

“MÉTODO IMPLEMENTADO POR COMPUTADOR PARA DETERMINAR ANISOTROPIA ELÉTRICA VERTICAL DA TERRA”

Este pedido reivindica o benefício do Pedido de Patente Provisório U.S. Número 60/688.841 depositado em 9 de junho de 2005.

5 **CAMPO DA INVENÇÃO**

Esta invenção refere-se geralmente ao campo de levantamentos eletromagnéticos por fonte controlada em ambientes fora da costa, em que um transmissor eletromagnético controlado é rebocado acima ou posicionado entre receptores eletromagnéticos sobre o fundo do mar, para
10 as finalidades de exploração de hidrocarboneto, desenvolvimento, e/ou produção. Especificamente, a invenção é um método para determinar a diferença entre a resistividade da terra em um dado local, quando medida usando um fluxo de corrente horizontal em comparação com aquela medida com uma corrente vertical.

15 **FUNDAMENTOS DA INVENÇÃO**

Resultados de levantamentos eletromagnéticos por fonte controlada fora da costa ("CSEM"), tais como aqueles coletados usando os métodos revelados na Patente US n.º 6.603.313 de Srnka e Publicação de Patente US n.º 2003/0050759, publicada em 13 de março de 2003 (Srnka, et
20 al.), mostraram que a resistividade na terra pode ser fortemente dependente da direção do fluxo de corrente elétrica usado para fazer estas medições. Em particular, a resistividade elétrica vertical pode ser muito (duas ou mais vezes) maior que a resistividade elétrica horizontal, especialmente em rochas finamente estratificadas, tais como xistos, e pode variar em magnitude de
25 local para local. Este fenômeno é chamado anisotropia elétrica, ou especificamente isotropia transversal vertical elétrica ("EVTI") por profissionais na técnica. A resistividade elétrica da terra pode também variar azimutalmente (isto é, nas direções de compasso), mas este efeito anisotrópico parece ser geralmente muito menos importante (i.é, de muito menor

magnitude) que EVTI em bacias sedimentares de interesse para exploração de hidrocarboneto.

A presença de EVTI distorce os sinais recebidos em receptores eletromagnéticos no fundo do mar usados em levantamentos marítimos CSEM, obtidos com uma fonte controlada por dipolo elétrico horizontal ("HED") ou um dipolo magnético horizontal ("HMD"), em relação com aqueles que seriam recebidos na ausência de EVTI. Esta distorção afeta a interpretação de anormalidades de resistividade em CSEM marítimos, associadas com a presença de hidrocarbonetos armazenados. Tais efeitos de distorção aparecem tanto na amplitude e fases de campos de fundo do mar medidos, e se alteram com frequência. Estas distorções podem mascarar a presença de hidrocarbonetos (negativos falsos) ou incorretamente sugerem sua presença (positivos falsos). Distorções deste tipo foram observadas em inúmeros levantamentos CSEM.

Levantamentos CSEM marítimos para aplicações de hidrocarboneto foram obtidos usando fontes controladas por HED por causa de suas vantagens operacionais e superior acoplamento de energia dentro da terra. (Chave, et al., "Electrical Exploration Methods for the Seafloor"), *Electromagnetic Methods in Applied Geophysics* 2, 931- 966, Soc. Expl. Geophysics, Tulsa (1991)). Fontes de HED produzem tanto correntes verticais quanto horizontais na terra. fontes de HMD também produzem tanto correntes elétricas verticais quanto horizontais, mas to date não foram usadas para aplicações de hidrocarboneto fora da costa por causa de sua baixa energia e outras restrições operacionais. O método de dipolo elétrico vertical ("VED") (Edwards, et al., *J. Geophys. Res.* **86B**, 11609-11615 (1981)) produz principalmente correntes verticais na terra, mas com muito menor eficiência (acoplamento deficiente) que fontes de HED. A fonte de dipolo magnético vertical ("VMD") produz essencialmente somente correntes de terra horizontais, e to date não foi também usado em levantamentos CSEM

marítimos devido às desvantagens operacionais. A medição de componentes de campo elétrico do fundo do mar tanto on-line quanto off-line (“transversal”) horizontal in-line (E_x) e linha cruzada (E_y), que medem respostas da terra a partir de uma fonte de HED, é conhecida na técnica de levantamentos CSEM marítimos para estudos estruturais.

É bem conhecido por profissionais da técnica que a resistividade elétrica da terra pode ser anisotrópica. Ver, por exemplo, Keller e Frischnecht, *Electrical Methods in Geophysical Prospecting*, 33-39, Pergamon (1966); Kaufmann e Keller, *Frequency e Transient Soundings*, 257-284, Elsevier, N.Y.(1983); Negi, et al., *Anisotropy in Geoelectromagnetism*, Elsevier, N.Y. (1989); Zhdanov e Keller, *The Geoelectrical Methods in Geophysical Exploration*, 119-124, Elsevier, N. Y. (1994). Vários autores ensinam como calcular (modelo) as respostas elétricas da terra anisotrópicas para várias fontes controladas. Ver, por exemplo, Chlamtac e Abramovici, *Geophysics* **46**, 904-915 (1981); Yin e Weidelt, *Geophysics* **64**, 426- 434 (1999); Yin e Maurer, *Geophysics* **66**, 1405 -1416 (2001). Também, vários autores discutem a interpretação de anisotropia elétrica azimutal (por exemplo, Watson e Barker, *Geophysics* **64**, 739-745 (1999); e Linde e Peterson, *Geophysics* **69**, 909-916 (2004)). Outros discutem a interpretação de EVTI (Jupp e Vozoff, *Geophys. Prospecting* **25**, 460-470 (1977); Edwards et al., *Geophysics* **49**, 566-576 (1984); e Christensen, *Geophys. Prospecting* **48**, 1-9 (2000)) usando uma variedade de fontes controladas. Tompkins et al., (“Effect of Vertical Anisotropy on Marine Active Source Electromagnetic Data and Inversions”, EAGE 65th Annual Convention, Paris, França, abstract E025 (2004)) descrevem vários efeitos de EVTI em dados CSEM marítimo coletados para aplicações de hidrocarboneto, usando somente medições de campo elétrico (fundo do mar).

Jupp e Vozoff (citação acima) descrevem o uso de dados CSEM na costa e magnetotelúricos (MT) para estimar EVTI. Eles usaram

dado de HED de fonte controlada de frequência zero (CC), medidos somente na linha de fonte, e não discutiram o caso de aplicações fora da costa em ou próxima ao fundo do mar onde as respostas eletromagnéticas são muito diferentes de na costa. Dados de resistividade de fonte controlada de CC são valores de campo elétrico estático em linha, medidos a várias distâncias da fonte de HED aterrada ao longo da linha de fonte, e são sensíveis tanto a resistividades verticais quanto horizontais, como discutido em outras referências citadas aqui. Jupp e Vozoff mostram, usando dados sintéticos, que a EVTI pode ser determinada a partir de dados que são sensíveis somente à resistividade horizontal combinada com os dados de HED de CC. dados de MT têm esta sensibilidade somente à resistividade horizontal, o que foi bem conhecido na técnica. Jupp e Vozoff descrevem um algoritmo de inversão monodimensional que usa o HED de CC e dados de MT para solucionar com sucesso a EVTI.

Os esforços publicados para quantitativamente determinar a extensão dos efeitos de EVTI (tal como Chlamtec) tentam realizar isto usando dados de CSEM convencionais, que são medições do fundo do mar de componentes de campo elétrico, usualmente componentes horizontais. Nenhum deles propõe técnicas de obtenção de dado particular, tal como o uso de certas combinações de fontes e receptores e a medição de outros componentes de campo eletromagnético, tais como H_z , em conjunção com subseqüentes etapas de processamento de dados para determinar EVTI. Nenhuma das publicações acima mencionadas revela o uso de medições de campo magnético vertical (H_z) em combinação com medições de campo elétrico, a fim de determinar a EVTI. Todavia, o uso de medições de campo magnético vertical (H_z) em combinação com medições de campo elétrico, a fim de determinar a EVTI. Todavia, o uso de dados de H_z para prospecção eletromagnética em terra é bem conhecido, por exemplo usando o valor de Tipper em magnetotelúrica para detectar estrutura 3D (Kaufman e Keller, *The*

Magnetotelluric Method, 483-484, Elsevier (1981)), ou usando dados H_z coletados no centro de uma fonte de dipolo magnético vertical (VMD) o método de indução de enlace central para sondagem de profundidade de resistividade (Zhdanov e Keller, *The Geoelectrical Methods in Geophysical Exploration*, 396-411, Elsevier (1994)).

Em lugar disto, a literatura publicada tende a sugerir que a resposta na costa útil de H_z pode ser substituída por respostas E_z fora da costa na presença de águas profundas (Berdichevsky, et al., *Marine Deep Geoelectrics* (na Rússia), Nauka, Moscou (1989); Golubev e Zhdanov, Consortium for Electromagnetic Modeling and Inversion Annual Report, 175-217, U. Utah (1998)). Embora Cheesman et al. (*Geophysics* **52**, 204-217 (1987)) mostrem valores calculados de H_z off-line para uma fonte de fundo de mar de HED, eles não revelam seu uso em combinação com sinais E_x , E_y , ou E_z de fundo de mar on-line.

