



República Federativa do Brasil
Ministério do Desenvolvimento, Indústria
e do Comércio Exterior
Instituto Nacional da Propriedade Industrial.

(21) **PI 1000912-4 A2**



(22) Data de Depósito: 15/03/2010
(43) Data da Publicação: 17/01/2012
(RPI 2141)

(51) *Int.Cl.:*
G01V 3/02
G01V 3/08
G01V 3/12

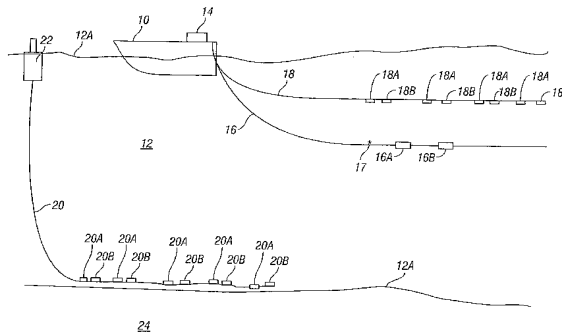
(54) **Título:** MÉTODO PARA A DETERMINAÇÃO DE ANISOTROPIA DE RESISTIVIDADE A PARTIR DE RESPOSTAS ELETROMAGNÉTICAS DA TERRA

(30) **Prioridade Unionista:** 16/03/2009 US 12/381,690

(73) **Titular(es):** Mtem LTD.

(72) **Inventor(es):** Bruce Alan Hobbs, Dieter Werthmüller

(57) **Resumo:** MÉTODO PARA A DETERMINAÇÃO DE ANISOTROPIA DE RESISTIVIDADE A PARTIR DE RESPOSTAS ELETROMAGNÉTICAS DA TERRA. A presente invenção refere-se a um método para a determinação de anisotropia de resistividade de formações de rocha de subsuperfície, a partir de medições de resposta a um campo eletromagnético transiente administrado na subsuperfície e medida em uma pluralidade de distâncias a partir de uma posição da administração, que inclui esta para cada deslocamento, uma resposta de etapa das formações é determinada em um momento a partir da administração selecionado de modo que a resposta de etapa esteja somente substancialmente relacionada à resistividade horizontal e em um momento a partir da administração selecionado de modo que a resposta de etapa esteja somente substancialmente relacionada à resistividade média. A resposta de etapa de resistividade horizontal e a resposta de etapa de resistividade média são usadas para determinar a anisotropia de resistividade.



Relatório Descritivo da Patente de Invenção para **"MÉTODO PARA A DETERMINAÇÃO DE ANISOTROPIA DE RESISTIVIDADE A PARTIR DE RESPOSTAS ELETROMAGNÉTICAS DA TERRA"**.

Antecedentes da invenção

5 Campo da invenção

A presente invenção refere-se geralmente ao campo de levantamento eletromagnético de formações na subsuperfície da Terra. Mais particularmente, a invenção refere-se a métodos para a determinação de anisotropia de resistividade elétrica em formações de subsuperfície com o uso de
10 medições eletromagnéticas.

Antecedente da Técnica

O levantamento eletromagnético é usado, entre outros propósitos, para a determinação da presença de estruturas contendo hidrocarboneto na subsuperfície da Terra. A presença de estruturas contendo hidrocarboneto é tipicamente deduzida por meio da determinação da presença de alta
15 resistividade na subsuperfície, devido ao fato de que a alta resistividade está associada a formações de subsuperfície que têm hidrocarbonetos dispostos nos espaços de poros das mesmas.

O levantamento eletromagnético inclui o que são chamadas de técnicas de levantamento de "fonte controlada". As técnicas de levantamento
20 eletromagnético de fonte controlada incluem administrar uma corrente elétrica ou um campo magnético na Terra, quando tais levantamentos são conduzidos em terra, ou administrar o mesmo em sedimentos abaixo do fundo da água (fundo do mar), quando tais levantamentos são conduzidos em um
25 ambiente marinho. As técnicas incluem a medição de voltagens e/ou campos magnéticos induzidos em eletrodos, antenas e/ou magnetômetros dispostos na superfície da Terra, no fundo do mar ou a uma profundidade selecionada na água. As voltagens e/ou os campos magnéticos são induzidos por meio da interação do campo eletromagnético causado pela corrente elétrica e/ou campo magnético administrado na subsuperfície da Terra (através
30 do fundo da água em levantamentos marítimos) com as formações da Terra de subsuperfície.

O levantamento eletromagnético marítimo de fonte controlada conhecido na técnica inclui administrar a corrente elétrica alternada nos sedimentos abaixo do fundo da água por meio da aplicação de corrente a partir de uma fonte, usualmente disposta em uma embarcação de levantamento, a um eletrodo bipolar rebocado pela embarcação de levantamento. Um eletrodo bipolar consiste tipicamente em um cabo elétrico isolado que tem dois eletrodos no mesmo em um espaçamento selecionado, às vezes de 300 a 1000 metros ou mais. A corrente alternada tem uma ou mais frequências selecionadas, tipicamente dentro de uma faixa de cerca de 0,1 a 100 Hz. Uma pluralidade de eletrodos detectores é disposta no fundo da água em locais espaçados, e os eletrodos detectores são conectados a dispositivos que registram as voltagens induzidas através de diversos pares de tais eletrodos. Tal levantamento é conhecido como o levantamento eletromagnético de fonte controlada por domínio de frequência.

