



Método VME – resultado preliminar de modelagem 3D

Danusa Mayara de Souza¹, Marcos Welby Correa Silva¹, Victor Cezar Tocantins Souza¹. ¹Universidade Federal do Pará

Copyright 2019, SBGF - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation during the 16th International Congress of the Brazilian Geophysical Society held in Rio de Janeiro, Brazil, 19-22 August 2019.

Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the 16th 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.

Abstract

This expanded abstracts presents a 1D modeling in Anaconda Python Data Science Platform and a 3D preliminary modeling in COMSOL Multiphysics of the Vertical Marine Electromagnetic method. The forward modeling shows to be effective to regain the response of electric field decay.

Introdução

A atividade exploratória envolve vários fatores que não se tem controle, como a presença/ausência de óleo e qualidade do produto explotado. A fim de minimizar as incertezas e ambiguidades encontradas ao longo dos prospectos de óleo e gás, os métodos eletromagnéticos de fonte controlada em ambiente marinho (*offshore*) têm ganhado destaque, principalmente, pelas inovações tecnológicas e operacionais. Além de apresentarem cada vez mais um menor tempo de aquisição e maior resolução, fornecem um maior número de informações e conhecimento sobre o ambiente geológico de interesse.

Consagrado, inclusive, por estudos substanciais para indicação direta de hidrocarbonetos (Sainson, 2012), o mCSEM (*marine Controlled Source ElectroMagnetic*) teve sua configuração de aquisição alterada por uma empresa norueguesa – Petromarker – afim de melhorar a resolução vertical e promover uma maior distinção entre corpos condutivos e resistivos (Frafjork *et al.*, 2014; Holten *et al.*, 2009a). Além de alterações instrumentais, a metodologia recebeu a mnemônica nomenclatura de VME (*Vertical Marine Electromagnetic*) e foi patenteada sob o nome TEMP-VEL (*Transient ElectroMagnetic Prospecting with Vertical Electric Lines*) (Gloux & Holten, 2009).

O método VME é, a rigor, um método CSEM que se distingue do SBL (*SeaBed Logging* – método que virou sinônimo das metodologias EM de fonte controlada) pelos arranjos fonte-receptor e modo de aquisição (tempo).

O presente trabalho exhibe o resultado preliminar da modelagem tridimensional do método VME, com objetivo de analisar as respostas dos campos eletromagnéticos em um meio acamado.

Método

O VME realiza medidas do campo eletromagnético da subsuperfície em ambiente marinho. O transmissor é composto por um gerador de pulsos DC; um dipolo elétrico vertical, constituído por dois eletrodos de aço (3000 A cada) ligados por um extenso cabo de cobre, sendo que um eletrodo fica a 50 metros abaixo do navio e o segundo eletrodo, no fundo do mar; um lançador/recuperador dos eletrodos. Os receptores são antenas verticais tripés, fabricadas em material não ferroso, que são espalhadas em linhas radiais (ao Tx), pelo assoalho oceânico. Informações instrumentais mais detalhadas podem ser consultadas em Barsukov *et al.* (2007), Barsukov *et al.* (2008) e Kjerstad (2010).

A aquisição de dados é feita no domínio do tempo, em que tanto a fonte quanto os receptores ficam estáticos. A leitura dos dados pelo receptor é feita durante os períodos de inatividade da fonte. Como quando a fonte é acionada no momento em que os receptores estão desligados, os dados não sofrem interferência das ondas diretas e ondas aéreas (*air waves*), que são inconvenientes inerentes das aquisições com o SBL. A Figura 1 traz uma maior elucidação do método (Borven & Flekkoy, 2009).