15 **SUMÁRIO DA INVENÇÃO**

Em uma forma de concretização, a invenção é um método implementado por computador para determinar anisotropia elétrica vertical da terra a partir de um levantamento eletromagnético de uma região subsuperficial disposta abaixo do fundo da água em um ambiente fora da costa, dito levantamento usando uma fonte eletromagnética e uma pluralidade de receptores eletromagnéticos, dito método compreendendo: (a) obter dados de campo eletromagnético em uma pluralidade de locais de receptor on-line e off-line a partir dos resultados do levantamento, ditos dados compreendendo um componente de campo sensível somente a resistividade vertical e um componente de campo sensível somente a resistividade horizontal, em que "on-line" e "off-line" são definidos com respeito a uma linha de levantamento ("linha de fonte") de posições de fonte eletromagnética (etapa 71 da a figura 7); (b) solucionar equações de campo eletromagnético de Maxwell para resistividade horizontal e resistividade vertical em uma posição (x, y, z) na

região subsuperficial, usando parâmetros de obtenção de levantamento e os dados de campo eletromagnético medidos (etapa 72); e (c) obter uma medida de anisotropia elétrica vertical no local (x, y, z) a partir das resistividades horizontal e vertical calculadas (etapa 73).

5 BREVE DESCRIÇÃO DOS DESENHOS

A presente invenção e suas vantagens serão melhor compreendidas por meio da referência à seguinte descrição detalhada e dos desenhos anexos nos quais:

10 a figura 1 ilustra uma geometria de levantamento para uma forma de concretização da presente invenção;

a figura 2 ilustra a geometria de levantamento e modelo de resistividade usado para gerar respostas de EVTI de exemplo;

15 a figura 3A mostra amplitude E_x on-line e a figura 3B mostra Fase E_x para uma fonte de HED e para valores variáveis de EVTI, com e sem uma camada resistiva no modelo da figura 2;

a figura 4A mostra Amplitude on-line E_z e a figura 4B mostra Fase E_z para uma fonte de HED e para valores variáveis de EVTI, com e sem uma camada resistiva no modelo;

20 a figura 5A mostra Amplitude off-line H_z e a figura 5B mostra fase H_z para uma fonte de HED e para valores variáveis de EVTI, com e sem uma camada resistiva no modelo;

a figura 6 mostra que H_z off-line (para uma fonte de HED) é sensível a valores alteráveis de P_h mas não a EVTI; e

25 a figura 7 é um fluxograma mostrando etapas básicas no presente método inventivo.

A invenção será descrita em conexão com suas preferidas 5 formas de concretização. Todavia, até a extensão que a seguinte descrição detalhada é específica para uma forma de concretização particular ou uso particular da invenção, ela é destinada a ser apenas ilustrativa, e não deve ser

entendida como limitativa do escopo da invenção. Pelo contrário, pretende cobrir todas alternativas, modificações e equivalentes que podem ser incluídos no espírito e escopo da invenção, como definida pelas reivindicações anexas.

DESCRIÇÃO DETALHADA DA A INVENÇÃO

5 A invenção é um método para determinar o efeito de anisotropia transversal vertical elétrico sobre dados de levantamento eletromagnético marítimo com fonte controlada. A invenção requer dados medidos para pelo menos um componente de campo eletromagnético on-line e pelo menos um componente off-line, a seleção de particulares componentes
10 dependendo do tipo de fonte. A invenção depende do entendimento que certos componentes de campo eletromagnético são sensíveis predominantemente ou quase exclusivamente somente a resistividade vertical ou resistividade horizontal, mas não ambas, em que outros componentes de campo são sensíveis a ambas. Para utilizar estes fatos, a fonte de CSEM precisa produzir
15 tanto correntes verticais quanto horizontais. Dois tipos de fonte de CSEM marítima realizam isto, a HED e a HMD. A invenção prescreve particulares dados de medição de campo eletromagnético requeridos para cada um dois tipos de fonte.

Fonte de HED Para uma fonte de HED, dados são
20 preferivelmente obtidos representando simultâneas medições de: a) o campo magnético vertical (H_z), e ou (ou ambos) o componente (x) in-line horizontal do campo elétrico (E_x), ou componente de linha transversal (y) do campo magnético (H_y), todas respostas medidas em posições *off-line* à linha de fonte eletromagnética; junto com as seguintes respostas medidas em locais *on-line*:
25 b) a correntemente praticada resposta de campo elétrico (E_z) vertical, e qualquer uma (ou ambas) respostas de campo elétrico in-line horizontal (E_x) e de campo magnético de linha cruzada (H_y).

Fonte de HMD Para uma fonte de HMD, dados são preferivelmente obtidos que representam simultânea medição de: a) o campo

magnético vertical *on-line* (H_z), e qualquer uma (ou ambas) das respostas de campo magnético in-line horizontal *on-line* (H_x) e do campo elétrico de linha cruzada horizontal *on-line* (E_y) respostas; junto com: b) a resposta de campo elétrico vertical *off-line* (E_z), e qualquer uma (ou ambas) de resposta de campo magnético in-line horizontal *off-line* (H_x) e de resposta de campo elétrico de linha cruzada horizontal *off-line* (E_y).

Uma combinação dessas duas formas de concretização existe, em que ambas, uma fonte HED e uma fonte de HMD são usadas, quer simultaneamente quer seqüencialmente, e as apropriadas respostas de campo elétrico e magnético do fundo do mar para cada tipo de fonte são medidas, como descrito acima.

Naquelas formas de concretização da invenção que usam uma fonte controlada de HMD, parte do racional para as exigências de obtenção de dado expostas acima é que H_z *on-line* seja sensível somente à resistividade horizontal e E_z *off-line* seja sensível somente à resistividade vertical; em que H_x e E_y *on-line* e *off-line* são, ambos, afetados por EVTI (isto é, por ambas resistividades horizontal e vertical). As respostas de HMD podem ser usadas sozinhas na modelagem iterativa e métodos de inversão descritos abaixo, ou podem ser usadas em conjunção com as respostas de HED.

Similarmente, naquelas formas de concretização usando uma fonte de HED, parte do racional é que os dados de E_z são sensíveis somente à resistividade horizontal e se torna máximo em $x = 0$; enquanto que todos dados *on-line* e *off-line* E_x e H_y contêm respostas de ambas resistividades verticais e horizontais. As respostas de HED podem também ser usadas sozinhas ou In em com respostas de HMD.

Ou técnicas de domínio de freqüência ou de domínio de tempo podem ser usadas para obtenção de dados, processamento, análise e interpretação. A escolha entre técnicas de domínio de tempo e domínio de freqüência é amplamente determinada por considerações operacionais (tais

como a profundidade da água) que são bem entendidas por profissionais da técnica.

5 A fontes, instrumentos de fundo do mar, e sensores elétricos e de campo magnético, requeridos para esta invenção, são também bem conhecidos aos profissionais de levantamentos fora da costa CSEM ou magnetotelúricos.

10 A figura 1 ilustra uma possível geometria de obtenção dados (levantamento) para a presente invenção. Uma embarcação 1 na, ou abaixo da, superfície do mar, reboca uma fonte de HED 2 e/ou uma fonte de HMD 3 próxima ao fundo do mar 4 ao longo da linha de fonte 5, e transmite uma especificada forma de onda de corrente elétrica. Alternativamente, a fonte de HED e/ou HMD podem ser posicionadas em uma maneira estacionária próxima ou em contato com o fundo do mar entre cada par dos receptores eletromagnéticos de fundo do mar on-line individuais 6 ao longo da linha 5, enquanto a transmissão de forma de onda de fonte ocorre. A escolha de usar uma fonte continuamente rebocada e/ou uma fonte estacionária depende de uma variedade de condições de levantamento operacionais, mas principalmente do ambiente de ruído eletromagnético. Tanto os ruídos gerados por fonte quanto ruídos naturais se elevam como quando a profundidade da água diminui, favorecendo o uso de fontes estacionárias em água rasa (tipicamente 150 metros ou menos) de modo que tempos de soma (empilhamento) de dados muito longos podem ser usados, sem persistência lateral de dados, para suprimir ruídos aleatórios. A transmissão de forma de onda de fonte pode consistir de uma variedade de formas de onda de 25 apropriadas durações, tais como aquelas descritas na Publicação de Patente PCT WO2005/117326 de Lu, et al., ou mais geralmente nas duas publicações de patente de Smka, previamente referidas. Os receptores off-line 7 registram a resposta eletromagnética da terra devida à excitação de fonte, simultaneamente com a resposta sendo medida por meio dos receptores on-

line 6. A linha de fonte, receptores on-line, e receptores off-line são colocados sobre o fundo do mar acima e na vizinhança de formações geológicas subsuperficiais 8 dentro da terra, as quais foram identificadas como reservatórios potenciais para hidrocarbonetos ou outros recursos. Os receptores de fundo de mar são posicionados a várias distâncias a partir da fonte HED ou HMD, usando ou espaçamento inter-receptores uniforme ou não uniforme (ou ambos), como determinado a partir da modelação pré-levantamento das antecipadas respostas de fundo do mar ou por meio de restrições operacionais, como será entendido por profissionais da técnica. Tipicamente, os espaçamentos in-line e linha cruzada dos receptores são de 500 a 5000 metros.

