



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

(21) **PI1002669-0 A2**



(22) Data de Depósito: 15/07/2010  
(43) Data da Publicação: 26/07/2011  
(RPI 2116)

(51) *Int.Cl.:*  
G01V 3/12 2006.01

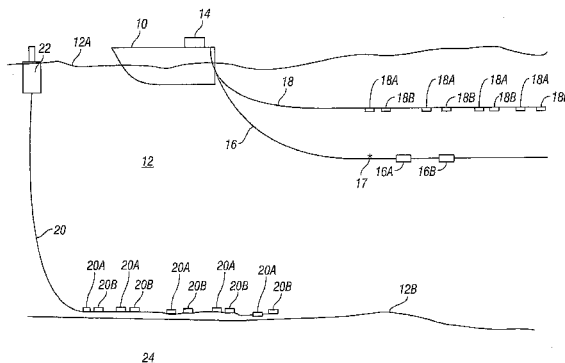
(54) Título: **MÉTODO PARA DETERMINAR A ANISOTROPIA DE RESISTIVIDADE A PARTIR DA RESPOSTA TRANSITÓRIA ELETROMAGNÉTICA AO DEGRAU DA TERRA E DE RESPOSTA TRANSITÓRIA ELETROMAGNÉTICA AO IMPULSO DE PICO**

(30) Prioridade Unionista: 15/07/2009 US 12/460,183

(73) Titular(es): PGS Geophysical AS

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

(57) **Resumo:** MÉTODO PARA DETERMINAR A ANISOTROPIA DE RESISTIVIDADE A PARTIR DA RESPOSTA TRANSITÓRIA ELETROMAGNÉTICA AO DEGRAU DA TERRA E DE RESPOSTA TRANSITÓRIA ELETROMAGNÉTICA AO IMPULSO DE PICO. A presente invenção refere-se a um método para determinar a anisotropia de resistividade de formações rochosas de subsuperfície, que inclui a transmissão de um campo eletromagnético transitório nas formações rochosas de subsuperfície. A resposta eletromagnética das formações é medida em uma pluralidade de desvios a partir de uma posição da transmissão. Para cada deslocamento, um tempo de chegada a partir da transmissão é determinado de um pico de uma resposta ao impulso, de tal modo que a resposta refira-se a resistividades horizontal e vertical de subsuperfície. Para cada deslocamento, uma resposta ao degrau das formações é determinada em um tempo a partir da transmissão, selecionado de tal modo que a resposta ao degrau seja relacionada substancialmente apenas com a resistividade média. O tempo de chegada do pico da resposta ao impulso e o valor de tempo tardio da resposta ao degrau são usados para determinar a anisotropia de resistividade.





PI1002669-0

Relatório Descritivo da Patente de Invenção para "MÉTODO  
PARA DETERMINAR A ANISOTROPIA DE RESISTIVIDADE A PARTIR  
DA RESPOSTA TRANSITÓRIA ELETROMAGNÉTICA AO DEGRAU DA  
TERRA E DE RESPOSTA TRANSITÓRIA ELETROMAGNÉTICA AO IM-  
5 PULSO DE PICO".

REFERÊNCIA CRUZADA AOS PEDIDOS AFINS

Não aplicável.

DECLARAÇÃO REFERENTE À PESQUISA OU AO DESENVOLVIMENTO  
PATROCINADO PELO GOVERNO FEDERAL

10 Não aplicável.

ANTECEDENTES DA INVENÇÃO

Campo da Invenção

A presente invenção refere-se, de modo geral, ao campo de le-  
vantamento eletromagnético de formações na subsuperfície da Terra. Mais  
15 particularmente, a invenção se refere a métodos para determinar a anisotro-  
pia de resistividade elétrica em formações de subsuperfície usando medi-  
ções eletromagnéticas.

Técnica Antecedente

O levantamento eletromagnético é usado, entre outras finalida-  
20 des, para determinar a presença de estruturas contendo hidrocarboneto na  
subsuperfície da Terra. A presença de estruturas contendo hidrocarboneto é  
tipicamente inferida pela determinação da presença de alta resistividade na  
subsuperfície, porque a alta resistividade é associada a formações de sub-  
superfície que apresentam hidrocarbonetos dispostos nos espaços de poro  
25 nas mesmas.

O levantamento eletromagnético inclui o que é chamado de téc-  
nicas de levantamento "de fonte controlada". As técnicas de levantamento  
eletromagnético de fonte controlada incluem a transmissão de uma corrente  
elétrica ou de um campo magnético na Terra, quando tais levantamentos  
30 forem conduzidos na terra, ou a transmissão dos mesmos em sedimentos  
abaixo do fundo d'água (fundo do mar), quando tais levantamentos forem  
conduzidos em um ambiente marinho. As técnicas incluem a medição de

tensões e/ou campos magnéticos induzidos em eletrodos, antenas e/ou magnetômetros dispostos na superfície da Terra, no fundo do mar ou em uma profundidade selecionada na água. As tensões e/ou os campos magnéticos são induzidos por interação do campo magnético causada pela corrente elétrica e/ou campo magnético aplicado na subsuperfície da Terra (através do fundo d'água em levantamentos marinhos) com as formações da Terra de subsuperfície.

Levantamentos eletromagnéticos marinhos de fonte controlada conhecidos na técnica incluem a transmissão de corrente elétrica alternada nos sedimentos abaixo do fundo d'água por meio da transmissão de corrente originária de uma fonte, geralmente disposta em uma embarcação de levantamento, em um eletrodo bipolar rebocado pela embarcação de levantamento. O eletrodo bipolar é tipicamente um cabo elétrico isolado apresentando dois eletrodos no mesmo em um espaçamento selecionado, às vezes, de 300 a 1000 metros ou mais. A corrente alternada apresenta 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 d'água em localizações espaçadas entre si, e os elementos detectores são conectados a dispositivos que registram as tensões induzidas através de vários pares de tais eletrodos. Tais levantamentos são conhecidos como levantamentos eletromagnéticos de fonte controlada por domínio de frequência.