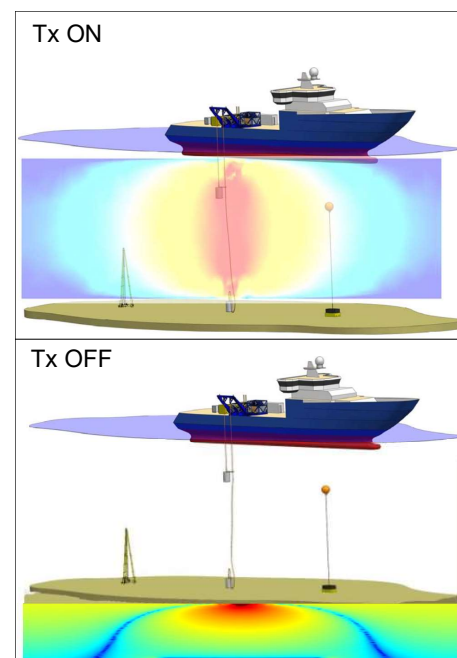


Figura 1 – Esquema de funcionamento do VME (adaptado de Holten *et al.* 2009b e Flekkoy *et al.*, 2009).

O arranjo vertical-vertical (Tx e Rx) faz com que haja propagação somente do modo TM (transversal magnético

– componentes H_y , E_x e E_z) do campo EM. O offset curto origina uma focalização (*near zone*) do imageamento, já que a distância usual do Rx para o Tx é de 250 m (e seguida de seus múltiplos). Apesar do sinal recebido ser fraco, uma vez que a leitura só é feita quando a fonte está desligada, há uma maior sensibilidade ao contraste vertical de resistividade elétrica.

Uma modelagem 1D com o Anaconda e uma 3D com o COMSOL foram feitas afim de analisar o comportamento dos campos na ausência e presença de estruturas resistivas (reservatórios de hidrocarbonetos).

O Anaconda (Anaconda, 2017) é uma plataforma de distribuição livre e código aberto de linguagem de programação Python. No Anaconda os códigos são construídos (ou importados de módulos) e compilados no mesmo ambiente em que as figuras são plotadas (matplotlib), além de fornecer uma interface amigável. Os códigos-fontes em Python podem ser confeccionados pelo próprio usuário ou adquiridos em repositórios presentes na internet, sendo o GitHub o mais popular.

O EMPYMOD (Werthmüller, 2017) é um modelador de fontes elétricas e eletromagnéticas desenvolvido em Python. Os scripts possuem versões para serem utilizados tanto no Jupyter notebook (Anaconda) ou consoles IPython, QT e Python. O código utilizado neste trabalho foi construído no Jupyter notebook a partir de rotinas contidas no exemplo da modelagem do CSEM disponibilizado no GitHub. O programa desenvolvido aproveita a solução do campo eletromagnético em um modelo 1D, alterando a fonte (Tx) de dipolo para bipolo, domínio da frequência para o domínio do tempo (FFT e Hankel), orientação da fonte e do receptor de horizontais para verticais, além da componente do campo EM de E_x para a E_z .

O COMSOL (Comsol, 2018) é um software proprietário para simulação multifísica, possuindo vários módulos científicos e de engenharia utilizados para construção de modelos fidedignos à realidade. Os módulos expandem as funcionalidades da plataforma central e são agrupados em seções, sendo eletromagnetismo a de interesse neste trabalho. Semelhantemente ao Anaconda, os resultados do campo e os gráficos são plotados na mesma base.

O modelo físico utilizado neste trabalho foi construído utilizando o módulo RF (eletromagnético/radio frequência) e descreve a solução analítica (Ward & Hohmann, 1987) para o campo eletromagnético em um modelo geológico canônico 3D.

Resultados

Os levantamentos reais com o método VME são realizados em uma área de controle, que sabidamente não possuem reservatório ou anomalias resistivas e os demais perfis sobre as áreas de interesse. Desta forma os resultados são exibidos em forma de gráficos comparativos entre as curvas obtidas nas regiões com e nas sem os hidrocarbonetos.