Outra técnica de fonte controlada para o levantamento eletromagnético de formações da Terra de subsuperfície conhecida na técnica consiste no levantamento eletromagnético de fonte controlada transiente. No levantamento eletromagnético de fonte controlada transiente, uma corrente elétrica ou um campo magnético é administrado na Terra, quando tais levantamentos são conduzidos em terra, ou é administrado em sedimentos abaixo do fundo da água (fundo do mar), quando tais levantamentos são conduzidos em um ambiente marinho com o uso de eletrodos em um cabo similar aos explicados acima, como usados para o levantamento por domínio de frequência. A corrente elétrica pode ser corrente direta (CC). Em um momento ou momentos selecionados, a corrente elétrica é comutada e as voltagens induzidas são medidas, tipicamente, em relação ao tempo ao longo de um intervalo de tempo selecionado, com o uso de eletrodos dispostos em terra, na coluna de água ou sobre o fundo da água, conforme explicado anteriormente com referência ao levantamento por domínio de frequência. A estrutura e a composição da subsuperfície da Terra são deduzidas por meio da distribuição de espaço e tempo das voltagens induzidas. As técnicas de levantamento t-CSEM são descritas, por exemplo, na Publicação de Pedido

de Patente Internacional sob o N^o. WO 2007/104949 A1, intitulada *Optimization of MTEM Parameters*.

Um dos parâmetros específicos determinados a partir da distribuição de tempo de voltagens induzidas consiste na resistividade elétrica das formações de subsuperfície. Ao tornar adequadas as medições de resposta eletromagnéticas espacialmente distribuídas, é possível gerar uma imagem tridimensional da distribuição espacial da resistividade elétrica na subsuperfície da Terra.

As técnicas conhecidas na técnica para a determinação da distribuição espacial da resistividade elétrica com o uso de medições de levantamento eletromagnético, tipicamente presumem que a resistividade elétrica é isotrópica, isto é, a resistividade é a mesma em qualquer formação de rocha particular de subsuperfície, independente da direção do fluxo de corrente elétrica usado para fazer as medições. É de conhecimento na técnica, no entanto, que a resistividade elétrica de algumas formações de rocha é anisotrópica. A anisotropia de resistividade está presente em algumas formações de rocha em uma variedade de escalas a partir de micro (por exemplo, variação de conectividade de água de poro de tamanho de grão) a macro (por exemplo, sequências de areia-xisto laminadas). Vide, por exemplo, a patente U.S. N^o. 6.643.589, concedida a Zhang *et al.* e a patente U.S. N^o. 7.269.515, concedida a Tabarovsky *et al.* As duas patentes anteriores descrevem as técnicas para a determinação de resistividade elétrica e anisotropia de resistividade a partir de dentro de furos de poço perfurados através das formações de rocha de subsuperfície. Contudo, tais técnicas não são aplicáveis ao uso com o levantamento eletromagnético conduzido a partir de cima das formações de rocha de interesse. Há uma necessidade por técnicas de levantamento eletromagnético que levem em consideração a anisotropia de resistividade.

Sumário da invenção

Um método para a determinação de anisotropia de resistividade de formações de rocha de subsuperfície, de acordo com um aspecto da invenção, inclui administrar um campo eletromagnético transiente nas forma-

ções de rocha de subsuperfície. A resposta eletromagnética das formações é medida em uma pluralidade de distâncias a partir de uma posição de administração. Para cada deslocamento, é determinada uma resposta de etapa das formações. Um momento a partir da administração pode ser selecionado de modo que o valor da resposta de etapa neste momento esteja somente substancialmente relacionado à resistividade horizontal e outro momento a partir da administração pode ser selecionado de modo que o valor da resposta de etapa no segundo momento esteja somente substancialmente relacionado à resistividade média. A resistividade horizontal e a resistividade média, então, encontradas são usadas para determinar a anisotropia de resistividade.

Um método para a determinação de distribuição de resistividade em formações de subsuperfície, de acordo com outro aspecto da invenção, inclui o uso de medições feitas em resposta à administração de um campo eletromagnético transiente nas formações de subsuperfície. As medições são feitas em uma pluralidade de deslocamentos a partir de uma posição na qual o campo eletromagnético foi administrado. Um método, de acordo com este aspecto da invenção, inclui a determinação de uma resposta de etapa das formações. Um momento a partir da administração pode ser selecionado de modo que o valor da resposta de etapa neste momento esteja somente substancialmente relacionado à resistividade horizontal e outro momento a partir da administração pode ser selecionado de modo que o valor da resposta de etapa neste segundo momento esteja somente substancialmente relacionado à resistividade média. A resistividade horizontal e a resistividade média, então, encontradas são usadas para determinar a anisotropia de resistividade.

Em uma implantação de exemplo, um modelo inicial das formações de subsuperfície é gerado com o uso dos valores de anisotropia de resistividade e resistividade horizontal determinados. As respostas de etapa, conforme uma função de deslocamento, são calculadas para este modelo inicial e um valor de razão de anisotropia é calculado em relação ao deslocamento com o uso dos valores de resistividade horizontal obtida em um

momento selecionado a partir da administração e a resistividade média obtida em outro momento a partir da administração. As razões de anisotropia calculadas em cada deslocamento são comparadas às determinadas a partir das respostas de etapa medidas. O modelo inicial é ajustado e o cálculo da razão de anisotropia, a razão de anisotropia medida e a comparação são repetidas até que as diferenças entre as razões de anisotropia calculadas e as razões de anisotropia medidas alcancem um mínimo ou diminuam abaixo de um limiar selecionado.

Outros aspectos e vantagens da invenção serão evidentes a partir da seguinte descrição e das reivindicações em anexo.

Breve descrição dos desenhos

A figura 1 mostra um sistema de exemplo para adquirir as medições eletromagnéticas usadas com a invenção.