Outra técnica de fonte controlada para levantamentos eletromagnéticos de formações da subsuperfície da Terra conhecida na técnica são os levantamentos eletromagnéticos transitórios de fonte controlada. Nos levantamentos eletromagnéticos transitórios de fonte controlada, uma corrente elétrica ou um campo magnético será aplicado na Terra, quando tais levantamentos forem conduzidos na terra, ou aplicados em sedimentos abaixo do fundo d'água (fundo do mar), quando tais levantamentos forem conduzidos em um ambiente marinho usando eletrodos em um cabo similar àqueles explicados acima, conforme usados para levantamentos de domínio de frequência. A corrente elétrica pode ser corrente contínua (CC). Em um tempo ou tempos selecionados, a corrente elétrica é comutada, e tensões

induzidas são medidas, tipicamente com relação ao tempo sobre um intervalo de tempo selecionado, com o uso de eletrodos dispostos na terra ou na coluna de água ou no fundo d'água, conforme anteriormente explicado com referência aos levantamentos no domínio de frequência. A estrutura e a  
5 composição da subsuperfície da Terra são inferidas pela distribuição de tempo e de espaço das tensões induzidas. As técnicas de levantamento t-CSEM são descritas, por exemplo, na Publicação do Pedido de Patente Internacional Nº WO 2007/104949 A1, intitulada *Otimização de Parâmetros MTEM*.

10 Um dos parâmetros específicos determinados a partir da distribuição de tempo de tensões induzidas é a resistividade elétrica das formações de subsuperfície. Com a adequação das medições de resposta eletromagnética espacialmente distribuída, é possível gerar uma imagem tridimensional da distribuição espacial da resistividade elétrica na subsuperfície  
15 da Terra.

Técnicas conhecidas na técnica para determinar a distribuição espacial de resistividade elétrica usando medições de levantamento eletromagnético tipicamente assumem que a resistividade elétrica é isotrópica, isto é, a resistividade é igual em qualquer formação rochosa de subsuperfície  
20 específica independente da direção do fluxo de corrente elétrica usado para fazer as medições. No entanto, é conhecido na técnica que a resistividade elétrica de algumas formações rochosas é anisotrópica. A anisotropia de resistividade está presente em algumas formações rochosas em uma variedade de escalas de micro (por exemplo, variação de conectividade da água  
25 dos poros de tamanho de grão) a macro (por exemplo, sequências lamina-das de areia-xisto). Vide, por exemplo, a Patente U.S. Nº 6.643.589, emitida para Zhang e outros, e a Patente U.S. Nº 7.269.515, emitida para Tabarovsky e outros. Estas duas patentes descrevem técnicas para determinar a resistividade elétrica e a anisotropia de resistividade de dentro de poços per-  
30 furados através de formações rochosas de subsuperfície. Contudo, tais técnicas não são aplicáveis para serem usadas com levantamentos eletromagnéticos conduzidos a partir de cima das formações rochosas de interesse.

Há a necessidade de técnicas de levantamento eletromagnético que respondam pela anisotropia de resistividade.

### SUMÁRIO DA INVENÇÃO

Um método, de acordo com um aspecto da invenção, para determinar anisotropia de resistividade de formações rochosas de subsuperfície inclui a transmissão de um campo eletromagnético transitório nas formações rochosas de subsuperfície. A resposta eletromagnética das formações é medida em uma pluralidade de desvios a partir de uma posição de transmissão. Para cada deslocamento, um tempo de chegada a partir da transmissão é determinado de um pico de uma resposta ao impulso, de tal modo que a resposta seja relacionada a resistividades horizontal e vertical de subsuperfície. Para cada deslocamento, uma resposta ao degrau das formações é determinada em um tempo a partir da transmissão, selecionado de tal modo que a resposta ao degrau seja relacionada substancialmente apenas com a resistividade média. O tempo de chegada do pico da resposta ao impulso e o valor de tempo tardio da resposta ao degrau são usados para determinar a anisotropia de resistividade.

Outros aspectos e vantagens da invenção se tornarão evidentes a partir da descrição e das reivindicações apresentadas a seguir.

### 20 BREVE DESCRIÇÃO DOS DESENHOS

A figura 1 mostra um sistema exemplificativo para adquirir medições eletromagnéticas usadas com a invenção.

A figura 2 mostra um modelo de três camadas de resistividades de formações rochosas de subsuperfície apresentando coeficientes de anisotropia selecionados.

A figura 3 mostra gráficos de coeficientes de anisotropia evidentes com relação ao deslocamento para as formações de modelo mostradas na figura 2.

A figura 4 mostra uma "resposta ao degrau" de tempo tardio de formações de subsuperfície para um campo eletromagnético transitório.

A figura 5 mostra uma resposta ao impulso de formação exemplificativa para um campo eletromagnético transitório.

A figura 6 mostra um computador programável e meios legíveis por computador.

#### DESCRIÇÃO DETALHADA

A figura 1 mostra um sistema de levantamento eletromagnético marinho exemplificativo que pode adquirir sinais de levantamento eletromagnético transitório de fonte controlada para processamento, de acordo com a invenção. O sistema de levantamento pode incluir uma embarcação de levantamento 10 que se move ao longo da superfície 12A de um corpo de água 12, tal como um lago ou o oceano. A embarcação 10 pode incluir na mesma um equipamento, convenientemente denominado "sistema de registro" e mostrado, em geral, em 14, para aplicar corrente ou um transmissor para gerar campos eletromagnéticos a serem aplicados nas formações 24 abaixo do fundo d'água 12 e para registrar medições formadas em resposta aos campos eletromagnéticos aplicados. O sistema de registro 14 pode incluir dispositivos de navegação (nenhum mostrado separadamente para fins de clareza da ilustração) para determinar a posição geodésica da embarcação 10. A embarcação 10 pode incluir um equipamento adicional para determinar a posição geodésica e/ou anterior de um ou mais transmissores e receptores eletromagnéticos (descritos abaixo), dispositivos para aplicar corrente elétrica ao(s) transmissor(es), e um equipamento de armazenamento de dados para registrar sinais detectados por meio de um ou mais receptores eletromagnéticos.

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 tempos selecionados, o sistema de registro 14 pode passar corrente elétrica através dos eletrodos 16A, 16B. A corrente é preferivelmente configurada para induzir campos eletromagnéticos transitórios nas formações 24 abaixo do fundo d'água 12B. Exemplos de tal corrente incluem corrente contínua comutada, onde a corrente pode ser ativada, desativada, ter polaridade invertida, ou ser comutada em um conjunto extenso de eventos de comutação, tal como uma sequência binária pseudoaleatória ("PRBS") ou outra sequên-

cia codificada.