Com dados eletromagnéticos adquiridos como descrito acima, a presente invenção permite que o valor de EVTI seja determinado na região abrangida por cada combinação de receptores on-line e off-line do levantamento, usando um ou mais métodos de análise e interpretação de dados. A magnitude, profundidade, e distribuições laterais para qualquer EVTI presente são determinadas a partir de análises de respostas de campo in-line e off-line nas frequências de levantamento disponíveis; a frequência máxima determinando a EVTI na profundidade mais rasa (iniciando no fundo do mar e estendendo-se para baixo aproximadamente por uma profundidade de película EM), e a frequência mínima provendo os efeitos de EVTI integrados a partir das profundidades mais rasas para a profundidade máxima da penetração efetiva (aproximadamente metade do comprimento de onda EM difuso, ou π (pi) vezes a profundidade de película eletromagnética). Esta determinação permite que os efeitos EVTI sejam removidos de, ou sejam levados em conta nos, dados de CSEM de fundo de mar, de modo que a previsão acurada de resistividade de reservatório (isto é, resistividade de uma formação de reservatório visada, oculto) pode ser formada.

As etapas individuais de processamento de dados, aplicadas no

presente método inventivo, dados elétricos e magnéticos in-line e off-line são procedimentos padronizados usados por profissionais de levantamentos de CSEM fora da costa.

Os métodos de análise e interpretação de dados desta invenção incluem, mas não são restritos a, quatro propostas complementares:

(1) Modelagem avançada iterativa de 1D, 2D e 3D em um computador digital usando algoritmos para cálculos isotrópicos da terra, bem conhecido a profissionais da técnica incluindo aqueles referidos aqui, em que os dados atuais (amplitudes e/ou fases) são comparados com as respostas de modelo (amplitudes e/ou fases), e o modelo é subsequentemente ajustado de modo a coincidir com os dados de campo atual com as respostas modeladas. Neste método de interpretação isotrópico, se dados de HED devam ser usados, as respostas on-line são modeladas usando a resistividade elétrica vertical, e as respostas off-line são modeladas usando a resistividade horizontal, e o inverso se dados de HMD devam ser usados. (Ver a Tabela 1 abaixo). Ajustes iterativos para o modelo de resistividade vertical são feitos por meio da comparação com dados medidos para um componente de campo EM que é sensível preferivelmente somente, mas pelo menos predominantemente, a resistividade vertical, e correspondentemente para o modelo de resistividade horizontal. Onde dados off-line são usados, os dados são preferivelmente a partir de receptores exatamente transversal à fonte (isto é, em $x = 0$ na figura 1). A relação entre os resultados de modelo on-line e off-line (resistividade contra profundidade z e local x, y) então provê um valor aproximado de EVTI como uma função de profundidade e posição.

(2) Modelagem avançada iterativa de 1D, 2D e 3D em um computador digital usando algoritmos para cálculos anisotrópicos da terra que incluem EVTI, bem conhecidos a profissionais da técnica incluindo o panfleto previamente referido de Yin e Maurer, em que os dados atuais (amplitudes e/ou fases) são comparados com as respostas de modelo (amplitudes e/ou

fases), e o modelo é subsequentemente ajustado de modo a coincidir com os dados de campo atual com as respostas modeladas. Neste método de interpretação anisotrópico, as respostas on-line e off-line são simultaneamente modeladas usando estimativas de tanto resistividade vertical quanto resistividade horizontal. A solução de modelo final então contém o valor de EVTI (magnitude) como uma função de tanto profundidade quanto posição lateral.

(3) Inversão matemática automatizada de 1D, 2D e/ou 3D (formação de imagens) em um computador digital usando algoritmos de resistividade isotrópica bem conhecidos a profissionais da técnica (ver, por exemplo, Newman et al., *Three Dimensional Electromagnetics* (Oristaglio e Spies, eds.) Soc. Expl. Geophysicists, Tulsa, 299-321 (1999)). Em uma forma de concretização deste método de inversão isotrópico, E_x on-line e E_z on-line para uma fonte de HED (ou H_x on-line e H_y off-line para uma fonte de HMD), e o H_z off-line para uma fonte de HED (ou H_z on-line para uma fonte de HMD), são alimentados separadamente no programa de inversão que então usa algoritmo de otimização numérico para separadamente solucionar a magnitude, profundidade, e distribuição lateral de resistividades horizontais e verticais cujas respostas eletromagnéticas melhor se ajustam aos dados observados do fundo do mar data. A EVTI é então encontrada por meio de subsequentemente formar a relação entre a resistividade invertida vertical e a horizontal em cada profundidade e local. Tal como com modelagem avançada isotrópica, uma significação é que uma solução de inversão usa dados de campo eletromagnético que são mais sensíveis à resistividade vertical, enquanto que a outra solução de inversão usa dados que são mais sensíveis à resistividade horizontal.

(4) Programas de inversão matemática automatizados (formação de imagens) em um computador digital usando algoritmos de resistividade ID anisotrópica (ver, por exemplo, o previamente referenciado

panfleto de Tompkins, et al.), e algoritmos de domínio de frequência e de diferença finita de domínio de tempo, de 2D e de 3D, previamente desenvolvidos por profissionais da técnica (ver, por exemplo, Weiss, et al., *Geophysics* 67, 1104-1114 (2002); e Weiss, et al., *Geophysics* 68, 922-930 (2003)). Neste método de inversão anisotrópica, as respostas on-line e off-line são alimentadas juntamente no programa de inversão que então usa algoritmo de otimização numérico para solucionar a quantidade, profundidade, e distribuição lateral de resistividades horizontais e verticais cujas respostas eletromagnéticas melhor se ajustam aos dados do fundo do mar.

Esta proposta anisotrópica requer duas rodagens de computador separadas ou do programa de modelagem avançada iterativa ou do programa de inversão. Uma rodagem envolve dados para pelo menos um componente de campo eletromagnético sensível apenas preferivelmente, mas pelo menos predominantemente, a resistividade horizontal, e a saída é um volume de dados de resistividade horizontal. A outra rodagem envolve dados para pelo menos um componente de campo sensível de EM, preferivelmente somente, mas pelo menos predominantemente, para resistividade vertical, e a saída é um volume de dados de resistividade vertical. As propostas anisotrópicas alimentam todos dados em uma única rodagem. Os dados podem ser para componentes de campo que são sensíveis tanto a resistividade vertical quanto a resistividade horizontal; todavia, o método funciona melhor se os dados incluírem um componente sensível somente a resistividade vertical e um outro sensível somente a resistividade horizontal. Deste modo, um preferido conjunto de dados eletromagnéticos para uma proposta será um conjunto preferido para todas as propostas (para um dado tipo de fonte). A Tabela 1 lista sensibilidade para resistividade vertical ρ_V e para resistividade horizontal ρ_H , ou ambas, para ambos tipos de fonte de HED e HMD, e para local de receptor on-line e off-line. (Dados off-line preferidos são a partir de locais transversais à fonte.) As entradas na Tabela 1 de máximo interesse para

a presente invenção são aqueles para as quais os dados dependem pelo menos predominantemente ou de ρ_v ou ρ_H . Pode ser visto da Tabela 1 e da precedente descrição do método que todas as formas de concretização preferidas da invenção requerem medição on-line de pelo menos um componente de campo EM e de medição off-line de pelo menos um componente de campo EM. dados adicionais provêm os esperados benefícios de redundância de dados. Na Tabela 1, sensibilidade rotulada "somente" a ρ_v ou ρ_H assume um modelo de terra em camadas planas, e tem que ser reconhecido que em situações atuais, tal sensibilidade não será bastante pura assim. Tem também que ser reconhecido que a Tabela 1 se aplica a ambientes fora da costa. A Tabela 1 seria consideravelmente alterada para aplicações sobre a costa.

Tabela 1

Dados de CSEM marítimos - Respostas de EVTI			
Fonte	Local de receptor	Dados	Sensibilidade de Resistividade ρ_v/ρ_h
HED	On-line	E_x	ambos (predominantemente ρ_v)
"	"	H_y	ambos (predominantemente ρ_v)
"	"	E_z	somente ρ_v
"	"	E_y, H_x, H_z	são teoricamente = 0
HED	Off-line	E_x	ambos (predominantemente ρ_h)
"	"	H_y	ambos (predominantemente ρ_h)
"	"	E_z	somente ρ_h
"	"	E_y, H_x, H_z	ambos (misturados ρ_v e ρ_h)
HMD	On-line	E_y	ambos (predominantemente ρ_h)
		H_z	ambos (predominantemente ρ_h)
		H_z	somente ρ_h
		E_x, H_z, H_y	são teoricamente = 0
HMD	Off-line	E_y	ambos (predominantemente ρ_v)
"		H_x	ambos (predominantemente ρ_v)
"		H_z	somente ρ_v
"		E_x, H_y, H_z	ambos (misturados ρ_v e ρ_h)

O profissional especializado reconhecerá facilmente que todas as propostas acima, quer isotrópicas quer anisotrópicas, modelagem avançada ou inversão, envolvem a solução de equações de campo eletromagnético de Maxwell por meio de métodos numéricos assistidos por computador. com os

parâmetros de obtenção de fonte, todos conhecidos, juntamente com as resistividades de fundo (água salgada, etc.), e dados medidos para pelo menos dos componentes de campo EM, somente a desconhecida é a resistividade-alvo e ela pode ser solucionada.