A figura 2 mostra um modelo de três camadas de resistividades de formações de rocha de subsuperfície com razões de anisotropia selecionadas.

A figura 3 mostra gráficos de razões de anisotropia aparentes em relação ao deslocamento para as formações de modelo mostradas na figura 2.

A figura 4 mostra uma "resposta de etapa" de exemplo de momento inicial e último momento de formações de subsuperfície a um campo eletromagnético transiente.

Descrição detalhada

A figura 1 mostra um sistema de exemplo levantamento eletromagnético marinho que pode adquirir sinais de levantamento eletromagnético de fonte controlada transiente para o processamento de acordo com a invenção. O sistema pode incluir uma embarcação de levantamento que se move ao longo da superfície de um corpo de água, tal como um lago ou oceano. A embarcação pode incluir equipamentos sobre a mesma, chamados, por conveniência, como um "sistema de registro" e mostrados geralmente em 14, para a geração de campos eletromagnéticos a serem administrados nas formações abaixo do fundo da água e para o regis-

tro de medições feitas em resposta aos campos eletromagnéticos administrados. O sistema de registro 14 pode incluir (nenhum mostrado separadamente, a título de clareza da ilustração) dispositivos de navegação para determinar a posição geodésica da embarcação 10. A embarcação pode incluir

5 equipamentos adicionais para a determinação da posição geodésica e/ou condução de um ou mais receptores e transmissores eletromagnéticos (descritos abaixo), dispositivos para administrar a corrente elétrica para o(s) transmissor(es); e equipamentos de armazenamento de dados para o registro de sinais detectados por um ou mais receptores eletromagnéticos.

10 O transmissor eletromagnético no presente exemplo pode ser um eletrodo bipolar, mostrado como um par de eletrodos em 16A, 16B disposto ao longo de um cabo elétrico 16 rebocado pela embarcação 10. Em momentos selecionados, o sistema de registro 14 pode passar a corrente elétrica através dos eletrodos 16A, 16B. Prefere-se que a corrente seja con-

15 figurada para induzir os campos eletromagnéticos transientes nas formações 24 abaixo do fundo da água 12A. Os exemplos de tal corrente incluem corrente direta comutada, em que a corrente pode ser ligada, desligada, revertida a polaridade ou comutada em um conjunto estendido de eventos de comutação, tais como uma sequência binária pseudoaleatória ("PRBS") ou outra sequência codificada.

20

No presente exemplo, a embarcação 10 pode rebocar um ou mais cabos receptores 18 que têm uma pluralidade de receptores eletromagnéticos sobre os mesmos, tais como os eletrodos bipolares 18A, 18B, disposta em posições espaçadas ao longo do cabo. Os eletrodos bipolares

25 18A, 18B terão voltagens administradas através deles relacionadas à amplitude do componente do campo elétrico do campo eletromagnético que se origina das formações 24 em resposta ao campo eletromagnético administrado. O sistema de registro 14 sobre a embarcação 10 pode incluir, conforme explicado acima, dispositivos para o registro dos sinais gerados pelos

30 eletrodos 18A, 18B. O registro de cada resposta do receptor é tipicamente indexado em relação a um tempo de referência, tal como um evento de comutação de corrente na corrente do transmissor. Um sensor 17, tal como um

sensor de campo magnético (por exemplo, um magnetômetro), ou um medidor de corrente pode ser disposto próximo ao transmissor conforme mostrado e pode ser usado para medir um parâmetro relacionado à quantidade de corrente que flui através do transmissor.

5 No presente exemplo, em substituição ou adição ao cabo receptor 18 rebocado pela embarcação 10, um cabo receptor de fundo da água 20 pode ser disposto ao longo do fundo da água 12 e pode incluir uma pluralidade de receptores, tais como os eletrodos bipolares 20A, 20B similares em configuração aos eletrodos bipolares 18A, 18B sobre o cabo rebocado. Os
10 eletrodos 20A, 20B podem estar em uma boia de registro 22 ou dispositivo similar, próximo à superfície da água 12A ou no fundo da água, que possa registrar sinais detectados pelos eletrodos 20A, 20B.

Os versados na técnica irão observar que a invenção não se limita, no escopo, às disposições de receptor e transmissor mostradas na
15 figura 1. Outros exemplos podem usar, em substituição ou adição aos eletrodos bipolares mostrados na figura 1, bobinas de fio ou circuitos de fio para o transmissor administrar um campo magnético de tempo variado nas formações 24. Os cabos receptores 18, 20 podem incluir outros dispositivos
20 sensores, tais como magnetômetros, bobinas ou circuitos de fio para detectar o componente de campo magnético do campo eletromagnético induzido a partir da formação 24.

Para os propósitos de explicação da invenção, os receptores podem ser geralmente dispostos ao longo de uma linha comum ao transmissor durante o registro de sinal. OS registros de sinais a partir de cada um
25 dos respectivos receptores podem ser feitos com o transmissor disposto em locais selecionados ao longo da linha comum e ativado conforme explicado acima. O sinal registrado que corresponde a cada receptor eletromagnético será associado a uma distância, chamada de "deslocamento", que é localizada no ponto central geodésico entre a posição geodésica do receptor e a
30 posição geodésica do transmissor no momento do registro de sinal. Deste modo, podem ser adquiridos os sinais que correspondem a uma pluralidade de deslocamentos. O propósito para o registro de múltiplos deslocamentos,

conforme se refere à invenção, será adicionalmente explicado abaixo.