No presente exemplo, a embarcação 10 pode rebocar um ou mais cabos receptores 18 apresentando na mesma uma pluralidade de receptores eletromagnéticos, tais como eletrodos bipolares 18A, 18B, dispostos em posições espaçadas entre si ao longo do cabo. Os eletrodos bipolares 18A, 18B terão tensões aplicadas através deles relacionadas à amplitude do componente de campo elétrico do campo eletromagnético que emana das formações 24 em resposta ao campo eletromagnético aplicado. O sistema de registro 14 na embarcação 10 pode incluir, conforme explicado acima, dispositivos para registrar os sinais gerados pelos eletrodos 18A, 18B. O registro de resposta de cada receptor é tipicamente indexado com 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 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.

No presente exemplo, em substituição ou além do cabo receptor 18 rebocado pela embarcação 10, um cabo receptor inferior de água 20 pode ser disposto ao longo do fundo d'água 12, e pode incluir uma pluralidade de receptores, tais como os eletrodos bipolares 20A, 20B de configuração similar à dos eletrodos bipolares 18A, 18B no cabo rebocado. Os eletrodos 20A, 20B podem estar em comunicação de sinal com uma bóia de registro 22 ou dispositivo similar, seja próximo da superfície da água 12A ou no fundo d'água, que pode registrar sinais detectados pelos eletrodos 20A, 20B.

Será apreciado por aqueles versados na técnica que a invenção não é limitada no escopo às disposições de transmissor e receptor mostradas na figura 1. Outros exemplos podem usar, em substituição ou adicionalmente aos eletrodos bipolares mostrados na figura 1, bobinas de arame ou laços de arame para que o transmissor confira um campo magnético de variação de tempo nas formações 24. Os cabos receptores 18, 20 podem incluir outros dispositivos de detecção, tais como magnetômetros, laços ou bobi-

nas de arame, para detectar o componente de campo magnético do campo eletromagnético induzido da formação 24. Independente do tipo de receptor usado em qualquer implementação, os receptores eletromagnéticos tipicamente geram um sinal elétrico ou óptico correspondendo a uma magnitude do parâmetro de campo eletromagnético que é medido ou um tempo derivativo do mesmo.

Para fins de explicar a invenção, os receptores eletromagnéticos podem ser geralmente dispostos ao longo de uma linha comum com o transmissor durante o registro de sinal. Os registros de sinais de cada um dos respectivos receptores podem ser formados com o transmissor disposto em localizações selecionadas ao longo da linha comum e acionados conforme explicado acima. O sinal registrado correspondendo a cada receptor eletromagnético será associado a uma distância, denominada "deslocamento", que é localizada no ponto intermediário geodésico entre a posição geodésica do receptor e a posição geodésica do transmissor no momento do registro de sinal. Desse modo, sinais correspondendo a uma pluralidade de desvios podem ser adquiridos usando um sistema, tal como mostrado na figura 1. A finalidade de múltiplos registros de deslocamento, na medida em que se refere à invenção, será adicionalmente explicada abaixo.

Conforme explicado na seção "Antecedente", algumas formações podem ser eletricamente anisotrópicas, apresentando consequentemente uma resistividade anisotrópica. Para fins da presente invenção, a anisotropia de resistividade será limitada ao caso de formações isotrópicas verticalmente transversais ("VTT"), isto é, formações que apresentam uma resistividade "vertical" diferente (por exemplo, resistividade medida usando fluxo de corrente em uma direção perpendicular aos planos divisórios da formação, que pode ser considerada horizontal para fins de explanação) do que a resistividade "horizontal" (resistividade medida usando fluxo de corrente em uma direção paralela aos planos divisórios da formação). As formações VTI são consideradas como tendo a mesma resistividade horizontal independente da direção azimutal ao longo da qual é feita a medição. Tais formações são também conhecidas como tendo um eixo vertical de simetria.

Tal anisotropia de resistividade é conhecida como tendo uma grande influência sobre as respostas eletromagnéticas da Terra. Em particular, a anisotropia afeta a resposta ao impulso da Terra e sua resposta ao degrau. As respostas anteriores são determinadas nos métodos de levantamento eletromagnético transitório de fonte controlada. Se a área da subsuperfície de interesse for eletricamente anisotrópica, e se os dados de levantamento eletromagnético forem tratados como isotrópicos, os procedimentos de inversão usados para inferir a distribuição espacial de resistividade irão, conforme explicado acima, produzir resultados incorretos.

Será apreciado por aqueles versados na técnica que a resposta ao impulso da Terra pode ser determinada pela medição direta depois de um único campo eletromagnético transitório ser aplicado nas formações, ou pela deconvolução das medições do receptor eletromagnético pela forma de onda de corrente de transmissor, se sequências codificadas forem usadas, por exemplo, PRBS, e que a resposta ao degrau da Terra pode ser determinada pela integração da resposta ao impulso da Terra assim determinada.

Na presente invenção, um valor de tempo tardio da resposta ao degrau da Terra e um tempo de chegada do pico da resposta ao impulso da Terra são usados para definir uma anisotropia aparente. Para ser consistente com a definição da resistividade aparente, a anisotropia aparente pode ser definida como a anisotropia calculada para um meio-espaço comum usando equações que definem a anisotropia para um meio-espaço uniforme. A anisotropia aparente é então usada para determinar as anisotropias de resistividade das formações de subsuperfície através de um procedimento de inversão. Uma explanação de um método de acordo com a invenção é apresentada a seguir. Para uma camada eletricamente anisotrópica ou meio-espaço, no qual a resistividade horizontal  $\rho_h$  é igual em todas as direções horizontais e onde a resistividade vertical  $\rho_v$  pode diferir da resistividade horizontal (o caso isotrópico verticalmente transversal ou VTI assim chamado), o coeficiente de anisotropia é definido por

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

Para tal meio-espço, foi derivada uma expresso analítica para a resposta ao impulso da Terra, a partir da qual pode ser deduzida a seguinte equao para o tempo de chegada do pico da resposta ao impulso da Terra,  $T_{peak}$ , como uma funo de  $\lambda$ :

$$\exp\left\{-\frac{\tau}{T_{peak}}\left(1-\frac{1}{\lambda^2}\right)\right\} = \frac{3\lambda^4 T_{peak}^2 + 8\tau\lambda^2 T_{peak} - 4\tau^2}{\lambda^4 t(3T_{peak} - 2\tau)} \quad (2)$$

5 onde  $\tau = \frac{\mu r^2}{4\rho_h}$ ,  $\mu$  representa a permeabilidade magntica do meio-espço e  $r$  representa o deslocamento entre o transmissor e o receptor especfico. Tanto o transmissor como o receptor especfico sso dispostos acima do meio-espço.