5 A proposta de modelação avançada iterativa será tipicamente implementada por computador, mas tipicamente requer guia manual. O interpretador de dados tipicamente alimenta parâmetros de resistividade conhecidos ou estimados em um modelo de profundidade de partida. Um tal modelo poderia incluir, dentre outros parâmetros, a profundidade da água do
10 mar, resistividade de água e seu gradiente vertical, e um primeiro suposição na resistividade da terra com base em conhecimento anterior (por exemplo, perfilações de poço a partir de uma área similar), dados associados (por exemplo, velocidades sísmicas convertidas em resistividade através de uma relação estatística), e experiência geral na tecnologia. Com freqüência, um
15 valor de resistividade de fundo uniforme é escolhido. O efeito principal do modelo de resistividade inicial é acelerar ou retardar a convergência. O modelo é então rodado em um computador usando um algoritmo que soluciona equações de Maxwell para os valores de entrada escolhidos e, como um resultado, dados sintéticos são obtidos para a configuração de
20 levantamento correspondendo aos dados reais. O interpretador então compara os dados sintéticos e reais em vários locais, e com base em conhecimento disponível da resposta esperada, e modifica a resistividade no modelo de modo a levar os dados sintéticos para mais próximo dos dados reais. O processo é tipicamente repetido um número de vezes até que os critérios
25 colocados pelo interpretador sejam satisfeitos, isto é, os dados sintéticos do modelo de resistividade-profundidade final correspondem aos dados reais dentro de algum limite aceito. Se o processo não é convergente, isto tipicamente significa que a geologia é complexa, requerendo mais freqüências, distâncias de fonte-para-receptor, e os componentes E ou H

precisam ser examinados, ou que os dados medidos estão de certa forma corrompidos.

5 Nas propostas de inversão, o interpretador de dados forma um modelo de profundidade de resistividade de partida, usando valores conhecidos (água do mar, ar, etc.) e uma suposição de partida para a resistividade da terra freqüentemente tomada como uniforme e representativa da área como determinada por meio de experiência, valores mais próximos, como descrito acima para propostas de modelação avançada. Os dados reais são então alimentados em um algoritmo de computador juntamente com o

10 modelo de resistividade de partida, e o algoritmo gera dados sintéticos por meio da solução de equações de Maxwell, o que é tipicamente feito por meio de esquemas iterativos numéricos, bem conhecidos na técnica. Em formas de concretização preferidas da invenção, o algoritmo usa técnicas matemáticas, tais como gradientes derivados nas diferenças entre dados reais e sintéticos,

15 para encontrar alterações no modelo que resultarão na minimização do desajuste entre os dados reais e sintéticos na próxima iteração do processo. O algoritmo de computador é capaz de manusear muito mais complexidade nos dados e modelo que um intérprete humano, e é permitido continuar a operar seus processos iterativos internos até que o desajuste entre dados reais e

20 sintéticos atinja algum pequeno valor previamente ajustado. Neste ponto, a resposta matemática é dita que convergiu para uma solução ótima, a qual corresponde a um modelo final de resistividade-profundidade que melhor representa a estrutura real de resistividade da terra incluindo quaisquer hidrocarbonetos que estão presentes.

25 Um usuário da presente invenção poderia, por exemplo, selecionar uma forma de concretização em que tanto a modelação iterativa quanto a inversão no domínio de freqüência, como descritas aqui, são usadas, mas limitadas a programas e algoritmos de computador anisotrópicos, para prover verificação cruzada dos resultados de EVTI e também melhor

incorporar o conhecimento geológico do interpretador. Os dados selecionados poderiam, por exemplo, ter sido obtidos usando uma fonte controlada por HED, a qual é ou rebocada próximo ao fundo do mar (preferivelmente entre 25 e 50 metros) ou é colocada em posições estacionárias sobre o fundo do mar entre pares consecutivos de receptores de fundo de mar ao longo da linha de fonte. Em um tal caso, somente respostas de campo elétrica on-line E_x e E_z são necessárias, medidas simultaneamente com apenas as respostas Hz off-line, em uma variedade de faixas on-line e off-line, tipicamente de zero (0) a 12.000 metros on-line e de um (1) a 8.000 metros off-line para uma intensidade de HED (momento de dipolo) de 300.000 Ampère-metros. Os profissionais da técnica compreenderão que a escolha de faixas on-line e linha transversal (off-line), isto é, distâncias de fonte-para-receptor, para estas medidas de resposta, depende da intensidade de fonte e das frequências usadas no levantamento, que, por sua vez, dependem das esperadas resistividades horizontais e verticais da terra e da profundidade do(s) alvo(s) de interesse.

Uma alternativa às opções da Tabela 1 para uma medição de componente de campo sensível somente a resistividade horizontal existe na forma de medições eletromagnéticas de fonte passiva. A medição de resposta eletromagnética na ausência de uma fonte operada por indivíduo humano é uma técnica conhecida chamada de levantamento magnetotelúrico (“MT”). A literatura publicada revela como medir a resistividade da terra abaixo do fundo do mar usando o método de propriedades magnetotelúricas marinhas de fonte passiva (“MMT”) (Constable et al., *Geophysics* **63**, 816-825 (1998); Hoversten et al., *Geophysics* **65**, 1476-1488 (2000)). A fonte de energia para a magnetotelúrica são as flutuações naturais no campo magnético de ambiente da Terra, devidas principalmente às flucções ionosféricas e iluminação. As medições de MMT são tipicamente confinadas a campos elétricos e magnéticos horizontais (E_x , E_y , H_x , H_y), embora dados de campo elétrico

vertical (E_z) sejam algumas vezes úteis para estimar variações laterais em estruturas (Zhdanov e Wan, "Three-dimensional marine magnetotellurics for petroleum exploration", *SEG 2003 Annual Meeting Expanded Abstracts*, 537-540 (2003)). Análises destes dados fornecem informação quase que inteiramente limitada para a resistividade horizontal.

Exemplos

Em lugar dos dados de CSEM atuais do tipo e combinação requeridos nesta invenção, cálculos numéricos que empregam métodos ID bem conhecidos aos profissionais da técnica são usados aqui para demonstrar as respostas de EVTI utilizadas por meio da invenção. A figura 2 mostra a geometria de levantamento usada para este cálculo de modelo de dados de resposta de CSEM. O exemplo usa uma profundidade de água do mar de 3000 metros e um reservatório de hidrocarboneto simulado 9, com 50 metros de espessura, enterrado a 1000 metros abaixo do fundo do mar 4. As figuras 3A e 3B mostram as alterações calculadas nas amplitudes de campo de fundo do mar E_x on-line, de fonte-normalizada de HED (isto é, respostas para um dipolo unitário de comprimento de um metro e corrente de um Ampère), em volts/m (figura 3A) e as fases absolutas (figura 3B) causadas por EVTI de magnitudes variáveis (1:1 a 5:1 relação de EVTI de $\rho_v:\rho_h$, onde ρ_v é a resistividade vertical e ρ_h é a resistividade horizontal), correspondendo à geometria de levantamento e parâmetros da terra da figura 2 para uma frequência de fonte senoidal de 0,25 Hertz. A anisotropia é tipicamente encontrada na terra acima e abaixo da camada de hidrocarboneto, e pode estar presente dentro da camada de hidrocarboneto, se, por exemplo, o reservatório for altamente estratificado. Mas, a menos que a camada de hidrocarboneto seja suficientemente espessa para ser resolvida por meio dos dados eletromagnéticos, seu efeito de EVTI não é suficientemente grande para ser importante nos dados de modelo, e, assim, o reservatório pode ser considerado como tendo resistividade isotrópica para essas simulações. O

HED é alinhado na direção x (algumas vezes referida como uma fonte de XED). (Ela é típica na prática de MCSEM para alinhar uma fonte de HED, que é basicamente um fio de metal longo, com a direção em que ela está sendo rebocada, esta sendo a orientação que naturalmente tenderá a assumir quando rebocada por um cabo conectado em uma extremidade). A resistividade horizontal ρ_h é ajustada em 1,0 ohm-m para este cálculo (exceto para alguns casos mostrados na figura 6 – ver abaixo. O eixo horizontal é a distância x ao longo da linha de fonte, medida em termos da distância da fonte móvel a partir de um receptor on-line particular, isto é, um dos receptores 6 posicionados ao longo da linha de reboque de fonte 5 (ver a figura 1). Os profissionais da técnica entenderão que outros valores dos parâmetros de entrada poderiam ser usados de forma igualmente boa nesta ilustração. A camada de reservatório 9 é considerada ter resistividade de 100 ohm-m (eletricamente isotrópica, $EVTI = 1$). Seis curvas exibem respostas de receptor de fundo de mar para vários casos do reservatório 9 presente ou não presente, e para valores variáveis de sobrecarga e subcarga de EVTI. Em todas as figuras 3A-B a 4A-B, o segundo dígito no número de referência denota o valor de EVTI e, se a camada de reservatório estiver presente ("WR") no modelo ou não estiver presente ("NR") de acordo com a seguinte significação: 1 denota $EVTI = \rho_Y/\rho_H = 1$, WR; 2 denota $EVTI = 2$, WR; 3 denota $EVTI = 5$, WR; 4 denota $EVTI = 1$, NR; 5 denota $EVTI = 2$, NR; e 6 denota $EVTI = 5$, NR. (Com ρ_h fixo na unidade, a EVTI é numericamente a mesma que ρ_v em ohm-m). Pode ser visto que as o efeito de EVTI aumenta, a presença ou ausência da camada-alvo faz progressivamente menos diferença, o que ilustra a necessidade da presente invenção.

As figuras 4A e 4B mostram os mesmos cálculos para a resposta on-line E_z . Essas figuras (3A-B e 4A-B) mostram que as respostas WR para nenhuma anisotropia ($EVTI = 1$, ou $\rho_v:\rho_h = 1:1$), para um reservatório cheio de hidrocarboneto, isto é, curvas 31 e 41, são envolvidas

por parênteses por meio das respostas NR para a ausência de um reservatório pelos casos $EVTI = 2$ e $EVTI = 5$, isto é, envolvidas por parênteses pelas curvas 35-36 e 45-46, respectivamente. O profissional da técnica facilmente observará das figuras 3 A-B e 4A-B que a análise e a interpretação de respostas E_x e/ou E_z on-line, sozinhas, como indicativas de uma resposta de reservatório de hidrocarboneto enterrado, poderiam facilmente ser indicações positivas falsas que resultam de um valor de $EVTI$ de cerca de 3 a 4 e nenhum reservatório presente.