Conforme explicado na seção anterior no presente documento, algumas formações podem ser eletricamente anisotrópica e, em consequência disto, têm resistividade anisotrópica. Para os propósitos da presente invenção, a anisotropia de resistividade será limitada ao caso de formações isotrópicas de modo vertical e transversal ("VTI"), isto é, formações que têm uma resistividade "vertical" diferente (resistividade medida com o uso do fluxo de corrente em uma direção perpendicular aos planos da estratificação da formação) da resistividade "horizontal" (resistividade medida com o uso do fluxo de corrente em uma direção paralela aos planos de estratificação da formação). As formações VTI são consideradas tendo a mesma resistividade horizontal independente da direção azimutal, ao longo da qual a medição é feita. Tais formações também são conhecidas como tendo um eixo geométrico vertical de simetria.

Nas formações VTI, a resistividade vertical ρ_v e a resistividade horizontal ρ_h definem um "fator de anisotropia", o qual pode ser representado pela seguinte expressão:

$$\lambda = \sqrt{\frac{\rho_v}{\rho_h}} \quad (1)$$

λ tem, tipicamente, um valor entre 1 e 5. A resistividade média geométrica é $\rho_m = \sqrt{\rho_v \rho_h}$. Por meio da teoria de levantamento eletromagnético e modelagem da resposta transiente eletromagnética de um semiespaço eletricamente condutivo determinou-se que a onda de ar (resposta de etapa inicial próxima ao tempo zero a partir de um evento de comutação de corrente transiente), representada por $E(0)$, depende essencialmente da resistividade horizontal ρ_h . Uma resposta de etapa de último momento (em relação ao momento do evento de comutação de transmissor), a qual consiste na resposta aproximada de DC, representada por $E(\infty)$, depende essencialmente da resistividade média geométrica de todas as formações, através das quais o campo eletromagnético se propaga. A "resposta de etapa" consiste na amplitude de campo magnético ou voltagem medida em resposta a uma mudança de função de etapa na corrente do transmissor, isto é, a res-

posta medida para comutar a corrente e manter a corrente no valor comutado. A resposta de etapa consiste no total da resposta de impulso. A resposta de impulso consiste na amplitude de campo medida ou voltagem administrada em relação ao tempo, indexada ao tempo do evento de comutação. Um exemplo de resposta de etapa de momento inicial e último momento é mostrado no gráfico da figura 4 em 52 e 54, respectivamente.

Com o uso dos resultados descritos em: Wilson, A.J.S., 1997, *The equivalent wavefield concept in multichannel transient electromagnetic surveying*: tese de Ph.D., Universidade de Edinburgo, para um semiespaço isotrópico uniforme com resistividade ρ e medições obtidas conforme explicado acima, podem ser derivadas as seguintes expressões:

$$E(0) = \frac{\rho}{2\pi r^3} = \frac{\rho_h}{2\pi r^3} \quad (2)$$

$$E(\infty) = \frac{\rho}{\pi r^3} = \frac{\rho_m}{\pi r^3} \quad (3)$$

Nas expressões acima, r representa o deslocamento. As expressões acima podem ser usadas para fornecer uma expressão para a determinação da razão de anisotropia de resistividade de um semiespaço anisotrópico uniforme:

$$\lambda = \frac{\rho_m}{\rho_h} = \frac{1}{2} \frac{E(\infty)}{E(0)} \quad (4)$$

A combinação das equações (2), (3) e (4) fornece uma expressão relacionada ao deslocamento para a determinação da razão de anisotropia de um semiespaço anisotrópico uniforme:

$$\lambda = \left(\frac{r_1}{r_2} \right)^3 \frac{E_x(r_1, \infty)}{2E_x(r_2, 0)}, \quad (5)$$

na qual $E_x(r, t)$ consiste na resposta de etapa em linha da Terra (ao longo da linha comum explicada acima e indicada pelo x subscrito) para o deslocamento r no momento t , r_1 consiste em um deslocamento curto selecionado de modo que seja mais fácil determinar a resposta de momento inicial, e r_2 consiste em um deslocamento longo selecionado, onde seja mais fácil determinar a resposta de último momento. A expressão cima pode ser estendida para definir a anisotropia aparente para qualquer valor de deslocamento r para quaisquer formações VTI de subsuperfície, conforme expos-

to a seguir:

$$\lambda_{app}(r) = \frac{E_x(r, \infty)}{2E_x(r, 0)} \quad (6)$$

À medida que o deslocamento aumenta, as respostas eletromagnéticas medidas são influenciadas pelas seções mais profundas da subsuperfície. Como consequência disto, $\lambda_{app}(r)$ varia em resposta à variação de anisotropia com a profundidade. A figura 2 mostra dois modelos de 3 camadas de formações de subsuperfície, a título de ilustração. A profundidade das formações é ajustado à zero no fundo da água (12A na figura 1). Uma camada de formação superior é mostrada em 30 e, em ambos os modelos, tem uma resistividade horizontal igual a 10 ohm-metros e uma razão de anisotropia de 1,5. Deste modo, em ambos os modelos, a resistividade vertical das primeiras camadas de formação é de 15 ohm-metros, conforme mostrado em 32 e 34. A segunda camada tem uma resistividade horizontal de 12,5 ohm-metros. No primeiro modelo, a segunda camada tem uma razão de isotropia de 1,8, mostrada pela resistividade vertical em 38, e no segundo modelo tem uma razão de anisotropia de 2,2, conforme mostrado pela resistividade vertical indicada em 40. A camada mais inferior nos dois modelos tem a resistividade horizontal mostrada em 42 e razões de anisotropia de 2,5, em ambos os modelos, conforme mostrado pelos valores de resistividade vertical indicados em 44 e 46.

