sedimento.

Para construir esse modelo, foi utilizado um bipolo elétrico vertical com corrente de 5000 A como fonte, onde o polo superior foi colocado 50 metros abaixo da superfície do mar e o polo inferior foi colocado no fundo do mar, o receptor foi colocado 500 metros longe da fonte. Para obter a resposta sem reservatório se usa a resistividade da camada reservatório igual a $1 \Omega m$, logo ela terá a mesma resistividade das camadas circundantes. A Figura 5 ilustra o modelo canônico e a Figura 6 mostra a resposta do campo elétrico para os casos com e sem reservatório desse modelo de referência.

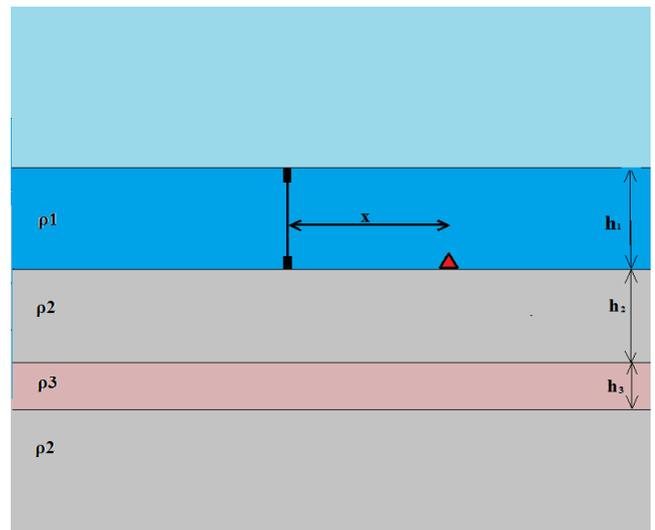


Figura 5: Modelo 1-D, em que x representa a distância entre o transmissor e o receptor, h_1 representa a espessura da lâmina d'água, h_2 representa a espessura da camada de sedimentos, h_3 representa a espessura do reservatório e ρ_1 , ρ_2 e ρ_3 representam as resistividades da lâmina d'água, da camada de sedimentos e do reservatório respectivamente).

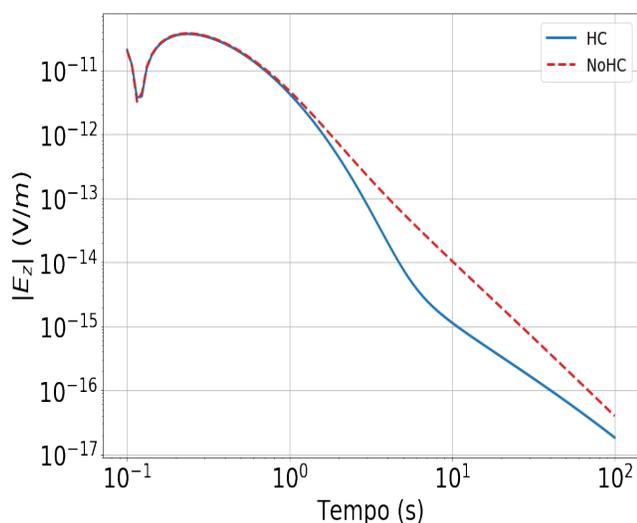


Figura 6: Respostas do campo elétrico para o modelo canônico com reservatório de hidrocarboneto (linha azul contínua) e sem reservatório de hidrocarboneto (linha vermelha tracejada).

Efeitos da variação da posição do receptor

Nesta seção é apresentada a resposta do campo elétrico para os modelos obtidos a partir de variações da posição do receptor (Figura 7). A presença do hidrocarboneto mais resistivo no meio homogêneo é notada pela menor intensidade do campo elétrico, em virtude da polarização elétrica dentro da camada, que tem direção oposta ao campo do dipolo.