Foi determinado que, para um levantamento conduzido na terra  
10 (e para um levantamento marinho com o efeito de "onda de ar" removido ou atenuado), quando a formao de subsuperfcie for assumida como sendo um meio-espço VTI, ento, o valor de tempo tardio ( $t$  se aproxima de infinidade) da resposta ao degrau da Terra (que a integral da resposta ao impulso) poder ser usado para determinar a resistividade mdia geomtrica,  
15 definida por  $\rho_m = \sqrt{\rho_v \rho_h}$ , usando a expresso:

$$E_x(r, \infty) = \frac{\rho_m}{\pi r^3}, \quad (3)$$

onde  $E_x(r, t)$  a resposta ao degrau em linha (ao longo da direo do componente de campo eltrico do campo eletromagntico aplicado) da Terra para um valor de deslocamento  $r$  no tempo  $t$ .

Uma soluo (numrica) exata para o coeficiente de anisotropia  
20 em um meio-espço uniforme (isto a, o meio-espço apresenta as mesmas propriedades em todo o lugar), e, portanto, para a anisotropia aparente em um meio-espço VTI comum (isto a, os valores de resistividade podem ser diferentes em diferentes posies dentro do meio-espço, mas a anisotropia a VTI em qualquer lugar), pode ser obtida a partir das equaes (2) e (3)  
25 usando a seguinte tcnica:

A partir do valor de tempo tardio da resposta ao degrau da Terra em um deslocamento selecionado  $r$ , usar a equao (3) para determinar a resistividade mdia  $\rho_m$ . A partir da resposta ao impulso da Terra no mesmo

deslocamento  $r$ , determinar o tempo de chegada de pico  $T_{peak}$ . Agora, definir um tempo característico:

$$\tau_m = \frac{\tau}{\lambda} = \frac{\mu r^2}{4\rho_h \lambda} = \frac{\mu r^2}{4\rho_m}, \quad (4)$$

registrar novamente a equação (2) em termos de um único  $\lambda_{app}$  desconhecido:

$$\exp\left\{-\frac{\tau_m}{T_{peak}}\left(\lambda_{app} - \frac{1}{\lambda_{app}}\right)\right\} = \frac{3\lambda_{app}^2 T_{peak}^2 + 8\tau_m \lambda_{app} T_{peak} - 4\tau_m^2}{\lambda_{app}^2 T_{peak} (3T_{peak} - 2\tau_m \lambda_{app})} \quad (5)$$

5 e solucionar a equação (5) numericamente para o coeficiente de anisotropia aparente  $\lambda_{app}$ .

Haverá inúmeras fórmulas empíricas que proveem vários níveis de aproximação para a anisotropia aparente com relação àquele fornecido pela equação (5).

10 Uma primeira aproximação é a seguinte. Para um meio-espaco eletricamente isotrópico apresentando uma resistividade indicada por  $\rho$ , o tempo de chegada do pico da resposta ao impulso da Terra depois da transmissão de um campo eletromagnético transitório na mesma pode ser determinado pela expressão:

$$T_{peak}(r) = \frac{\mu r^2}{10\rho}. \quad (6)$$

15 Também foi determinado que o tempo de chegada do pico da resposta ao impulso da Terra é predominantemente dependente da resistividade vertical e assim da Equação (6) para uma primeira aproximação:

$$T_{peak}(r) = \frac{\mu r^2}{10\rho_v} \quad (7)$$

20 As equações (3) e (7) podem ser usadas para definir uma primeira aproximação  $\lambda_{app(1)}$  da anisotropia aparente, de acordo com a expressão:

$$\lambda_{app(1)}(r) = \frac{\rho_v}{\rho_m} = \frac{\mu}{10\pi r T_{peak}(r) E_x(r, \infty)}$$

Entretanto, uma melhor aproximação do tempo de chegada do pico da resposta ao impulso da Terra foi derivada empiricamente, e é determinada pela expressão:

$$T_{peak}(r) = \frac{\mu r^2}{9\rho_v + \rho_h} \quad (8)$$

Uma segunda aproximação boa do coeficiente de anisotropia  $\lambda_{app(2)}$  pode ser agora obtida com o uso das Equações (3) e (8), com  $\rho_v = \rho_m \lambda_{app(2)}$  e  $\rho_h = \rho_m / \lambda_{app(2)}$ . Depois,  $\lambda_{app(2)}$  satisfaz a equação quadrática:

$$9\lambda_{app(2)}^2 - \frac{\mu}{\pi r E_x(r, \infty) T_{peak}(r)} \lambda_{app(2)} + 1 = 0 \quad (9)$$

e a raiz maior da Equação (9) é uma solução apropriada. Nesta aproximação, o coeficiente de anisotropia aparente para qualquer deslocamento  $r$  pode ser definido como:

$$\lambda_{app(2)}(r) = \frac{1}{18\pi r E_x(r, \infty)} \left\{ \frac{\mu}{T_{peak}(r)} + \sqrt{\frac{\mu^2}{T_{peak}^2(r)} - 36\pi^2 r^2 E_x^2(r, \infty)} \right\} \quad (10)$$

Será apreciado por aqueles versados na técnica que a invenção não é limitada às aproximações para a anisotropia aparente fornecida explicitamente acima.

À medida que aumenta o deslocamento, as respostas dos sinais detectados pelos receptores eletromagnéticos são influenciadas em um grau correspondente por seções mais profundas da subsuperfície, e assim  $\lambda_{app}(r)$  (e suas aproximações empíricas) varia em resposta à variação de anisotropia com profundidade.

Para testar as relações acima, foram usadas formações de subsuperfície de modelo de três camadas, uma isotrópica e duas anisotrópicas, mostradas graficamente na figura 2. Os modelos anisotrópicos diferem dentro da segunda camada, que apresenta um coeficiente de anisotropia de 1,4 para o primeiro modelo e de 1,8 para o segundo modelo. A resistividade média da primeira camada 30, da segunda camada 32 e da terceira camada 34 é de 20 ohm-metros. A resistividade horizontal da primeira camada 30 e da terceira camada 34 é também de 20 ohm-metros (tais camadas sendo assim isotrópicas). Em um modelo, a segunda camada apresenta um coeficiente de anisotropia de 1,4, indicado pela curva 38. Em um modelo, a segunda camada apresenta um coeficiente de anisotropia de 1,8, indicado pela curva 40. O modelo isotrópico é mostrado pela curva 36.