Analogamente aos prospectos reais, as simulações numéricas tomaram como comparação o contraste da

presença com a ausência de hidrocarbonetos. O modelo geológico canônico (Constable & Weiss, 2007) utilizado é constituído por camadas com profundidades e resistividades diferentes, conforme a Figura 2.

layer	depth (m)	resistivity (Ωm)
air	$-\infty - 0$	2.0e14
sea	0 - 1000	0.33
overburden	1000 - 2000	1.0
HC	2000 - 2100	100.0
underburden	2100 - ∞	1.0

Figura 2 – Modelo canônico

A modelagem 1D realizada no Anaconda/empymod solucionou as equações do campo elétrico (E_z) no domínio da frequência e após transformada de Fourier foram plotados, considerando o modelo canônico com e sem o reservatório. Para validação do código foi recriada a resposta obtida por (Helwing *et al.*, 2013) que utilizou códigos de modelagem desenvolvidos pela empresa criadora do método VME (Figura 4). O transmissor é um bipolo do tamanho da lâmina d'água (reduzido 50 m) e o receptor é pontual, localizado a 500 m na direção x do Tx.

Como primeiro resultado para atingir o objetivo de criar um modelo 3D no COMSOL no modo transiente foi implementada primeiro no Anaconda, uma solução analítica 1D. Essa solução para o campo no domínio do tempo para um dipolo elétrico na direção x, após um pulso de corrente ligado em um semi-espaço homogêneo (Figura 3) foi comparada com a dada por Ward & Hohmann (*op cit*) (Figura 5).

layer	depth (m)	condutivity (S/m)
half space	$-\infty : \infty$	1

Figura 3 – Semi-espaço homogêneo

Com a validação das equações construídas no Anaconda, as mesmas foram incorporadas no COMSOL (Figura 6). O transmissor é um segmento de linha do tamanho da lâmina d'água (reduzido 50 m) e o receptor é pontual, localizado a 500 m na direção x do Tx. A resposta obtida no COMSOL (Figura 7) foi satisfatória para o *switch-on* (fonte ligada durante a leitura).

O modelo canônico, agora em 3D, foi implementado no COMSOL, manteve as mesmas configurações de fonte-receptor (Figura 8) e utilizou uma malha com refinamento no centro (Figura 9). A resposta para o *switch-on* pode ser observada na Figura 10.

Conclusões

O método VME se mostrou bastante competente em identificar as anomalias resistivas oriundas dos reservatórios de hidrocarbonetos. Essa eficiência pode ser observada nos resultados divulgados nas referências e pelas modelagens aqui apresentadas.

As modelagens numéricas forneceram bons resultados para o modelo proposto. O Anaconda tem se mostrado uma ferramenta bastante eficaz na análise do comportamento de campos eletromagnéticos em diferentes situações e modos de aquisição.

Devido ao VME ser um método transiente, dificuldades na sua modelagem eram esperadas. A maior delas foi o cálculo do campo elétrico no domínio do tempo no

COMSOL, em que a resposta para o *switch-off* (fonte desligada durante a leitura) ainda está em fase de implementação. A resposta da modelagem no COMSOL para *switch-on* se mostrou bastante satisfatória. Novas modelagens serão desenvolvidas e se espera avançar na construção de um modelo 3D fidedigno aos dados reais.

Agradecimentos

- Programa de Pós-Graduação em Geofísica - CPGf/IG, Universidade Federal do Pará.
- Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES.
- Petrobras (recurso para aquisição da licença COMSOL).