Em contraste com as mostradas nas figuras 3 A-B e 4A-B, as figuras 5A e 5B mostram a amplitude de fundo do mar off-line H_z (em Ampères/metro) e respostas de fase para estas mesmas faixas de $EVTI$ e geometria de levantamento dada na figura 2, em uma posição diretamente no lado transversal ($x = 0$) a partir da fonte de HED. O eixo horizontal é agora a distância y perpendicular à linha de fonte. Embora a figura 2 mostre somente uma fileira de receptores off-line, os cálculos de modelo foram realizados para receptores em vários valores de y . todas das curvas de resposta se sobrepõem uma à outra nas figuras 5A-B, exceto para a curva 56 ($EVTI = 5$, NR) na figura 5B, desvio este que reflete um efeito de pequena fase para o máximo $EVTI$ (5:1) que é devida à presença da camada de reservatório eletricamente isotrópica que não contém hidrocarbonetos modelados ("NR"). Este efeito de pequena fase se desvanece quando a camada é ausente (isto é, também tem $EVTI$ de 5 : 1).

A figuras 5A-B demonstram que H_z off-line é insensível a $EVTI$, consistente com a entrada na Tabela 1 para o efeito que H_z off-line depende somente de ρ_h para uma fonte de HED. A figura 6 mostra o cálculo de H_z em $x = 0$ para a configuração de levantamento da figura 2, mas agora para três casos 61, 62 e 63 onde a resistividade horizontal ρ_h tem valores de 1,0, 2,0, e 5,0 ohm-m, respectivamente, e a camada enterrada foi removida. A curva 61 é atualmente três curvas que estão situadas virtualmente superpostas.

Os três casos representados por 61 são $\rho_V = 1, 2$ e 5 ohm-m com ρ_h mantido constante em 1 ohm-m. A curva 62 é o resultado de modelo para $\rho_h = \rho_V = 2$ ohm-m, e a curva 63 para $\rho_h = \rho_V = 5$ ohm-m.

É claro da figura 6 que H_Z off-line é sensível a valores
5 cambiáveis de ρ_h , mas não a EVTI. Assim, medidas de H_Z off-line pode ser usada para separadamente determinar ρ_h usando modelação iterativa ou inversão, como descrito aqui. Pode ser notado que somente resultados de ρ_h , obtidos a partir de dados de H_Z off-line, poderiam ser usados para identificar anomalias resistivas. Tais dados são afetados por EVTI. Todavia, informação
10 de ρ_h sozinha, ou informação de ρ_V sozinha, é inadequada para unicamente identificar anomalias de interesse. Pode ser também notado que medições de E_Z on-line gerariam (não mostrado) um resultado similar às figuras 5A-B para EVTI variável. Isto não é visto nas figuras 4A-B porque os cálculos para estes Exemplos obtiveram diferentes valores de EVTI por manutenção de ρ_h
15 constante e ρ_V variável. Se, em lugar de ρ_V Ter sido mantido constante e ρ_V variável, então as figuras 4A-B teriam mostrado todas as seis curvas paramétricas virtualmente superpostas exatamente como nas figuras 5A-B. (E_Z on-line é sensível somente a ρ_V (para fonte HED); ver a Tabela 1).

A descrição precedente é dirigida às formas de concretização
20 particulares da presente invenção para finalidade de ilustração da mesma. Todavia, será aparente para uma pessoa especializada na técnica que muitas modificações e variações nas formas de concretização descritas aqui são possíveis. Todas de tais modificações e variações são destinadas a estarem dentro do escopo da presente invenção como definida nas reivindicações
25 anexas.

REIVINDICAÇÕES

1. Método implementado por computador para determinar anisotropia elétrica vertical da terra a partir de um levantamento eletromagnético de uma região subsuperficial disposta abaixo do fundo da água em um ambiente fora da costa, dito levantamento usando uma fonte eletromagnética e uma pluralidade de receptores eletromagnéticos, caracterizado pelo fato de que compreende:

(a) obter dados de campo eletromagnético em uma pluralidade de locais de receptor on-line e off-line a partir dos resultados do levantamento, ditos dados compreendendo um componente de campo sensível pelo menos predominantemente a resistividade vertical e um componente de campo sensível pelo menos predominantemente a resistividade horizontal, em que "on-line" e "off-line" são definidos com respeito a uma linha de levantamento ("linha de fonte") de posições de fonte eletromagnética;

(b) solucionar equações de campo eletromagnético de Maxwell para resistividade horizontal e resistividade vertical em uma posição (x, y, z) na região subsuperficial, usando parâmetros de obtenção de levantamento e os dados de campo eletromagnético medidos; e

(c) obter uma medida de anisotropia elétrica vertical no local (x, y, z) a partir das resistividades horizontal e vertical calculadas.

2. Método de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pelo fato de que a posição (x, y, z) é representativa de uma sub-região de dita região subsuperficial, dita sub-região contendo um par de locais de receptor, um on-line e um off-line.

3. Método de acordo com a reivindicação 2, caracterizado pelo fato de que a determinação de anisotropia elétrica vertical é repetida para sub-regiões que correspondem a cada par de receptores on-line e off-line.

4. Método de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pelo fato de que profundidade z para a determinação de anisotropia elétrica vertical

é limitada por profundidade de película para frequências no espectro de fonte do levantamento.

5 5. Método de acordo com a reivindicação 2, caracterizado pelo fato de que o receptor off-line é posicionado transversal ao receptor on-line (mesma coordenada x, onde a linha de fonte define a direção x).

6. Método de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pelo fato de que dita medida de anisotropia elétrica vertical é a resistividade vertical dividida pela resistividade horizontal.

10 7. Método de acordo com a reivindicação 5, caracterizado pelo fato de que os dados de campo eletromagnético para ambos locais de receptor compreendem dados medidos simultaneamente e com a fonte posicionada na mesma posição x que os dois receptores.

8. Método de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pelo fato de que dita fonte eletromagnética é um dipolo elétrico horizontal.

15 9. Método de acordo com a reivindicação 8, caracterizado pelo fato de que o componente de campo sensível pelo menos predominantemente a resistividade vertical é E_z on-line e o componente de campo sensível pelo menos predominantemente a resistividade horizontal é H_z off-line.

20 10. Método de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pelo fato de que dita fonte eletromagnética é um dipolo magnético horizontal.

25 11. Método de acordo com a reivindicação 10, caracterizado pelo fato de que o componente de campo sensível pelo menos predominantemente a resistividade vertical é E_z off-line e o componente de campo sensível pelo menos predominantemente a resistividade horizontal é H_z on-line.

12. Método de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pelo fato de que os dados eletromagnéticos compreendem dados H_z , onde z representa a direção vertical.

13. Método de acordo com a reivindicação 1, caracterizado

pelo fato de que as equações de campo eletromagnético solucionadas para valores de componente de campo eletromagnético usando um modelo de resistividade assumida da região subsuperficial e espaço acima dela, comparando os valores calculados de componentes de campo com valores medidos, ajustando os valores de resistividade do modelo para compensar quaisquer diferenças, e repetindo o processo até que acordo seja obtido dentro de um predeterminado critério.

14. Método de acordo com a reivindicação 13, caracterizado pelo fato de que o modelo é isotrópico (resistividade independente de direção de fluxo de corrente), e o modelo é rodado duas vezes em cada iteração, uma vez assumindo somente resistividade horizontal (resistividade vertical = 0), e uma vez assumindo somente resistividade vertical (resistividade horizontal = 0).

15. Método de acordo com a reivindicação 14, caracterizado pelo fato de que a fonte eletromagnética é um dipolo elétrico horizontal, e o modelo assumindo somente resistividade vertical é rodado usando dados E_z on-line e o modelo assumindo somente resistividade horizontal é rodado usando dados H_z off-line.

16. Método de acordo com a reivindicação 14, caracterizado pelo fato de que a fonte eletromagnética é um dipolo magnético horizontal, e o modelo assumindo somente resistividade vertical é rodado usando dados E_z off-line e o modelo assumindo somente resistividade horizontal é rodado usando dados H_z on-line.

17. Método de acordo com a reivindicação 13, caracterizado pelo fato de que o modelo é anisotrópico (resistividade depende da direção de fluxo de corrente) e o modelo é rodado uma vez em cada iteração.

18. Método de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pelo fato de que as equações de campo eletromagnético são solucionadas usando as respostas de campo medidas como quantidades conhecidas e

invertendo as equações de campo por um método numérico iterativo para convergir sobre um modelo de resistividade da região subsuperficial.

19. Método de acordo com a reivindicação 18, caracterizado pelo fato de que um modelo de resistividade é assumido ser isotrópico.

5 20. Método de acordo com a reivindicação 18, caracterizado pelo fato de que um modelo de resistividade é assumido ser anisotrópico.

10 21. Método de acordo com a reivindicação 18, caracterizado pelo fato de que a fonte eletromagnética é um dipolo elétrico horizontal e os dados de campo eletromagnético compreendem dados E_z on-line e H_z off-line.

22. Método de acordo com a reivindicação 18, caracterizado pelo fato de que a fonte eletromagnética é um dipolo magnético horizontal e os dados eletromagnéticos compreendem dados H_z on-line e dados E_z off-line.