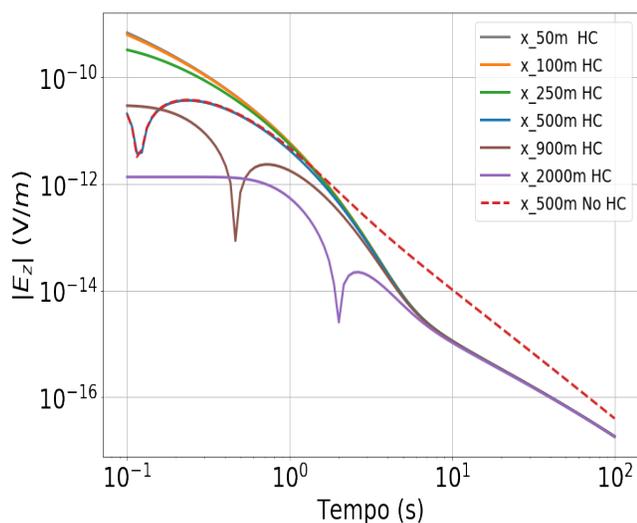


Figura 7: Respostas do campo elétrico para offsets iguais a 50m, 100m, 250m, 500m, 900m e 2000m do modelo com hidrocarboneto (linhas contínuas) e resposta do campo elétrico para o offset igual a 500m do modelo sem hidrocarboneto (linha tracejada).

É possível perceber grande diferença no valor do campo elétrico para as curvas do modelo com hidrocarboneto nos

tempos iniciais, com diminuição da intensidade do campo à medida que o offset aumenta, indicando que mesmo para tempos iniciais é direta a influência do HC com offsets maiores. Já nos tempos finais se percebe que não há diferença entre os valores do campo elétrico para as curvas do modelo com hidrocarboneto, pois as curvas para todos os offsets decaem de forma muito semelhante, mas é possível perceber grande diferença entre as respostas do campo dos modelos com e sem reservatório de hidrocarboneto, à maneira como verificamos no modelo canônico.

Efeitos da variação da espessura da lâmina d'água

Agora serão apresentadas as respostas do campo elétrico para variações da espessura da lâmina d'água do modelo com reservatório de hidrocarboneto (Figura 8).

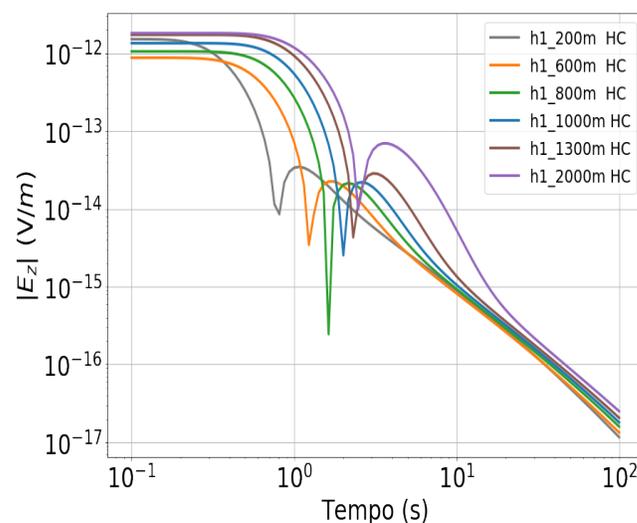


Figura 8: Respostas do campo elétrico para espessuras da lâmina d'água iguais a 200m, 600m, 1000m, 1300m e 2000m do modelo com reservatório de hidrocarboneto.

É possível observar neste caso que quanto menor a espessura da lâmina d'água, mais suave é a curva com HC e nos tempos iniciais o decaimento é mais brusco para maiores espessuras, o que pode ser devido à condutividade do mar, porém nos tempos finais as respostas do campo tendem para o mesmo valor.