A anisotropia aparente com relação ao deslocamento para cada um dos três modelos da figura 2 é mostrada na figura 3. O caso isotrópico é mostrado na curva 42. A resposta do modelo apresentando uma segunda camada com coeficiente de anisotropia 1,4 é mostrada pela curva 44. A resposta do modelo onde a segunda camada apresenta coeficiente de anisotropia de 1,8 é mostrada na curva 46. Para as curvas 42, 44 e 46, são mostradas tanto a solução numérica exata fornecida pela solução da Equação (5) como uma aproximação obtida empiricamente usando a Equação (10) em 42A, 44A e 46A, respectivamente. A partir da figura 3, pode ser observado que  $\lambda_{app}(r)$  é distinguido entre os três modelos anteriores da subsuperfície.

Uma distribuição espacial de resistividade e de anisotropia de resistividade na subsuperfície da Terra pode ser determinada a partir de medições feitas com o uso do sistema mostrado na figura 1, que responde pela anisotropia, conforme explicado acima, usando inversão. A variação de anisotropia aparente com relação ao deslocamento explicado acima pode ser usada primeiramente para selecionar valores iniciais de coeficientes de anisotropia (usando, por exemplo, uma relação empírica para deslocamento com relação à profundidade) e, em segundo lugar, como uma limitação sobre os valores de coeficientes de anisotropia determinados na inversão de resistividade. Em cada degrau iterativo na inversão de resistividade, são determinadas as resistividades de camada  $\rho_h$  e  $\rho_v$  e a "modelagem avançada" (cálculo da resposta ao degrau e da resposta ao impulso esperadas para o modelo) determina  $\lambda_{app}^{calc}(r)$ . O valor calculado anterior do coeficiente de anisotropia aparente é comparado a  $\lambda_{app}^{meas}(r)$  e o desajuste pode ser usado para atualizar os valores de anisotropia em cada camada. A determinação da estrutura de resistividade de subsuperfície de acordo com um exemplo de um método inclui o seguinte. Obter respostas eletromagnéticas ao degrau e ao impulso em uma pluralidade de desvios com a transmissão de campos eletromagnéticos na subsuperfície e a medição de respostas aos mesmos, conforme explicado com referência à figura 1. Para cada resposta ao degrau da forma mostrada pela curva 47 na figura 4, isto é, para cada deslocamento  $r$ , determinar a amplitude da resposta ao degrau, conforme mostrado em tem-

po tardio  $E_x(r, \infty)$  na figura 4. Depois, para cada resposta ao impulso da forma mostrada na curva 48 na figura 5, isto é, para cada deslocamento  $r$ , determinar o intervalo de tempo entre a iniciação do campo eletromagnético transitório (tempo zero) e a resposta de pico,  $T_{peak}(r)$ . A anisotropia aparente  $\lambda_{app}(r)$  pode ser então computada usando a Equação (5), (7) ou (9) ou qualquer outra aproximação derivada da resposta ao degrau de tempo tardio da Terra e do tempo de chegada de pico da resposta ao impulso da Terra. Valores de anisotropia em cada camada do modelo da subsuperfície da Terra podem ser então atualizados para minimizar o desajuste entre a anisotropia aparente calculada e medida.

Em outro aspecto, a invenção se refere a programas de computador armazenados em meios legíveis por computador. Com referência à figura 6, o processo anterior, conforme explicado com referência às figuras 1-5, pode ser concretizado em código legível por computador. O código pode ser armazenado em um meio legível por computador, tal como disco flexível 164, CD-ROM 162 ou um disco rígido magnético (ou outro tipo) 166 que faz parte de um computador programável de uso comum. O computador, conforme conhecido na técnica, inclui uma unidade de processamento central 150, um dispositivo de entrada de usuário, tal como um teclado 154, e um monitor de usuário 152, tal como um monitor LCD de painel plano ou monitor de tubos de raios catódicos. O computador pode formar parte da unidade de registro (14 na figura 1) ou pode ser outro computador. De acordo com este aspecto da invenção, o meio legível por computador inclui lógica operável para fazer com que o computador execute procedimentos, conforme explicado acima e explicado com relação às figuras anteriores.

Métodos de acordo com a invenção podem prover imagens de resistividade elétrica de formações rochosas de subsuperfície que incluem os efeitos de anisotropia de resistividade usando medições de levantamento eletromagnético transitório.

Enquanto a invenção foi descrita com relação a um número limitado de concretizações, aqueles versados na técnica, com o benefício desta descrição, irão apreciar que outras concretizações poderão ser idealizadas,

as quais não se afastam do escopo da invenção, conforme descrito aqui. Consequentemente, o escopo da invenção deve ser limitado apenas pelas reivindicações anexas.

## REIVINDICAÇÕES

1. Método para determinar a anisotropia de resistividade de formações rochosas de subsuperfície, que compreende:

5 a transmissão de um campo eletromagnético transitório nas formações rochosas de subsuperfície;

a medição da resposta eletromagnética das formações em uma pluralidade de desvios de uma posição da transmissão;

10 para cada deslocamento, a determinação de um tempo de chegada a partir da transmissão de um pico de uma resposta ao impulso, de tal modo que a resposta se refira às resistividades horizontal e vertical;

para cada deslocamento, a determinação de uma resposta ao degrau das formações em um tempo a partir da transmissão, selecionado de tal modo que a resposta ao degrau seja relacionada substancialmente apenas com a resistividade média; e

15 o uso do tempo de chegada do pico da resposta ao impulso e do valor de tempo tardio da resposta ao degrau para determinar a anisotropia de resistividade.

2. Método, de acordo com a reivindicação 1, no qual a transmissão compreende a passagem de corrente elétrica através de um transmissor, a corrente compreendendo pelo menos a ativação de corrente de comutação, a desativação de corrente de comutação, a inversão de polaridade de corrente e a comutação de corrente em uma sequência codificada.

25 3. Método, de acordo com a reivindicação 1, no qual a determinação de resposta ao degrau compreende a determinação de resposta ao impulso e a integração da resposta ao impulso.

4. Método, de acordo com a reivindicação 3, no qual a determinação de resposta ao impulso compreende a deconvolução da resposta eletromagnética medida com uma forma de onda de uma corrente elétrica usada para aplicar o campo eletromagnético.

30 5. Método, de acordo com a reivindicação 1, no qual a medição da resposta eletromagnética compreende a medição de tensões aplicadas através de pares de eletrodos.