Figuras

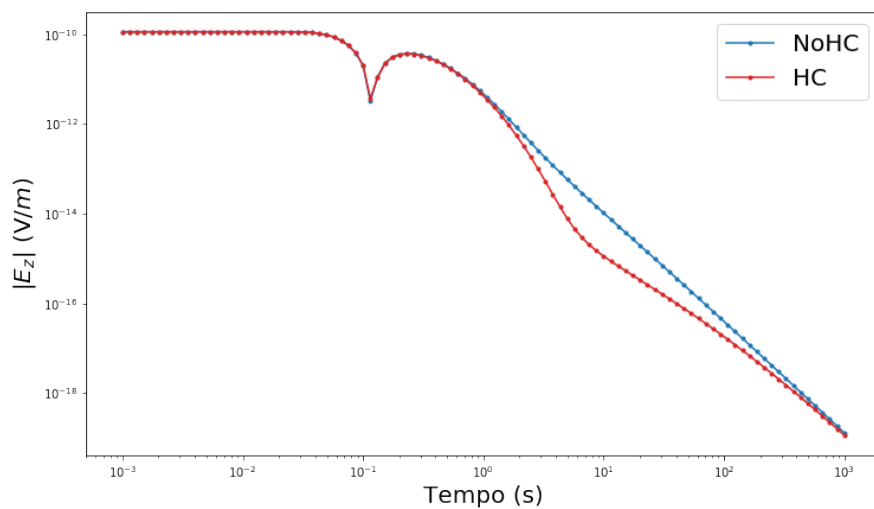


Figura 4 – Resposta VME para modelo canônico com e sem reservatório publicado em Holten et al. (2009a) e recriada no Anaconda.

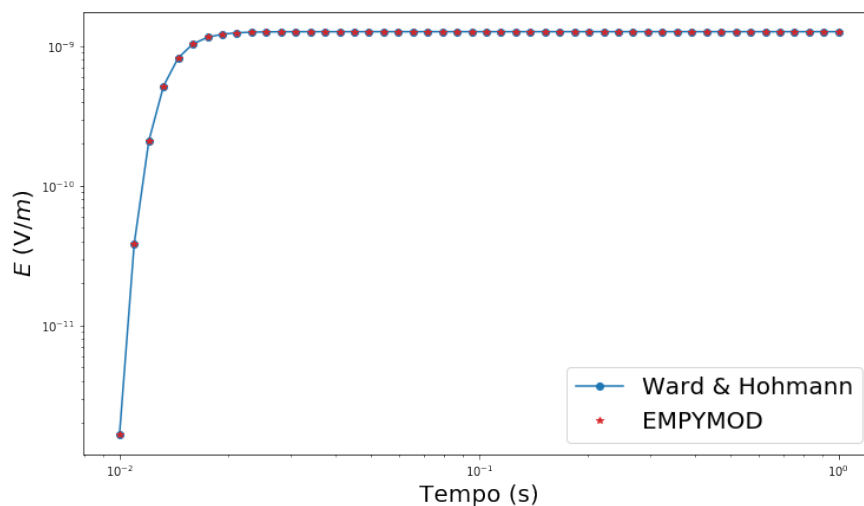


Figura 5 – Comparação da resposta analítica do campo elétrico para um dipolo elétrico calculado para um semi-espaço homogêneo 1D no EMPYMOD/Anaconda e em Ward & Hohmann (1987)

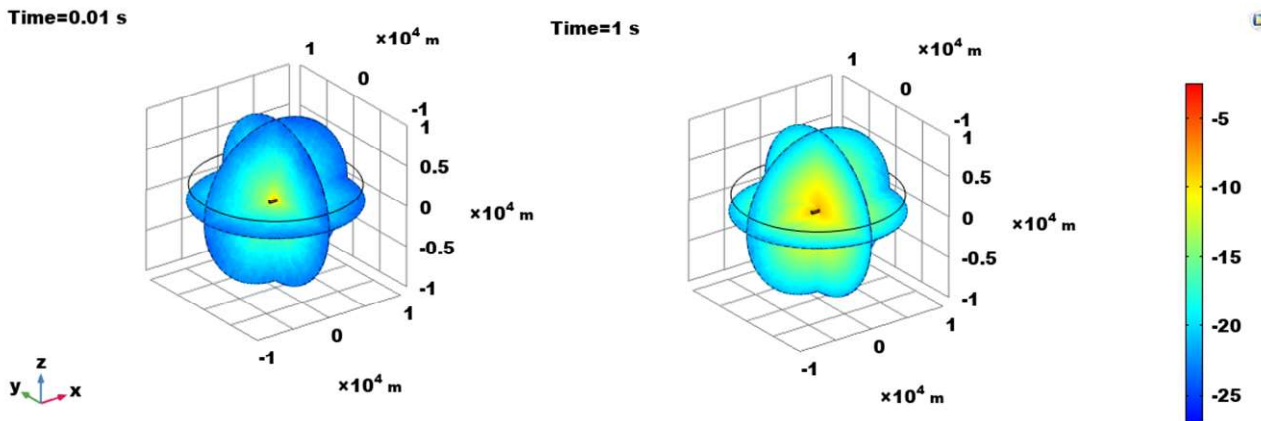


Figura 6 – Modelo 1D COMSOL – Slices da propagação do campo para os tempos 0,01 s e 1 s