A figura 3 mostra gráficos da anisotropia aparente para cada um dos modelos acima, conforme uma função de deslocamento, determinada por meio da modelagem da resposta de etapa e com o uso da equação (6). A função de anisotropia aparente do primeiro modelo em relação ao deslocamento é mostrada pela curva 50 e a função de anisotropia aparente do segundo modelo é mostrada pela curva 48. É evidente que $\lambda_{app}(r)$ está relacionado à anisotropia de resistividade das formações na subsuperfície. À medida que a anisotropia de resistividade aumenta, a anisotropia aparente aumenta mais rápido com o aumento do deslocamento, conforme mostrado mediante a comparação das curvas 48 e 50 na figura 3.

Em uma implantação prática de um método de acordo com a

invenção, as respostas eletromagnéticas de etapa podem ser obtidas em uma pluralidade de deslocamentos, por exemplo, executados com o uso do sistema mostrado na figura 1. A resposta de etapa pode ser obtida por meio da indução de um campo eletromagnético transiente mediante a energização do transmissor, por exemplo, mediante a condução de corrente elétrica através de eletrodos (16A e 16B na figura 1) do transmissor. A corrente pode ser conforme descrito com referência à figura 1. Por exemplo, a corrente pode ser na forma de um PRBS. As voltagens induzidas através de diversos sensores eletromagnéticos, tais como o 18A e 18B na figura 1 ou 20A e 20B na figura 1, podem ser registradas. Se a corrente do transmissor for em forma de um PRBS, a forma de onda da corrente do transmissor pode ser medida e usada para deconvolver os sinais de voltagem registrados para obter a resposta de impulso. A resposta de impulso pode ser integrada para se obter a resposta de etapa.

Para cada resposta de etapa, e para cada deslocamento r , a amplitude da resposta de etapa no último momento $[E_x(r,0)]$ e no momento inicial $[E_x(r,\infty)]$ é, então, determinada, conforme explicado acima com referência à figura 3. A anisotropia aparente $\lambda_{app}(r)$ pode ser, então, computada para cada deslocamento com o uso da equação (6). A anisotropia aparente pode ser usada para gerar um modelo inicial da subsuperfície. Tipicamente, o modelo inicial será um semiespaço que tem uma pluralidade de camadas de formação de rocha, nas quais cada camada tem o mesmo valor de resistividade horizontal determinada a partir da resposta de etapa de último momento e cada camada tem o mesmo valor da resistividade média geométrica determinada a partir da resposta de momento inicial. O modelo inicial pode ser iterativamente atualizado por meio da mudança da resistividade horizontal e da razão de anisotropia para cada camada, as mudanças sendo derivadas, por exemplo, com o uso de um esquema de inversão de Occam estendido para incluir tanto a resistividade horizontal como a razão de anisotropia, como parâmetros livres da inversão. Vide, por exemplo, Constable, S. C., R. L. Parker, e C. G. Constable, 1987, *Occam's Inversion: a practical algorithm for generating smooth models from EM sounding data*, Geophysics,

52, 289-300.

Para cada iteração de modelo, uma razão de anisotropia aparente em relação ao deslocamento pode ser calculada com o uso da equação (6). A razão de anisotropia aparente pode ser comparada à razão de anisotropia em relação ao deslocamento determinado a partir da resposta de etapa medida das formações de subsuperfície ao campo eletromagnético administrado. As ações anteriormente mencionadas podem ser repetidas sucessivamente até que seja gerada uma imagem final das formações de subsuperfície. A imagem final pode ser determinada ao ser gerada quando as diferenças entre as respostas de etapa em relação ao deslocamento determinado a partir das medições eletromagnéticas e aquelas calculadas com o uso da equação (6), a partir do modelo ajustado, alcancem um mínimo ou diminuam abaixo de um limiar selecionado.

Os métodos de acordo com a invenção podem fornecer imagens de resistividade elétrica de formações de rocha de subsuperfície que incluam os efeitos da anisotropia de resistividade com o uso de medições de levantamento eletromagnético transiente.

Embora a invenção tenha sido descrita em relação a um número limitado de modalidades, os versados na técnica, com o benefício desta descrição, irão observar que outras modalidades podem ser planejadas, as quais não se desviem do escopo da invenção, conforme apresentado no presente documento. Consequentemente, o escopo da invenção deveria ser somente limitado pelas reivindicações em anexo.

REIVINDICAÇÕES

1. Método para a determinação de anisotropia de resistividade de formações de rocha de subsuperfície que compreende:
 - 5 administrar um campo eletromagnético transiente nas formações de rocha de subsuperfície;
 - medir a resposta eletromagnética das formações em uma pluralidade de distâncias a partir de uma posição da administração;
 - para cada deslocamento, determinar uma resposta de etapa das formações em um momento a partir da administração, selecionado de modo
 - 10 que a resposta de etapa esteja somente substancialmente relacionada à resistividade horizontal;
 - para cada deslocamento, determinar uma resposta de etapa das formações em um momento a partir da administração, selecionado de modo que a resposta de etapa esteja somente substancialmente relacionada à resistividade média; e
 - 15 usar a resposta de etapa de resistividade horizontal e a resposta de etapa de resistividade média para determinar a anisotropia de resistividade.
2. Método, de acordo com a reivindicação 1, em que a administração compreende passar a corrente elétrica através de um transmissor, a
- 20 corrente compreendendo ao menos uma dentre corrente ligada, corrente desligada, corrente de polaridade invertida e comutação da corrente em uma sequência codificada.
3. Método, de acordo com a reivindicação 1, em que a determinação da resposta de etapa compreende a determinação da resposta de
- 25 impulso e a integração da resposta de impulso.
4. Método, de acordo com a reivindicação 3, em que a determinação da resposta de impulso compreende a deconvolução da resposta eletromagnética medida com uma forma de onda de uma corrente elétrica usada
- 30 para ser administrada ao campo eletromagnético.
5. Método, de acordo com a reivindicação 1, em que a medição da resposta eletromagnética compreende a medição de voltagens adminis-

tradas através de pares de eletrodos.