O parâmetro "espessura do mar" é de difícil análise pois aumenta também o comprimento do dipolo e consequentemente o valor do momento de dipolo, como vemos na figura pela maior intensidade do campo elétrico para maiores lâminas d'água.

Efeitos da variação da profundidade do reservatório

Na Figura 9 serão apresentadas as respostas do campo elétrico para variações da profundidade do reservatório.

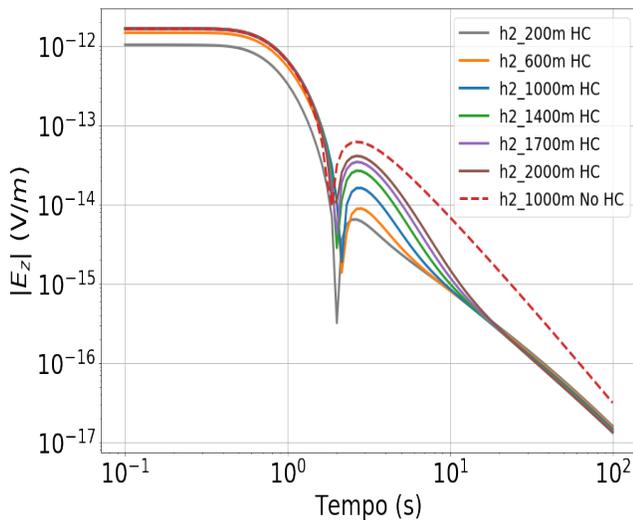


Figura 9: Respostas do campo elétrico para profundidades do reservatório iguais a 200m, 600m, 1000m, 1400m, 2000m (linhas contínuas) e resposta do campo elétrico do modelo canônico sem reservatório para profundidade igual a 1000m (linha tracejada).

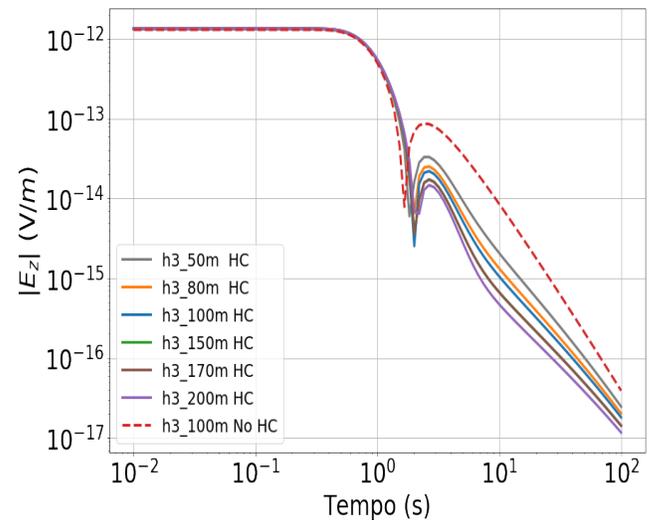


Figura 10: Resposta do campo elétrico para espessuras do reservatório iguais a 50m, 80m, 100m, 150m e 200m (linhas contínuas) e resposta do campo elétrico para espessura igual a 100m do modelo canônico sem reservatório (linha tracejada).

Pode-se observar que nos tempos iniciais e nos tempos finais as respostas do campo elétrico para esses modelos com diferentes profundidades tendem para o mesmo valor, nos tempos iniciais não é possível ver significativa diferença entre as respostas de todas as profundidades e a resposta do campo para o modelo sem reservatório. A partir de $t=2$ s mais ou menos já é possível observar a diferença nas respostas do campo dos modelos de diferentes profundidades e a resposta do campo do modelo sem hidrocarboneto. Também é possível ver que quanto menor a profundidade usada, maior é o efeito do HC devido ao campo induzido ter maior efeito sobre o campo total.

Efeitos da variação da espessura do reservatório

Agora apresentam-se as curvas das respostas do campo elétrico para diferentes espessuras do reservatório (Figura 10).