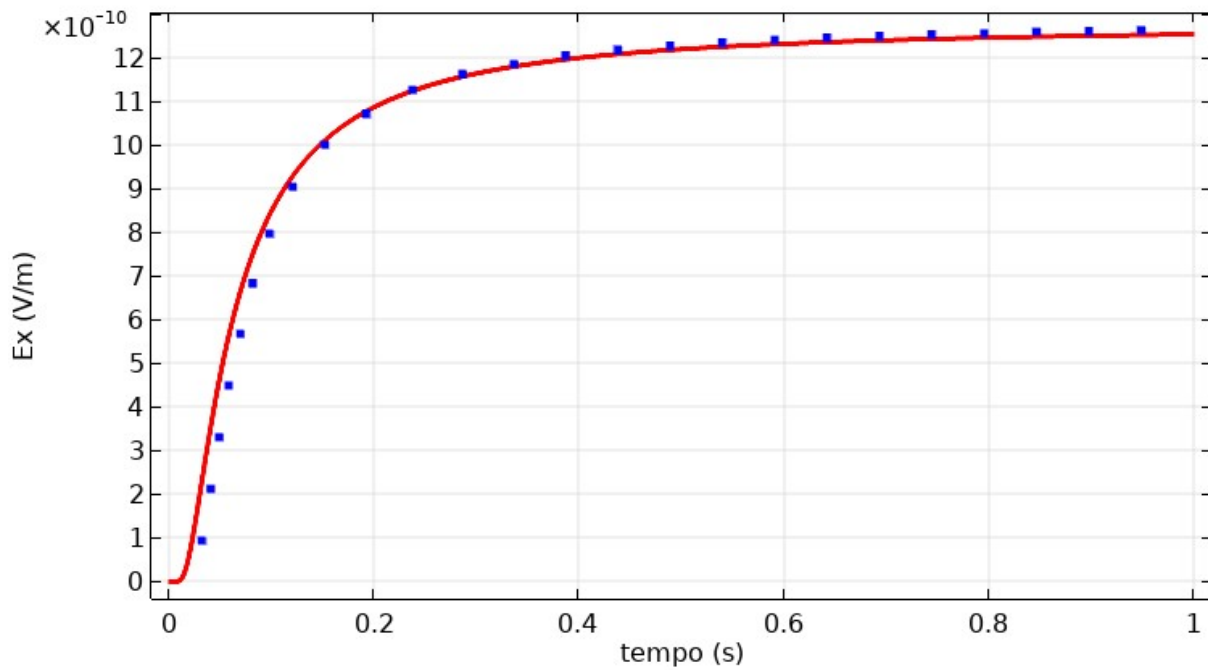


Figura 7 – Modelo COMSOL - Comparação da resposta analítica do campo elétrico em um semi-espço homogêneo para um dipolo elétrico no COMSOL (linha cheia vermelha) e em Ward & Hohmann (1987) (linha pontilhada azul)