15 23. Método de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pelo fato de que dados magnetotelúricos (dados adquiridos com a fonte eletromagnética desligada ou fora da faixa de recepção de receptor) são obtidos para o componente sensível a resistividade horizontal.

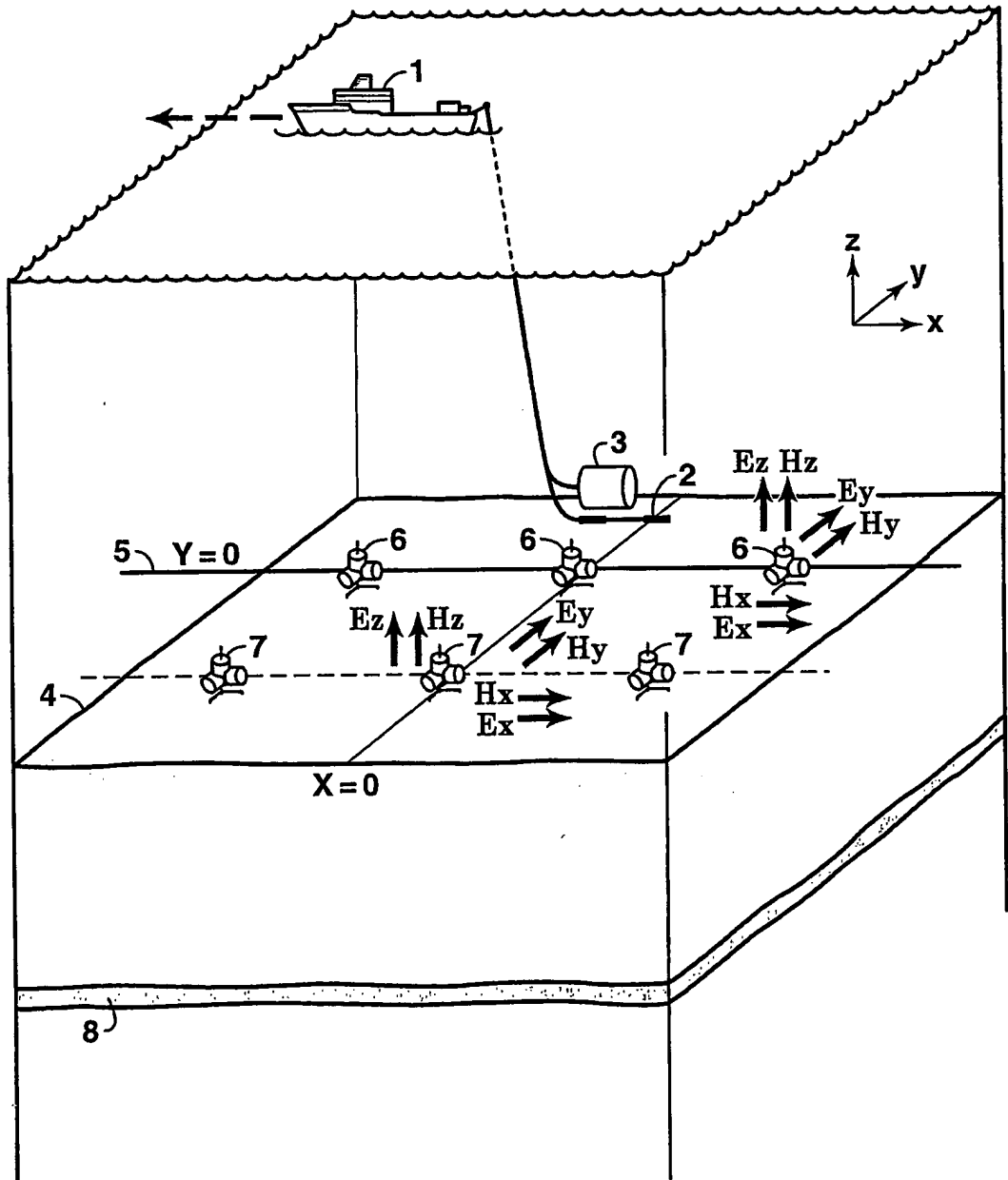


FIG. 1