6. Método, de acordo com a reivindicação 1, que adicionalmente compreende:

(a) a geração de um modelo inicial das formações de subsuperfície usando a anisotropia de resistividade determinada, o modelo inicial incluindo um valor de resistividade horizontal e um valor de resistividade vertical para pelo menos uma camada usando uma relação empírica de deslocamento com relação à profundidade;

(b) o cálculo de uma resposta ao degrau e de uma resposta ao impulso para o modelo para uma pluralidade de desvios;

(c) a estimativa de um valor de tempo tardio da resposta ao degrau e de um tempo de chegada do pico da resposta ao impulso para cada deslocamento a partir da resposta ao degrau calculada e da resposta ao impulso calculada e o uso do valor de tempo tardio estimado da resposta ao degrau calculada e do tempo de chegada estimado do pico da resposta ao impulso da resposta ao impulso calculada para determinar uma anisotropia aparente calculada;

(d) a comparação da anisotropia aparente determinada a partir da resposta eletromagnética medida com a anisotropia aparente calculada; e

(e) o ajuste do modelo inicial e a repetição de (b), (c) e (d) até que as diferenças entre a anisotropia aparente determinada e a anisotropia aparente calculada alcancem um mínimo ou fiquem abaixo de um limite selecionado.

7. Método para determinar anisotropia de resistividade em formações de subsuperfície usando medições eletromagnéticas feitas em resposta à transmissão de um campo eletromagnético transitório nas formações de subsuperfície, as medições feitas em uma pluralidade de desvios a partir de uma posição na qual o campo eletromagnético foi aplicado, o método compreendendo:

a determinação de uma resposta ao degrau das formações das medições eletromagnéticas em um tempo a partir da transmissão, selecionado de tal modo que a resposta ao degrau seja relacionada substancialmente apenas com a resistividade média das formações;

a determinação de um tempo a partir da transmissão de chegada de um pico de uma resposta ao impulso das medições eletromagnéticas, de tal modo que o tempo de chegada seja relacionado à resistividade horizontal e vertical das formações; e

5 o uso do tempo de chegada de pico da resposta ao degrau e da resposta ao impulso para determinar a anisotropia de resistividade.

8. Método, de acordo com a reivindicação 7, que adicionalmente compreende:

(a) a geração de um modelo inicial das formações de subsuperfície usando a anisotropia de resistividade determinada, o modelo inicial incluindo um valor de resistividade horizontal e um valor de resistividade vertical para pelo menos uma camada usando uma relação empírica de deslocamento com relação à profundidade;

(b) o cálculo de uma resposta ao degrau e de uma resposta ao impulso para o modelo para uma pluralidade de desvios;

(c) a estimativa de um valor de tempo tardio da resposta ao degrau e um tempo de chegada do pico da resposta ao impulso para cada deslocamento da resposta ao degrau calculada e da resposta ao impulso calculada e o uso do valor de tempo tardio estimado da resposta ao degrau calculada e do tempo de chegada estimado do pico da resposta ao impulso da resposta ao impulso calculada para determinar uma anisotropia aparente calculada;

(d) a comparação da anisotropia de resistividade determinada das medições eletromagnéticas com a anisotropia aparente calculada; e

(e) o ajuste do modelo inicial e a repetição de (b), (c) e (d) até que as diferenças entre a anisotropia de resistividade determinada e a anisotropia aparente calculada alcancem um mínimo ou caiam abaixo de um limite selecionado.

9. Método, de acordo com a reivindicação 7, no qual o campo eletromagnético é aplicado pela passagem de corrente elétrica através de um transmissor, a corrente compreendendo pelo menos a ativação de corrente de comutação, a desativação de corrente de comutação, a inversão de

polaridade de corrente e a comutação de corrente em uma sequência codificada.

10. Método, de acordo com a reivindicação 7, no qual a determinação de resposta ao degrau compreende a determinação da resposta ao impulso e a integração da resposta ao impulso.

11. Método, de acordo com a reivindicação 10, no qual a determinação da resposta ao impulso compreende a deconvolução da resposta eletromagnética medida com uma forma de onda de uma corrente elétrica usada para aplicar o campo eletromagnético.

12. Método, de acordo com a reivindicação 7, no qual a resposta eletromagnética medida compreende as medições de tensões aplicadas através de pares de eletrodos.

13. Programa de computador armazenado em um meio legível por computador, o programa apresentando lógica operável para fazer com que um computador programável execute as etapas que compreendem:

a leitura, como medições eletromagnéticas de entrada feitas em resposta à transmissão de um campo eletromagnético transitório nas formações de subsuperfície, das medições formadas em uma pluralidade de desvios de uma posição na qual o campo eletromagnético foi transmitido;

a determinação de uma resposta ao degrau das formações a partir das medições eletromagnéticas de entrada em um tempo a partir da transmissão, selecionada de tal modo que a resposta ao degrau seja relacionada substancialmente apenas com a resistividade média das formações;

a determinação de um tempo a partir da transmissão de chegada de um pico de uma resposta ao impulso das medições eletromagnéticas, de tal modo que o tempo de chegada se refira às resistividades horizontal e vertical das formações; e

o uso do tempo de chegada de pico da resposta ao degrau e da resposta ao impulso para determinar a anisotropia de resistividade.

14. Programa de computador, de acordo com a reivindicação 13, que adicionalmente compreende lógica operável para fazer com que o computador execute:

- (a) a geração de um modelo inicial das formações de subsuperfície usando a anisotropia de resistividade determinada, o modelo inicial incluindo um valor de resistividade horizontal e um valor de resistividade vertical para pelo menos uma camada usando uma relação empírica de deslocamento com relação à profundidade;
- 5 (b) o cálculo de uma resposta ao degrau e de uma resposta ao impulso para o modelo para uma pluralidade de desvios;
- (c) a estimativa de um valor de tempo tardio da resposta ao degrau e de um tempo de chegada do pico da resposta ao impulso para cada deslocamento da resposta ao degrau calculada e da resposta ao impulso calculada e o uso do valor de tempo tardio estimado da resposta ao degrau calculada e do tempo de chegada estimado do pico da resposta ao impulso da resposta ao impulso calculada para determinar uma anisotropia aparente calculada;
- 10 (d) a comparação da anisotropia de resistividade determinada das medições eletromagnéticas com a anisotropia aparente calculada; e
- (e) o ajuste do modelo inicial e a repetição de (b), (c) e (d) até que as diferenças entre a anisotropia de resistividade determinada e a anisotropia aparente calculada alcancem um mínimo ou caiam abaixo de um limite selecionado.
- 15 20
15. Programa de computador, de acordo com a reivindicação 13, no qual o campo eletromagnético é aplicado por passagem de corrente elétrica através de um transmissor, a corrente compreendendo pelo menos a ativação de corrente de comutação, a desativação de corrente de comutação, a inversão de polaridade de corrente e a comutação de corrente em uma sequência codificada.
- 25
16. Programa de computador, de acordo com a reivindicação 15, no qual a determinação da resposta ao degrau compreende a determinação de resposta ao impulso e a integração da resposta ao impulso.
- 30
17. Programa de computador, de acordo com a reivindicação 16, no qual a determinação de resposta ao impulso compreende a deconvolução da resposta eletromagnética medida com uma forma de onda de uma cor-

rente elétrica usada para aplicar o campo eletromagnético.