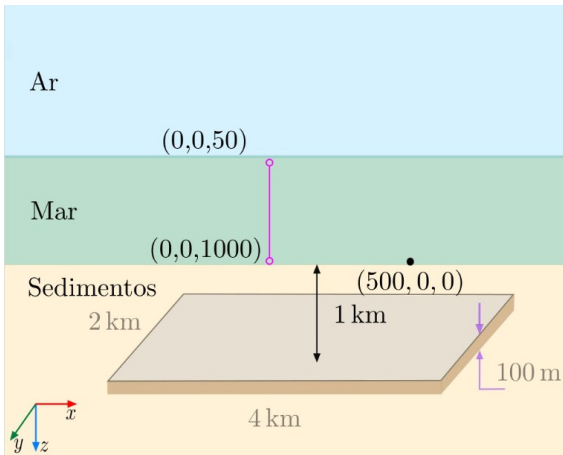


Figura 8 – Modelo canônico 3D utilizado no COMSOL

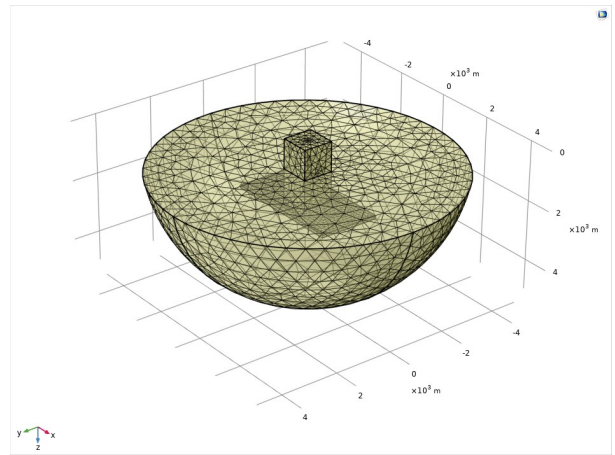


Figura 9 – Malha usada no modelo canônico 3D no COMSOL (representação em semi-esfera somente para melhor visualização)