6. Método, de acordo com a reivindicação 1, em que a resposta de etapa que corresponde substancialmente à resistividade horizontal compreende a resposta eletromagnética a uma onda de ar.

5 7. Método, de acordo com a reivindicação 1, compreendendo adicionalmente:

10 (a) gerar um modelo inicial das formações de subsuperfície com o uso da anisotropia de resistividade determinada, o modelo inicial incluindo um valor de resistividade horizontal e um valor de razão de anisotropia;

(b) calcular um valor de razão de anisotropia em relação ao deslocamento com o uso dos valores de resistividade horizontal e de razão de anisotropia;

15 (c) usar a razão de anisotropia calculada em relação ao deslocamento para estimar a resposta de etapa das formações em um momento a partir da administração selecionada, de modo que a resposta de etapa esteja somente substancialmente relacionada à resistividade horizontal e em um momento a partir da administração selecionada, de modo que a resposta de etapa esteja somente substancialmente relacionada à resistividade média;

(d) comparar as respostas de etapa estimadas com as respostas de etapa determinadas; e

25 (e) ajustar o modelo inicial e a repetição de (b), (c) e (d) até que as diferenças entre as respostas de etapa estimadas e as respostas de etapa determinadas alcancem um mínimo ou diminuam abaixo de um limiar selecionado.

30 8. Método para a determinação de distribuição de resistividade em formações de subsuperfície, com o uso de medições feitas em resposta à administração de um campo eletromagnético transiente nas formações de subsuperfície, em que as medições são feitas em uma pluralidade de deslocamentos a partir de uma posição na qual o campo eletromagnético foi ad-

ministrado, o método compreendendo:

- 5 (a) determinar uma resposta de etapa das formações em um momento a partir da administração selecionada, de modo que a resposta de etapa esteja somente substancialmente relacionada à resistividade horizontal e uma resposta de etapa das formações em um momento a partir da administração selecionada, de modo que a resposta de etapa esteja somente substancialmente relacionada à resistividade média; e
- 10 (b) usar a resposta de etapa de resistividade horizontal e da resposta de etapa de resistividade média para determinar a anisotropia de resistividade;
9. Método, de acordo com a reivindicação 8, que compreende adicionalmente:
- 15 (c) gerar um modelo inicial das formações de subsuperfície com o uso da anisotropia de resistividade determinada, em que o modelo inicial inclui um valor de resistividade horizontal e um valor de razão de anisotropia;
- (d) calcular um valor de razão de anisotropia em relação ao deslocamento com o uso dos valores de resistividade horizontal e de razão de anisotropia;
- 20 (e) usar a razão de anisotropia calculada em relação ao deslocamento para estimar a resposta de etapa das formações em um momento a partir da administração selecionada, de modo que a resposta de etapa esteja somente substancialmente relacionada à resistividade horizontal e em um momento a partir da administração selecionado de modo que a resposta de etapa esteja somente substancialmente relacionada à resistividade média;
- 25 (f) comparar as respostas de etapa estimadas com as respostas de etapa determinadas; e
- 30 (g) ajustar o modelo inicial e a repetição de (d), (e) e (f) até que

as diferenças entre as respostas de etapa estimadas e as respostas de etapa determinadas alcancem um mínimo ou diminuam abaixo de um limiar selecionado.

5 10. Método, de acordo com a reivindicação 8, em que o campo eletromagnético é administrado mediante a passagem da corrente elétrica através de um transmissor, em que a corrente compreende ao menos um dentre ligar a corrente, desligar a corrente, reverter a polaridade da corrente e comutar a corrente em uma sequência codificada.

10 11. Método, de acordo com a reivindicação 8, em que a determinação da resposta de etapa compreende a determinação da resposta de impulso e a integração da resposta de impulso.

15 12. Método, de acordo com a reivindicação 11, em que a determinação da resposta de impulso compreende a deconvolução da resposta eletromagnética medida com uma forma de onda de uma corrente elétrica usada para administrar o campo eletromagnético.

13. Método, de acordo com a reivindicação 8, em que a resposta eletromagnética medida compreende as medições das voltagens administradas através dos pares de eletrodos.

20 14. Método, de acordo com a reivindicação 8, em que a resposta de etapa que corresponde substancialmente a resistividade horizontal compreende a resposta eletromagnética a uma onda de ar.