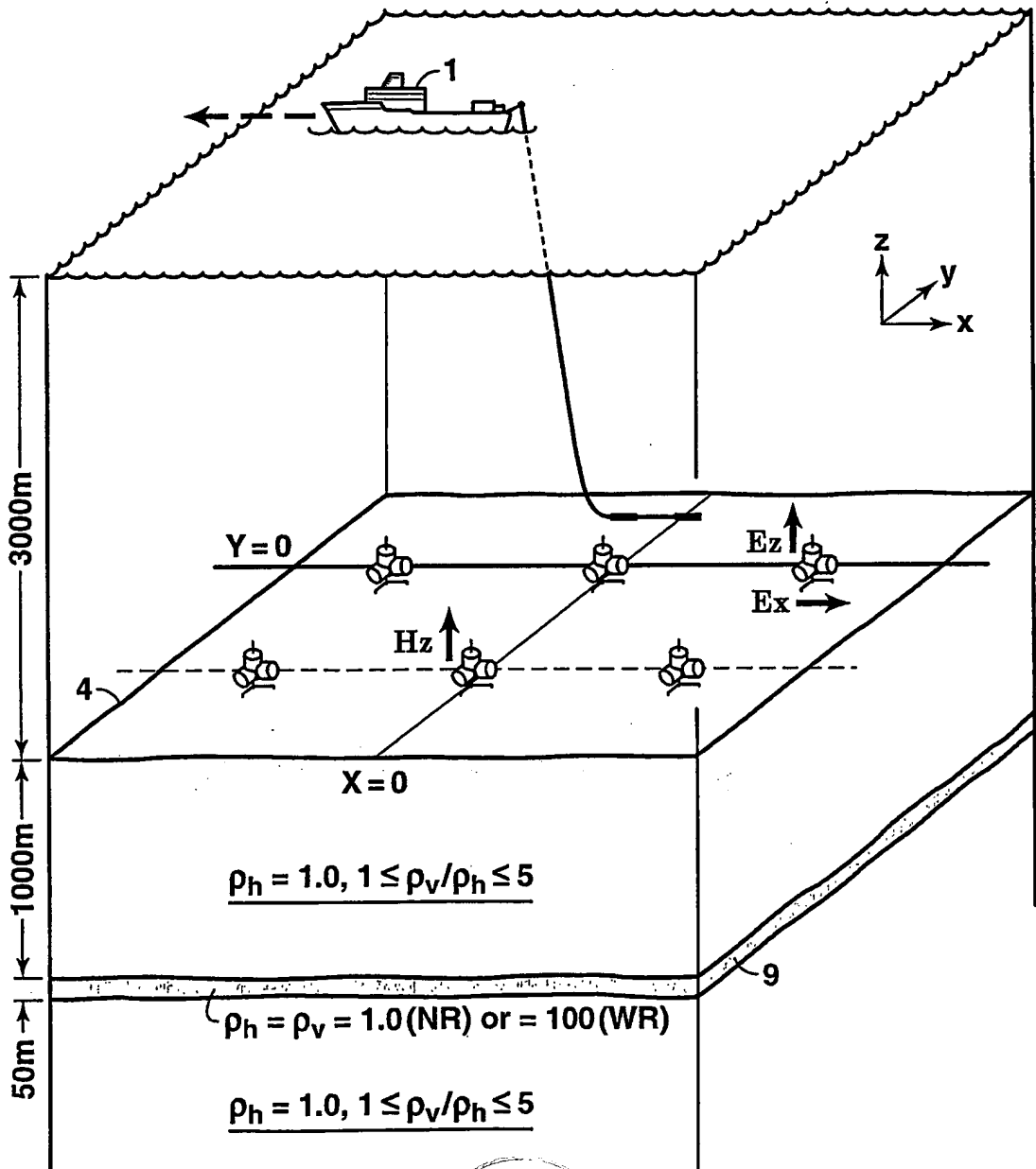
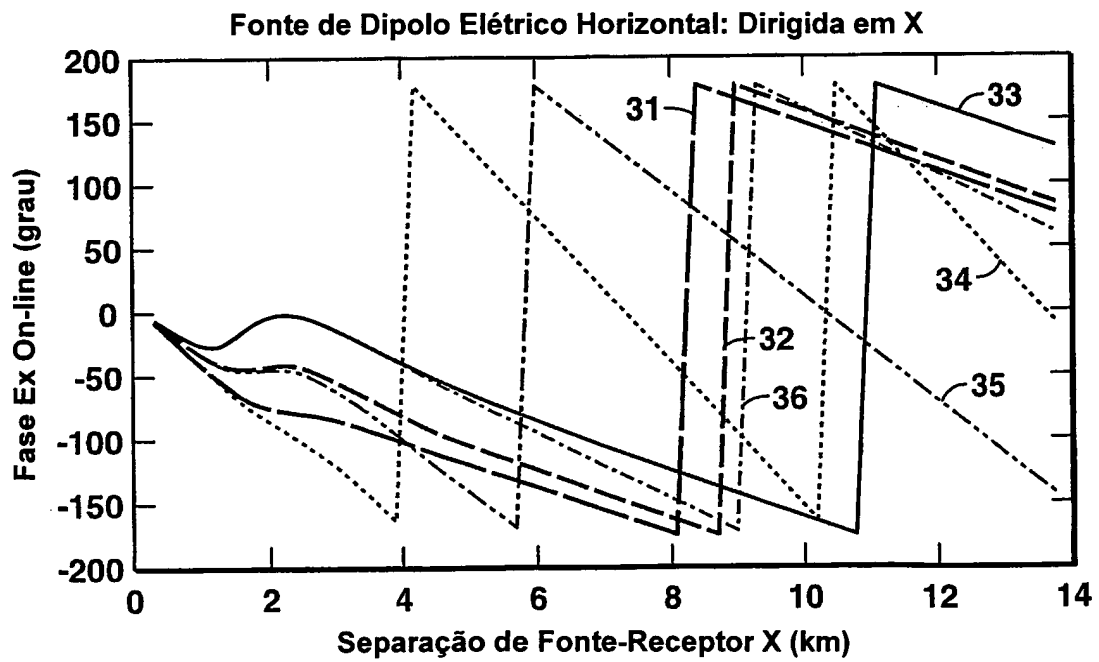
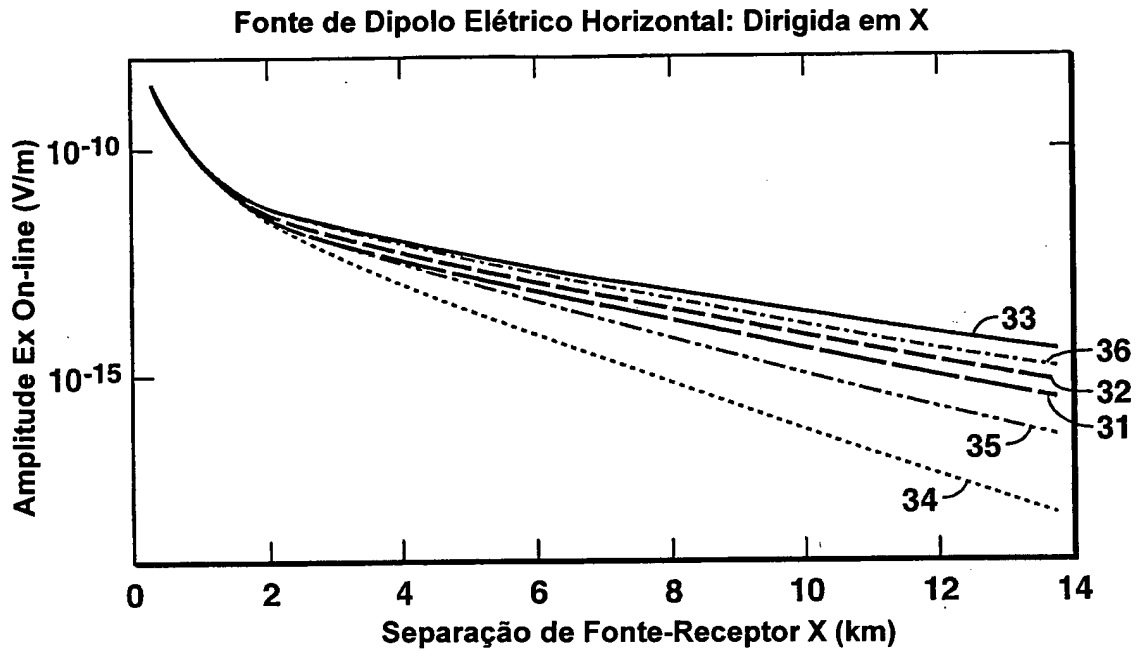
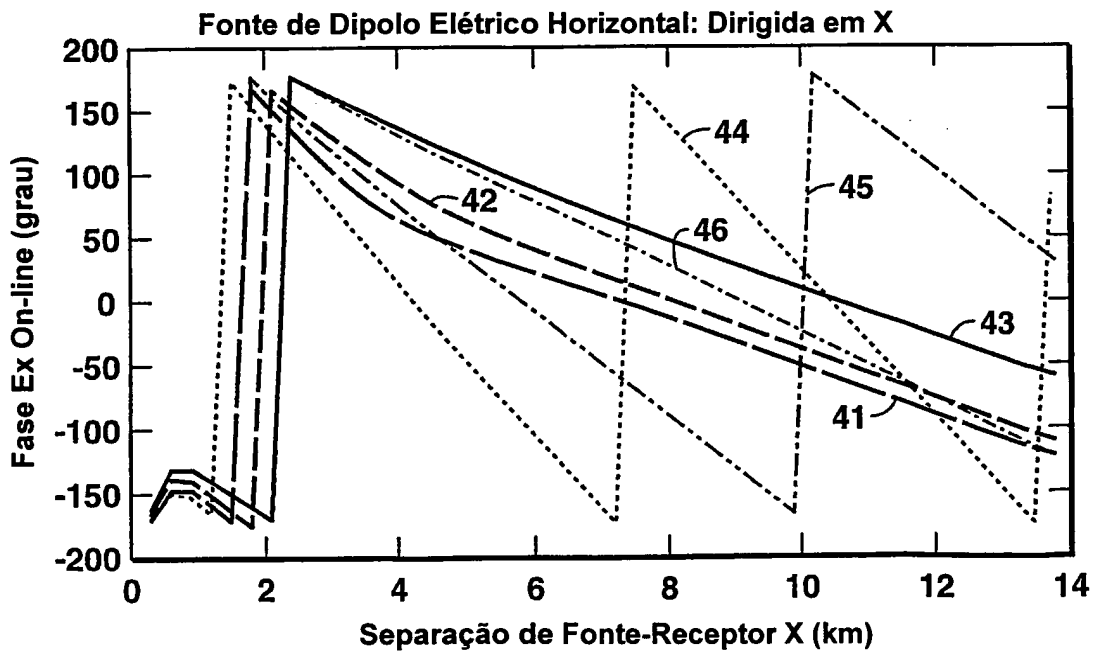
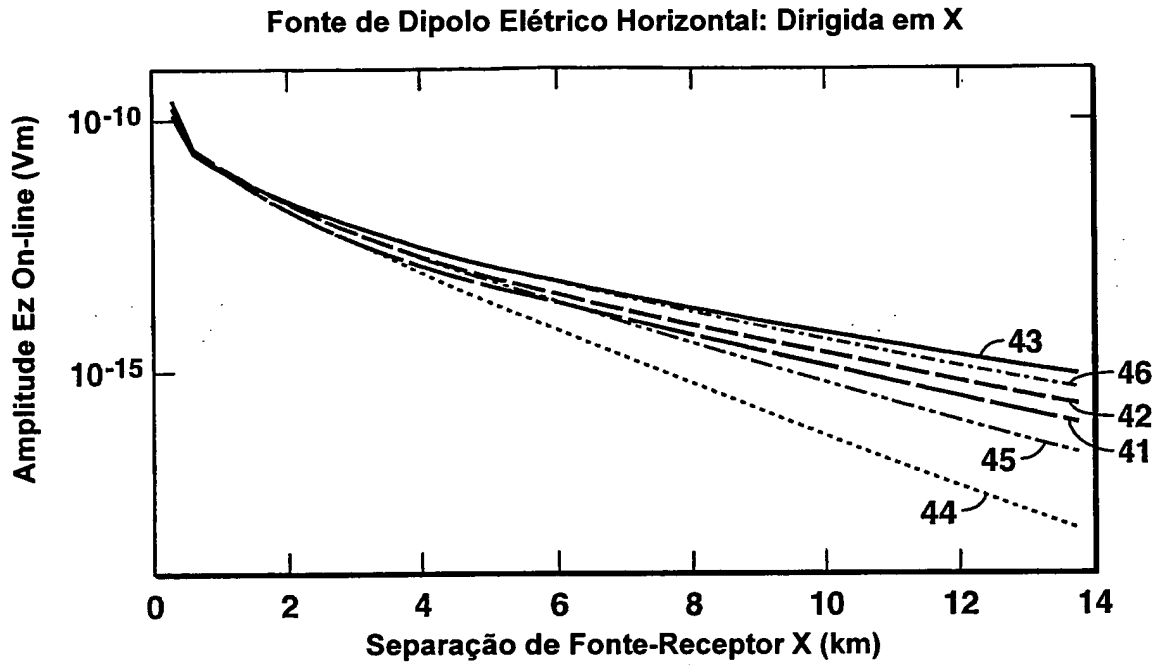
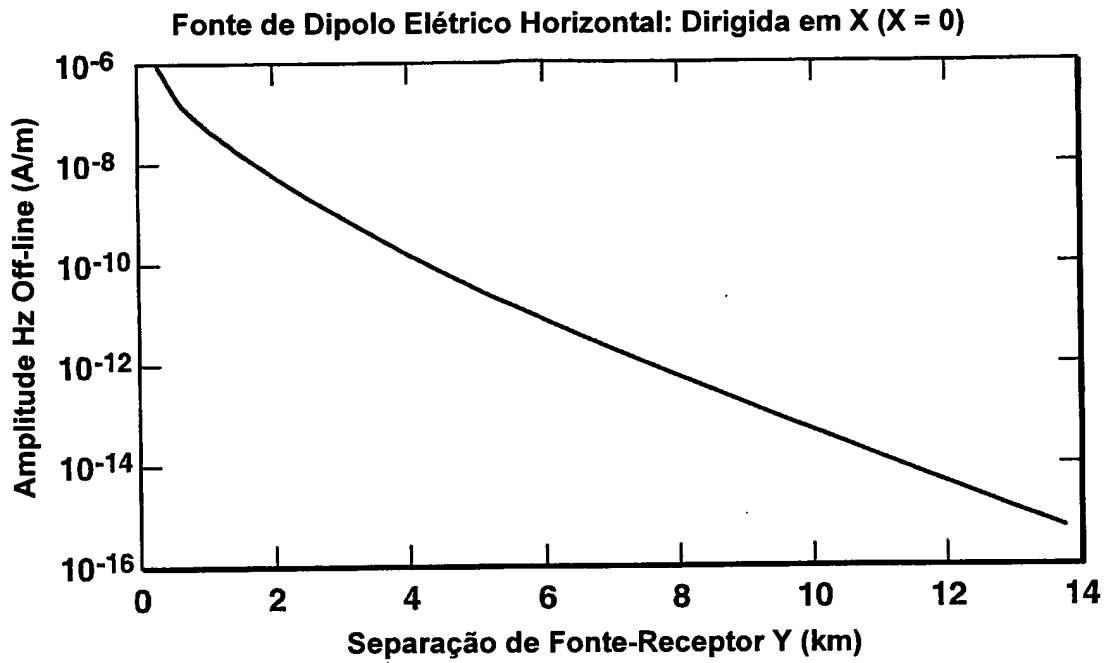
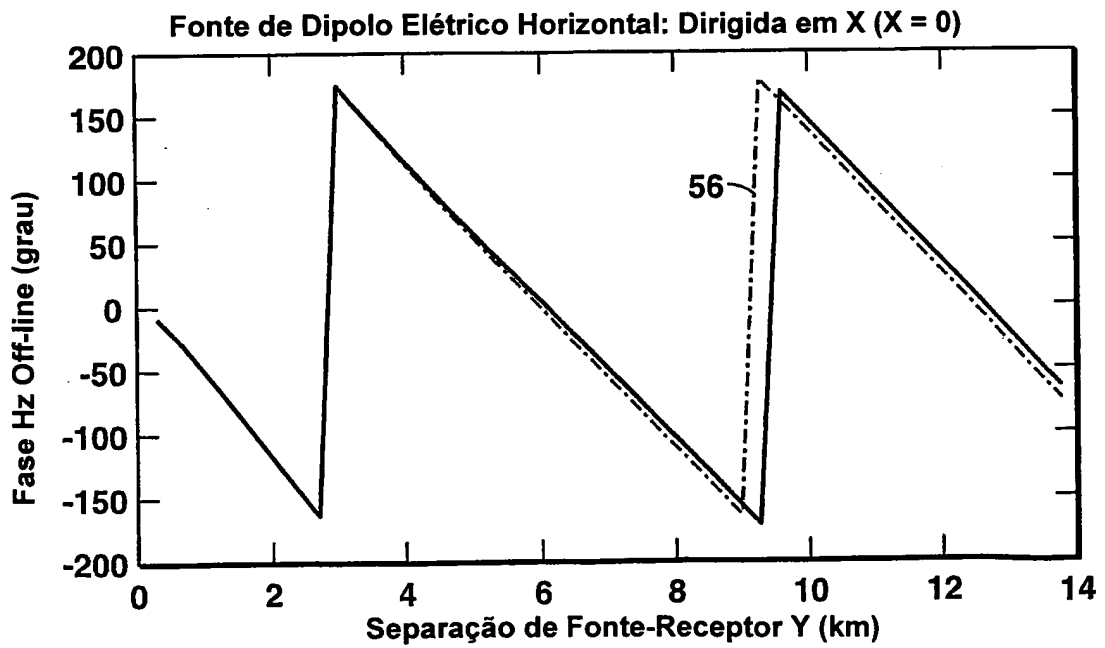
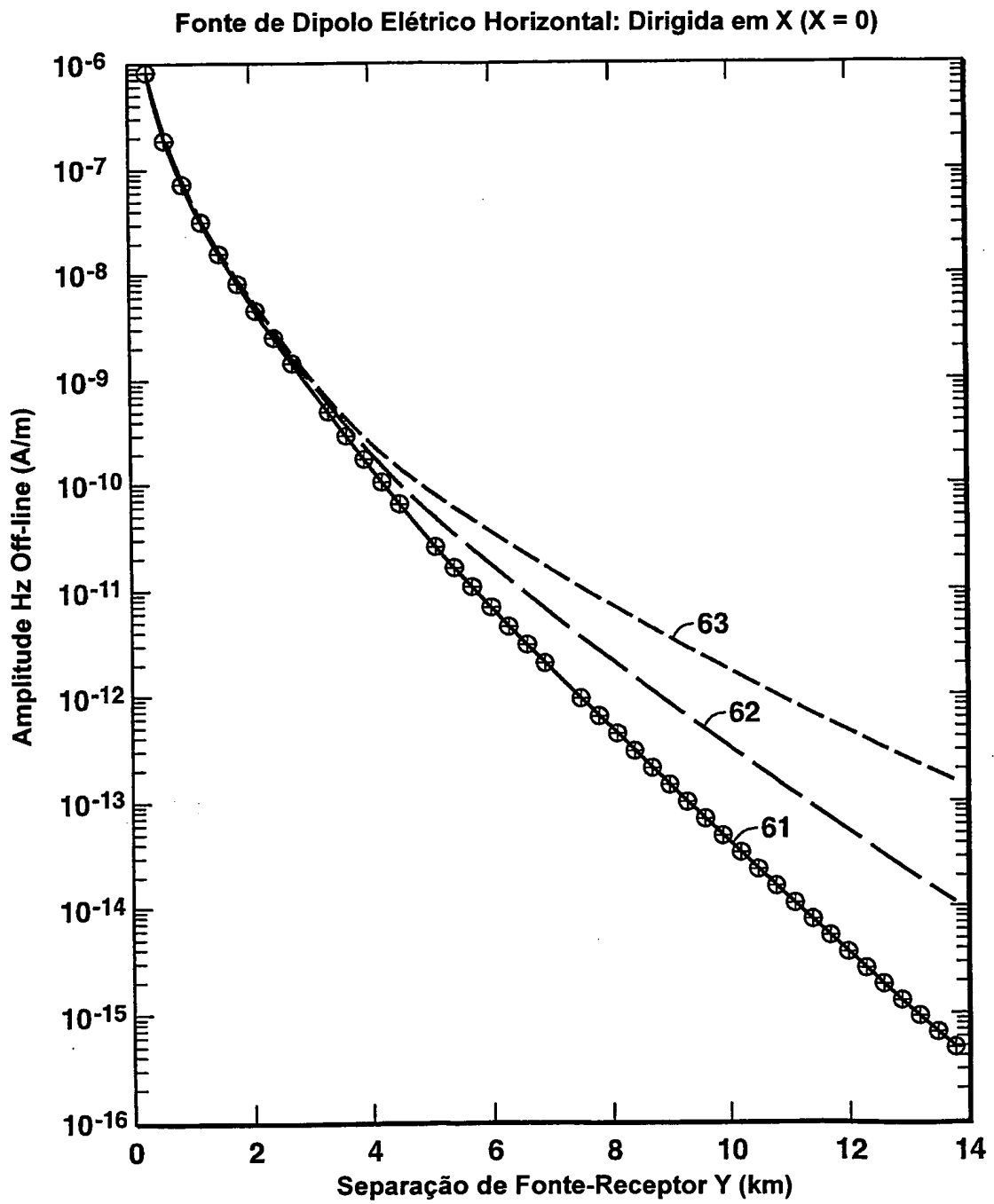