Observa-se que nos tempos iniciais não existe diferença significativa entre as respostas do campo elétrico para essas variações na espessura do reservatório e também não existe diferença dessas respostas para a resposta do campo elétrico do modelo sem reservatório de hidrocarboneto, já nos tempos finais eles tendem para o mesmo valor porém observa-se diferença nas respostas do campo elétrico. A partir de $t=2$ s mais ou menos se pode observar melhor a diferença entre as respostas do campo para as variações da espessura do reservatório e a resposta do campo para o modelo sem reservatório, sendo que quanto maior a espessura mais rápido acontecerá o decaimento do campo elétrico para o modelo com hidrocarboneto. Aqui, como esperado, há uma relação direta entre a dimensão do reservatório de hidrocarboneto e o seu efeito quando comparado ao meio homogêneo. Isto porque o campo polarizado é maior com o aumento da espessura do reservatório.

Efeitos da variação do valor da resistividade do reservatório

São apresentadas, na Figura 11, as curvas das respostas do campo elétrico para diferentes resistividades do reservatório de hidrocarboneto.

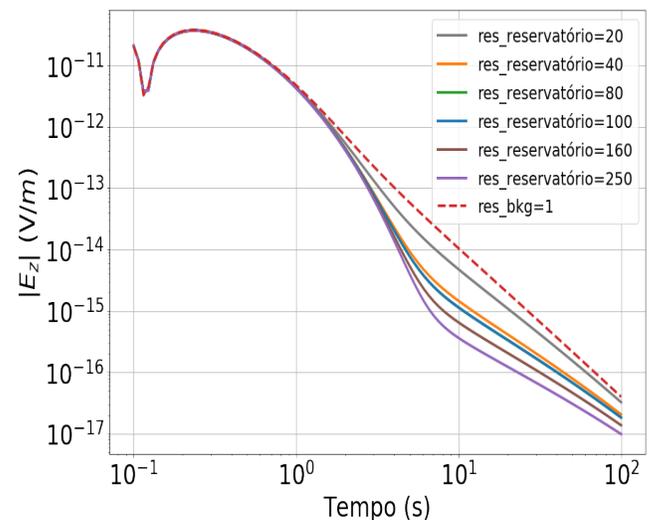


Figura 11: Resposta do campo elétrico para resistividades do reservatório iguais a 20 Ωm , 40 Ωm , 80 Ωm , 100 Ωm , 160 Ωm e 250 Ωm (linhas contínuas) e resposta do campo elétrico para resistividade igual a 1 Ωm do modelo canônico sem reservatório (linha tracejada).

Observa-se que nos tempos iniciais não há diferença perceptível devido a maior resistividade. Nos tempos posteriores vemos que o efeito do reservatório é maior com o aumento da resistividade. Por fim, de 100 s em

diante há a tendência das curvas convergirem para o valor do meio homogêneo. Neste experimento se pondera que o aumento da resistividade implique em uma menor difusão do campo dentro da camada, o que resulta em uma menor componente vertical do campo elétrico total, quando comparado ao campo do meio sem HC.

Efeitos da variação do valor da resistividade dos sedimentos

São apresentadas aqui as curvas das respostas do campo elétrico para diferentes resistividades da camada de sedimentos (Figura 12).