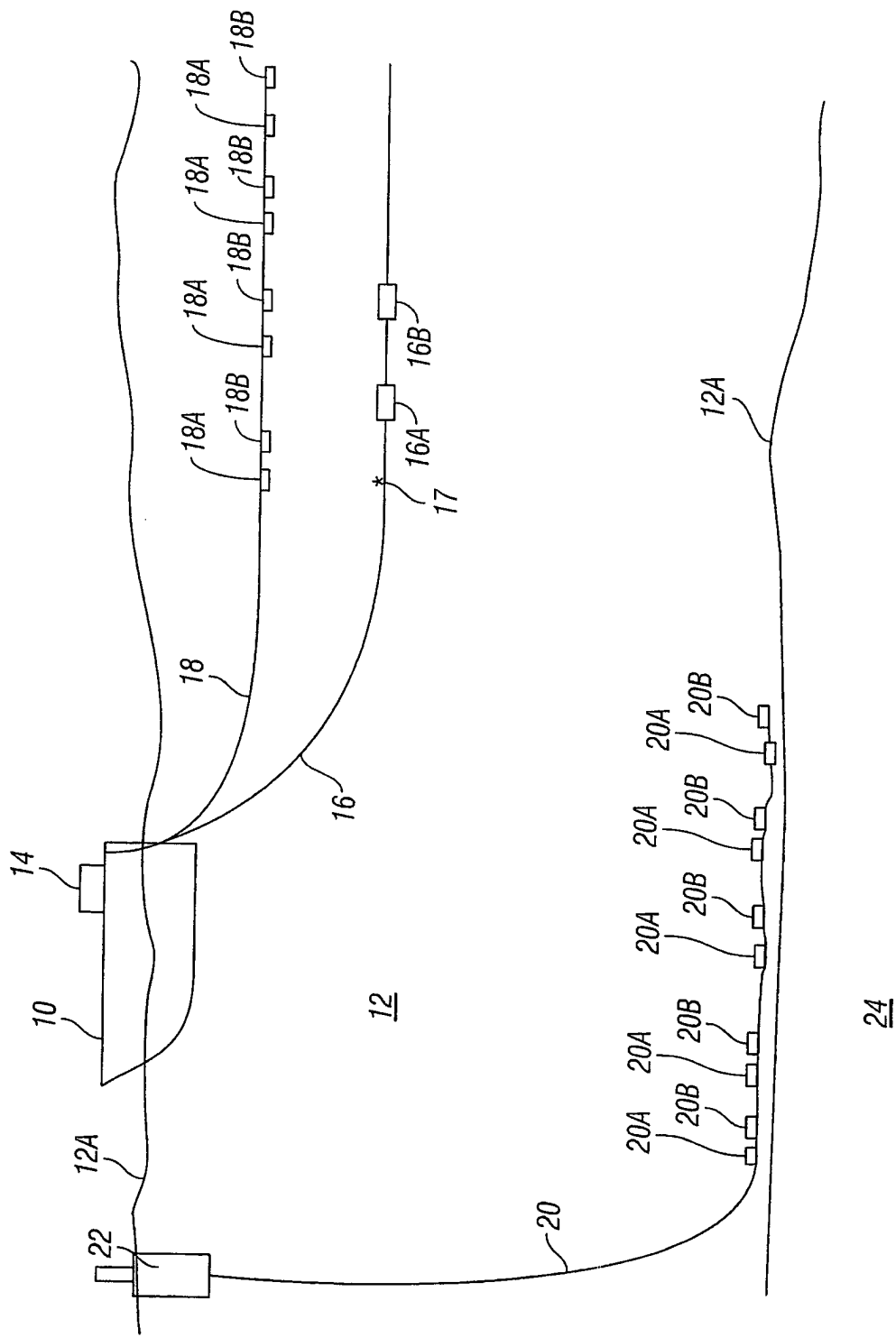


FIG. 1

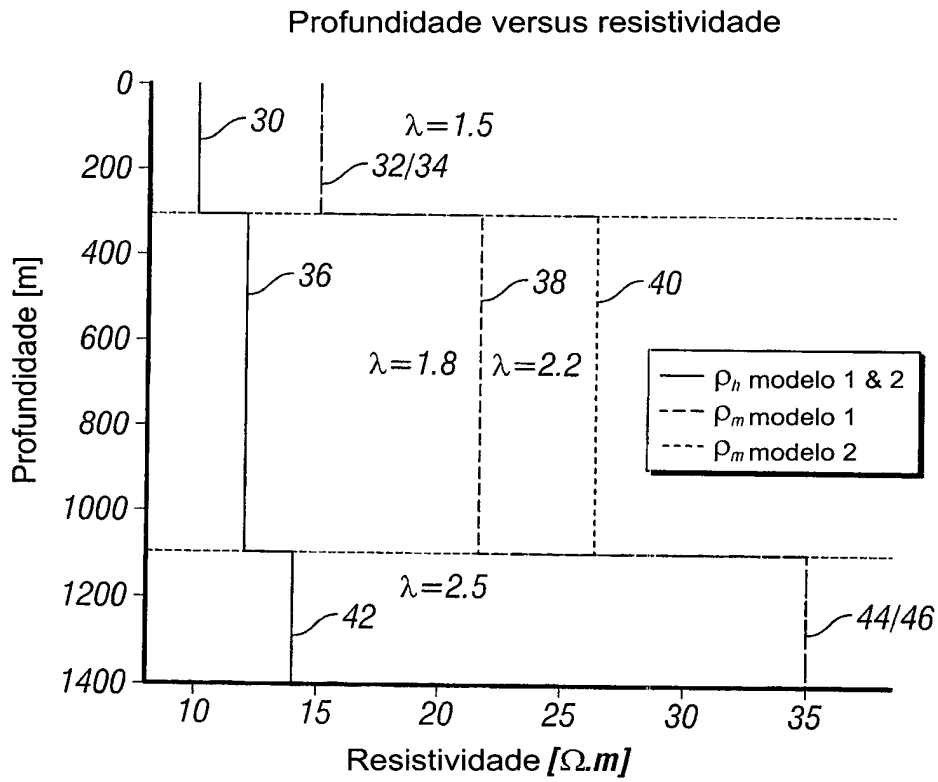


FIG. 2

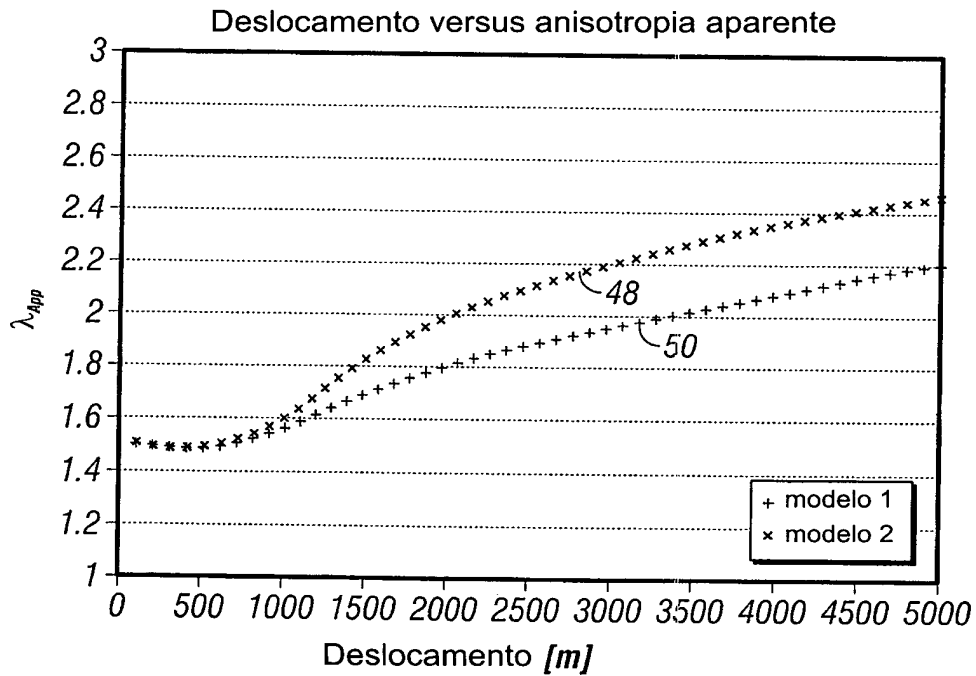


FIG. 3

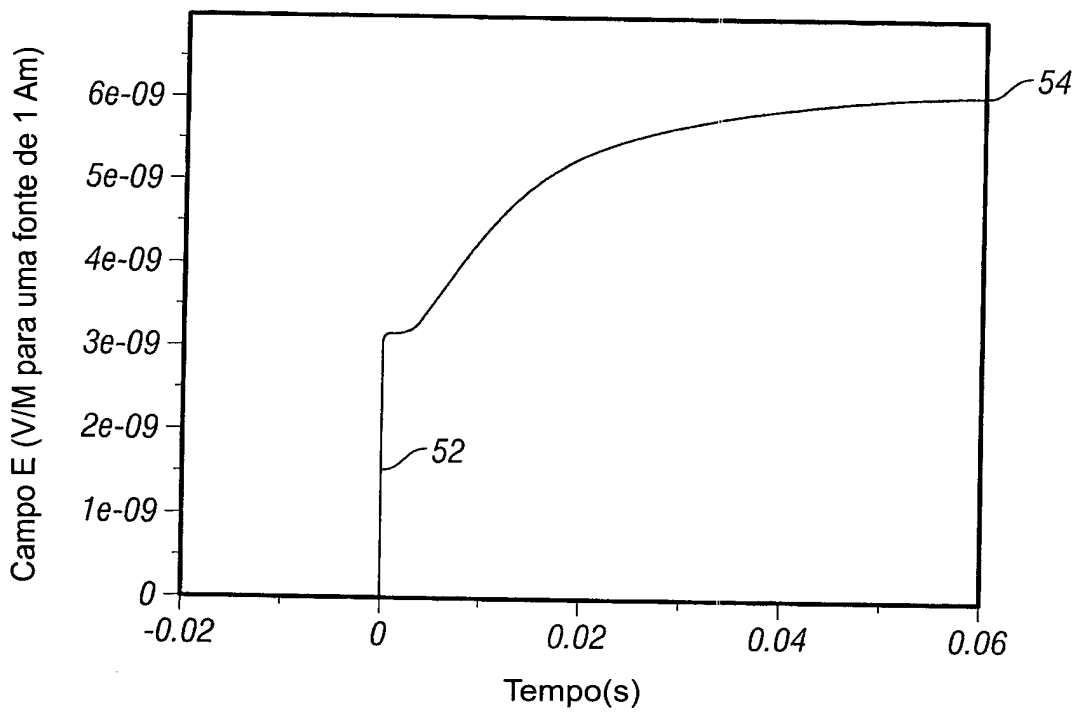


FIG. 4

RESUMO

Patente de Invenção: **"MÉTODO PARA A DETERMINAÇÃO DE ANISOTROPIA DE RESISTIVIDADE A PARTIR DE RESPOSTAS ELETROMAGNÉTICAS DA TERRA"**.

5 A presente invenção refere-se a um método para a determinação de anisotropia de resistividade de formações de rocha de subsuperfície, a partir de medições de resposta a um campo eletromagnético transiente administrado na subsuperfície e medida em uma pluralidade de distâncias a partir de uma posição da administração, que inclui esta para cada deslocamento, uma resposta de etapa das formações é determinada em um momento a partir da administração selecionado de modo que a resposta de etapa esteja somente substancialmente relacionada à resistividade horizontal e em um momento a partir da administração selecionado de modo que a resposta de etapa esteja somente substancialmente relacionada à resistividade média. A resposta de etapa de resistividade horizontal e a resposta de etapa de resistividade média são usadas para determinar a anisotropia de resistividade.

10

15