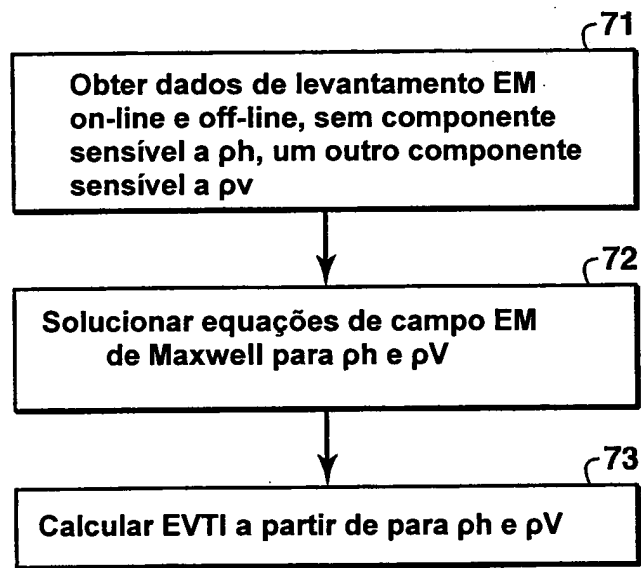
FIG. 2





**FIG. 5A****FIG. 5B**

**FIG. 6**

**FIG. 7**

RESUMO

“MÉTODO IMPLEMENTADO POR COMPUTADOR PARA DETERMINAR ANISOTROPIA ELÉTRICA VERTICAL DA TERRA”

O método marítimo para determinar a anisotropia elétrica vertical da terra usa medidas de levantamento eletromagnético fora da costa (1). O método requer tanto dados on-line quanto dados off-line e inclui pelo menos um componente de campo eletromagnético sensível pelo menos predominantemente à resistividade vertical e um outro componente sensível pelo menos predominantemente à resistividade horizontal (4). Usando a fonte de dipolo elétrico horizontal, as medições E_z on-line e H_z off-line são preferidas. Para a fonte de dipolo magnético horizontal, o H_z on-line e E_z off-line são preferidos. Os dados magnetotelúricos podem ser substituídos por dados de fonte controlada sensíveis à resistividade horizontal. Equação de Maxwell é solucionada por modelagem avançada ou por inversão usando os modelos de resistividade da subsuperfície que são ou isotrópicos ou anisotrópicos.