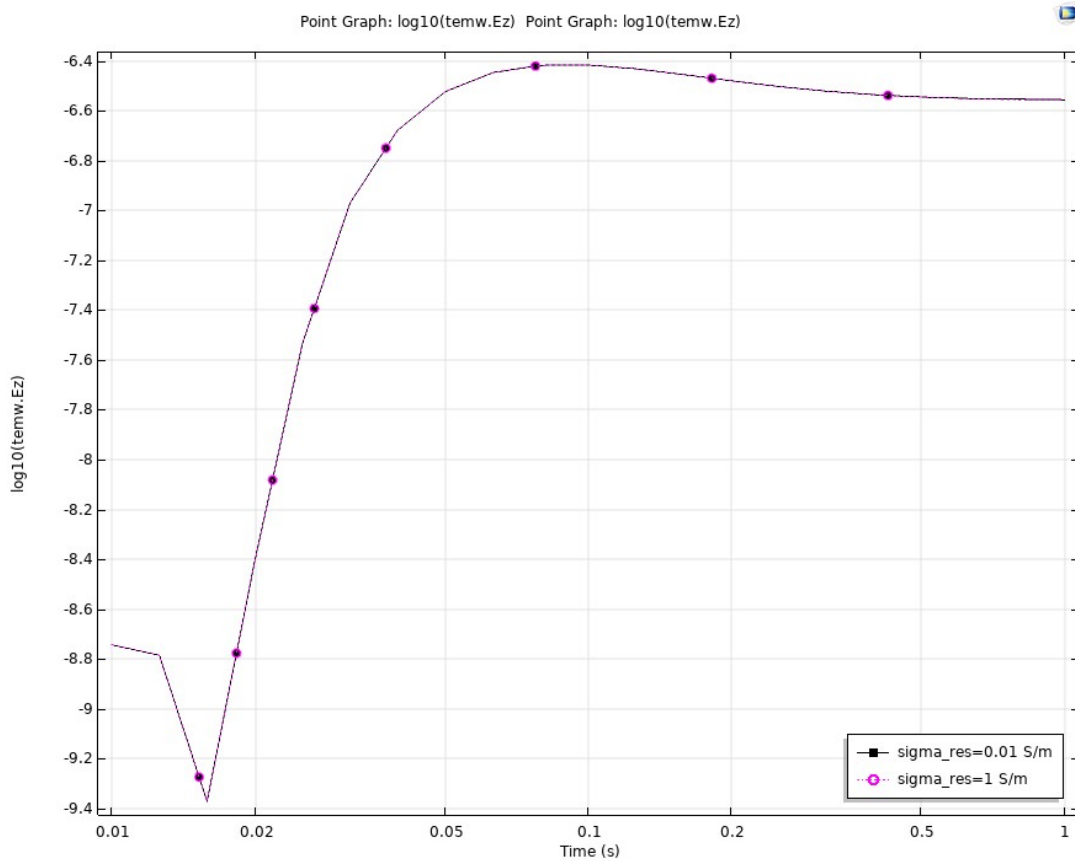


Figura 10 –Resposta do campo elétrico para o modelo 3D com switch-on

Referências

- ANACONDA SOFTWARE DISTRIBUTION. Computer software. Vers. 2-2.4.0. Anaconda, Inc., Nov. 2017. Web. <<https://www.anaconda.com>>
- BARSUKOV, P.; FAINBERG, E. B.; SINGER, B. A Method for hydrocarbon reservoir mapping and apparatus for use when performing the method. WO 2007/053025 in PCT/NO2006/000372. 40 p. 2007.
- BARSUKOV, P.; FAINBERG, E. B.; SINGER, B. A Method for mapping hydrocarbon reservoirs in shallow waters and also apparatus for use practising the method. WO 2008/066389 in PCT/NO2007/000416. 36 p. 2008.
- BORVEN, J.; FLEKKOY, E. New EM technology uses vertical rather than horizontal electrical lines. Special Focus – Exploration Report. World Oil. 2009.
- COMSOL Multiphysics® v. 5.4. COMSOL AB, Stockholm, Sweden. 2018. <www.comsol.com>
- CONSTABLE, S.; WEISS, C.J. Mapping thin resistors and hydrocarbons with marine EM methods: Insights from 1D modeling. *Geophysics*, 71, G43-G51, 2007.
- FLEKKOY, E.; MALOY, K.; HOLTEN, T. Electromagnetic surveying can be done using both horizontal and vertical transmitters/receivers. To understand the physics it pays off to use an analogy with heat waves. *Geo Expro*. 2009.
- FRAFJORK, O.; HOLTEN, T.; KAFFAS, A.; BORVEN, J.; HELWING, S. Minimizing the noise contribution in vertical electric field measurements. 76 th EAGE Conference & Exhibition, Amsterdam, The Netherlands, 2014.
- GLOUX, B.; HOLTEN, T. TEMP-VEL, a different EM offshore exploration approach/technology. Case example from the Norwegian sea. NGF Abstract and Proceeding, n 3, 5 – 7 p. 2009.
- HELWIG, S.; KAFFAS, A.; HOLTEN, T.; FRAFJORD, O.; EIDE, KJETIL. Vertical dipole CSEM: technology advances and results from the Snohvit field. *First Break*, V. 31, 63 – 68 p. 2013.
- HOLTEN, T.; VEIBER, D.; FLEKKOY, E. G. Vertical Electric Time-Domain Responses from a Vertical Current Source for Offshore Hydrocarbon Exploration. 71 st EAGE Conference & Exhibition, Amsterdam, The Netherlands, 2009a.
- HOLTEN, T. FLEKKOY, E.; SINGER, B.; BLIXT, E.; HANSSEN, A.; MALOY, K. Vertical source, vertical receiver, electromagnetic technique for offshore hydrocarbon exploration. *First Break*, V. 27. 2009b.
- KJERSTAD, J. Device for a vertical electromagnetic field component receiver. WO 2010/041959 in PCT/NO2009/000352. 22 p. 2010.
- SAISON, S. *Electromagnetic Seabed Logging: A new tool for geoscientists*. Springer, 536 p. 2017.
- WARD S.H. HOHMANN G.W. *Electromagnetic Theory for Geophysical Applications*. In Nabighian, M. N. (Ed.) *Electromagnetic Methods in Applied Geophysics—* Theory. SEG Investigations in Geophysics No. 3 vol. 1, pp. 130–311. 1987.
- WERTHMÜLLER, D. An open-source full 3D electromagnetic modeler for 1D VTI media in Python: empymod. *Geophysics*, 82(6), WB9-WB19. 2017.