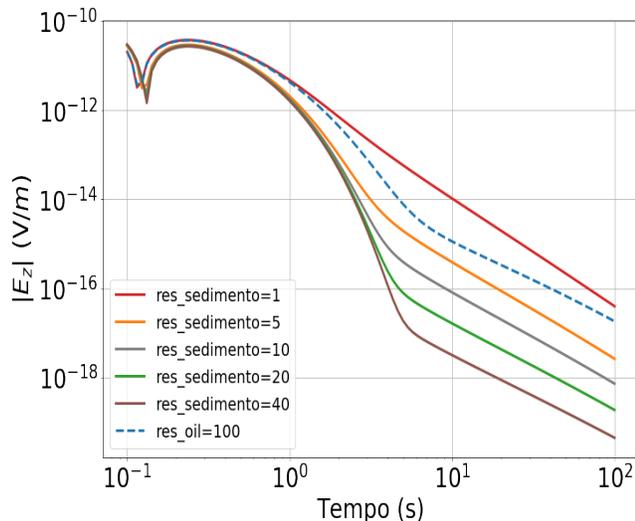


Figura 12: Resposta do campo elétrico para resistividades da camada de sedimentos iguais a 1 Ωm , 5 Ωm , 10 Ωm , 20 Ωm e 40 Ωm e (linhas contínuas) e resposta do campo elétrico para resistividade igual a 100 Ωm do modelo canônico com reservatório (linha tracejada).

Pode-se observar na Figura 12 que nos tempos iniciais não existe diferença significativa entre as respostas do campo elétrico (exceto no canônico) para essas variações na resistividade da camada de sedimentos e que para os tempos maiores que 10 s a atenuação do campo elétrico se dá de maneira homogênea, possuindo maior intensidade os casos em que a resistividade é menor. Consideramos que esta diminuição da componente vertical do campo elétrico com o aumento da resistividade ocorre pela menor penetração das correntes galvânicas no meio mais resistivo e por consequência, haverá aumento do valor da componente horizontal do campo elétrico.

Conclusão

O método TEMP-VEL foi desenvolvido e tem sido utilizado para prospecção de hidrocarbonetos em ambiente marinho e é um método que ainda carece de estudo e melhor compreensão de todas as suas potencialidades.

Este estudo aqui apresentado mostrou resultados pertinentes à compreensão da técnica proposta. Os passos naturais a este trabalho seriam usar o código 1-D para obter seções de densidade de corrente e assim entender melhor os efeitos dos parâmetros do reservatório e também testar a viabilidade do método aos casos 2-D e

3-D.

Referências

- Borven, Jon-Mattis & Flekkoy, Eirik Grude, 2009, New EM technology uses vertical rather than horizontal electrical lines, **230**, no. 9, 41–45.
- Edwards, RN, 2005, Marine controlled source electromagnetics: Principles, methodologies, future commercial applications: Surveys in geophysics, 675–700p.
- Eidesmo, T and Ellingsrud, S and MacGregor, LM and Constable, S and Sinha, MC and Johansen, S and Kong, FN and Westerdahl, H, 2002, Sea bed logging (sbl), a new method for remote and direct identification of hydrocarbon filled layers in deepwater areas, 144–152p.
- Flekkoy, E G and Holten, T and Veiberg, D, Vertical Electric Time-domain Responses from a Vertical Current Source for Offshore Hydrocarbon Exploration, no. 6.
- Flekkoy, E G and Holten, T and Haaland, E and Maloy, KJ, 2010, Extracting the signal from the noise in marine EM measurements, no. 6.
- Helwig, S L and El Kaffas, A W and Holten, T and Frafjord, O and Eide, K, 2013, Vertical dipole csem: technology advances and results from the snøhvit field, **31**, no. 4.
- Holten, Terje and Flekkoy, Eirik Grude and Singer, Bension and Blixt, Erik Marten and Hanssen, Alfred & Maloy, Knut Jorgen, 2009, Vertical source, vertical receiver, electromagnetic technique for offshore hydrocarbon exploration, **27**, no. 5.
- Holten, Terje and Singer, Bension and Flekkoy, Eirik Grude, 2010, Effects of a limited reservoir and induced polarization on acquisition with vertical electrodes, 874–878p.
- Werthmuller, Dieter, 2017, An open-source full 3D electromagnetic modeler for 1D VTI media in Python: empymod, **82**, no. 6.
- Werthmuller, D, 2017, Getting Started with Controlled-Source Electromagnetic 1D Modeling, 352–355p.