18. Programa de computador, de acordo com a reivindicação 13, no qual a resposta eletromagnética medida de entrada compreende medições de tensões aplicadas através de pares de eletrodos.

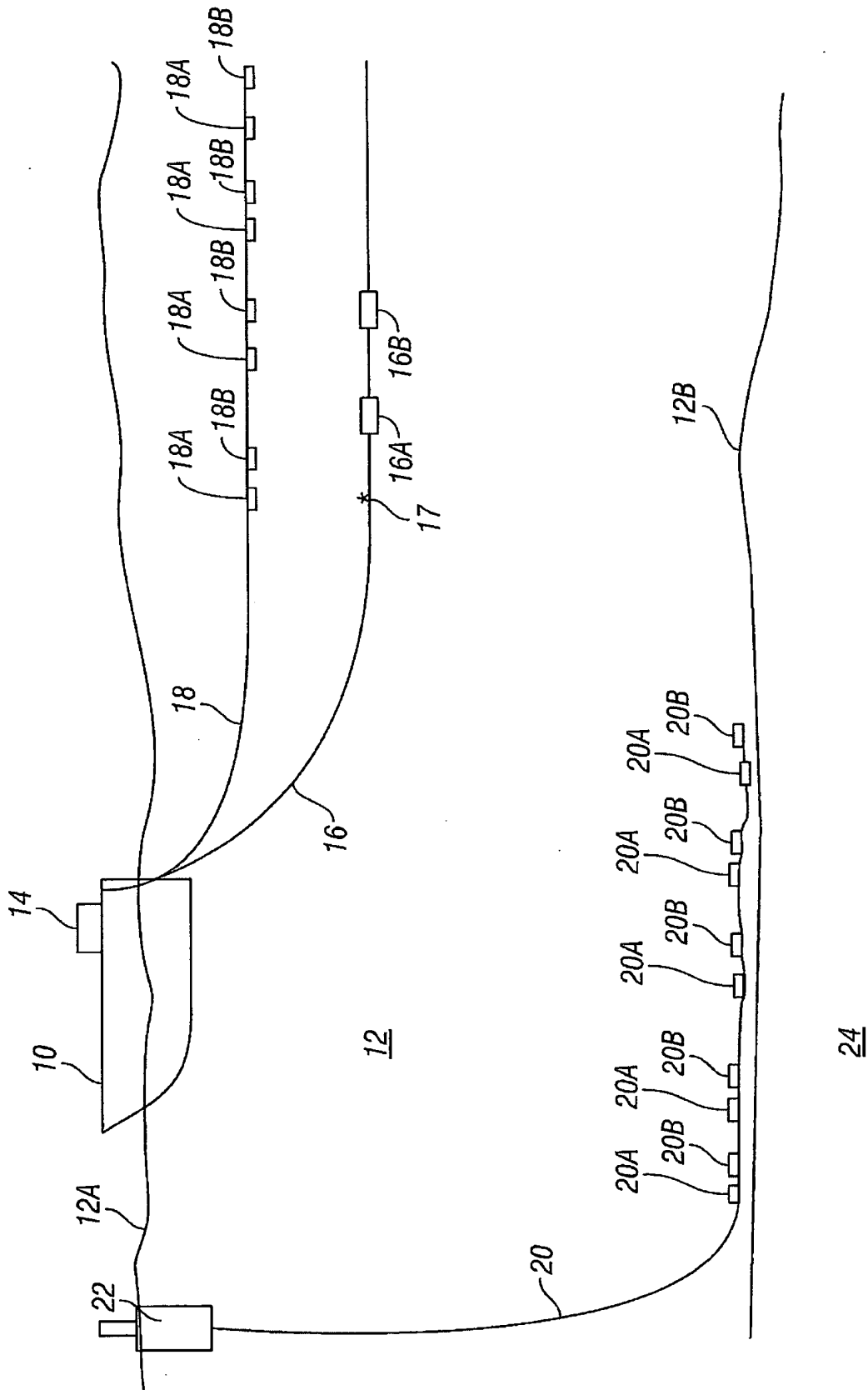


FIG. 1

24

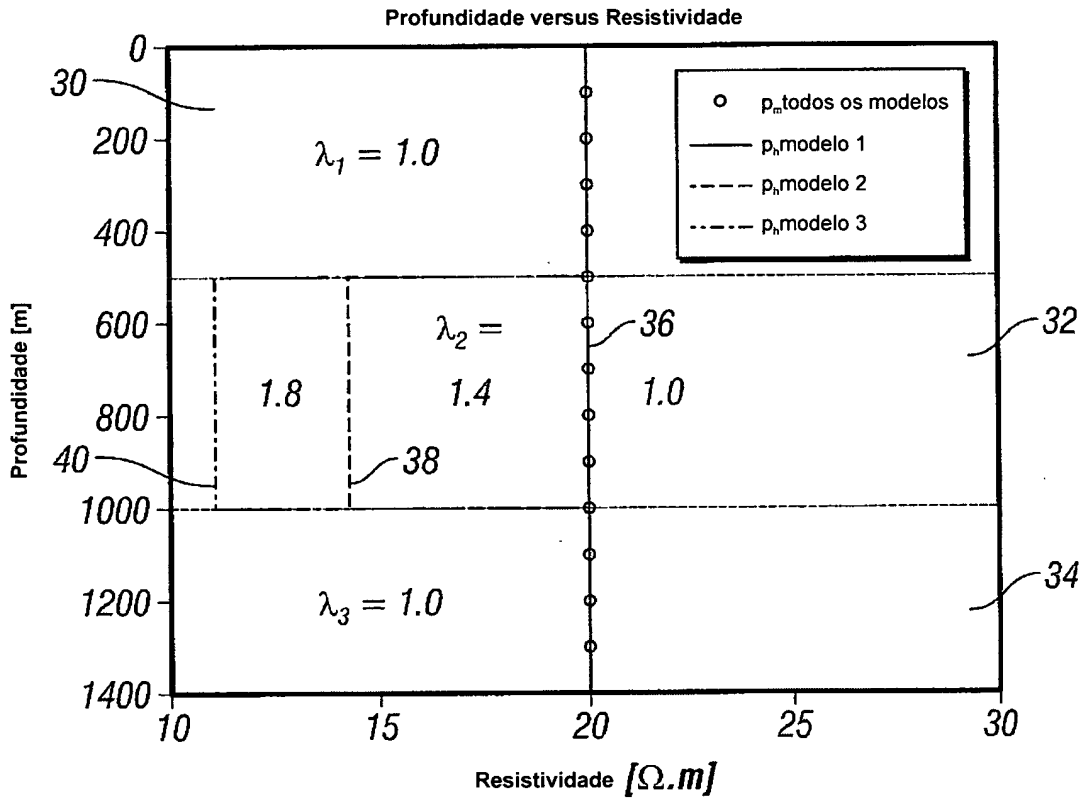


FIG. 2

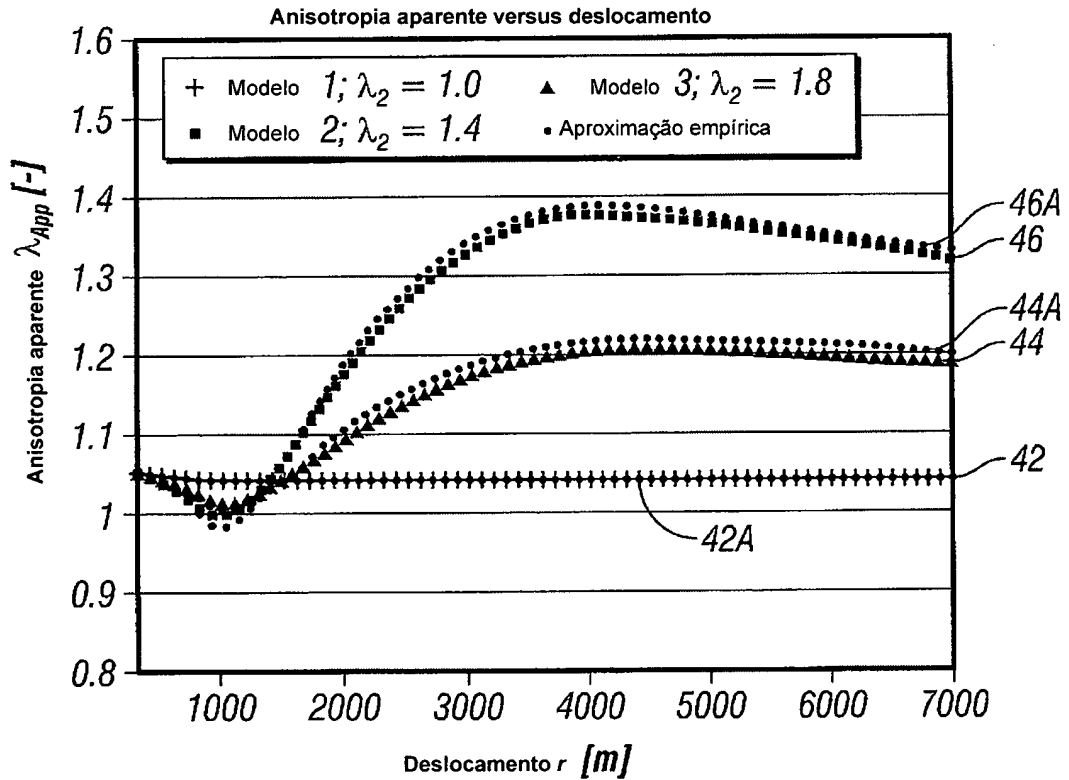


FIG. 3

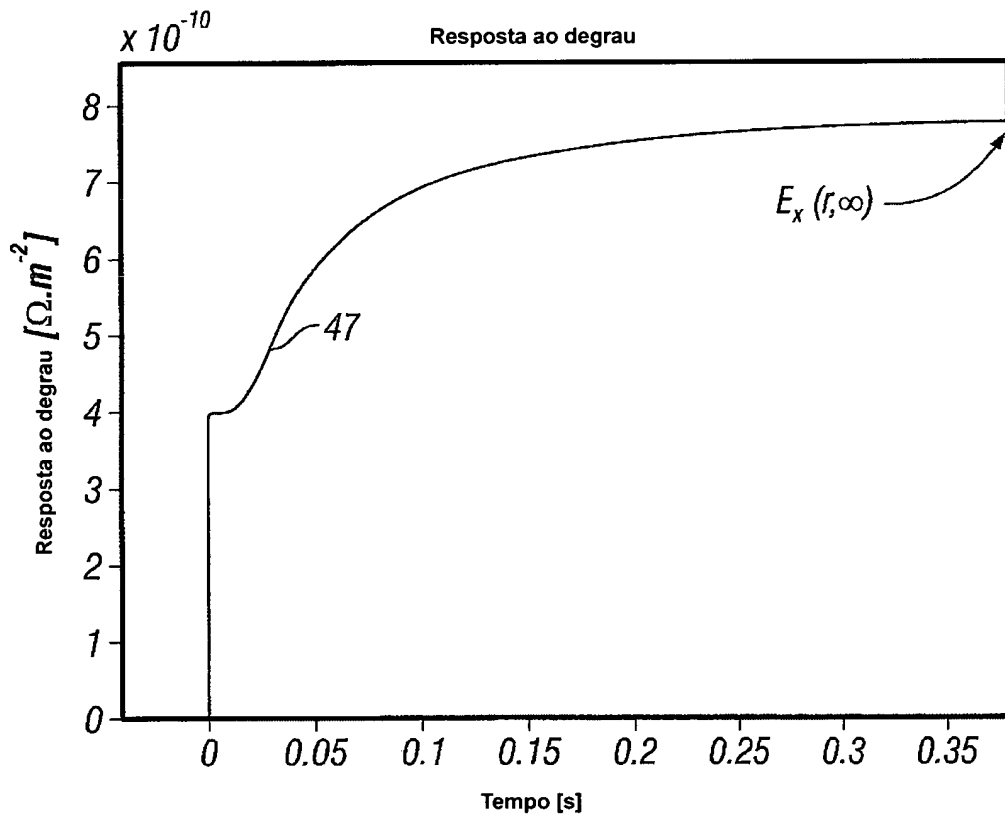


FIG. 4

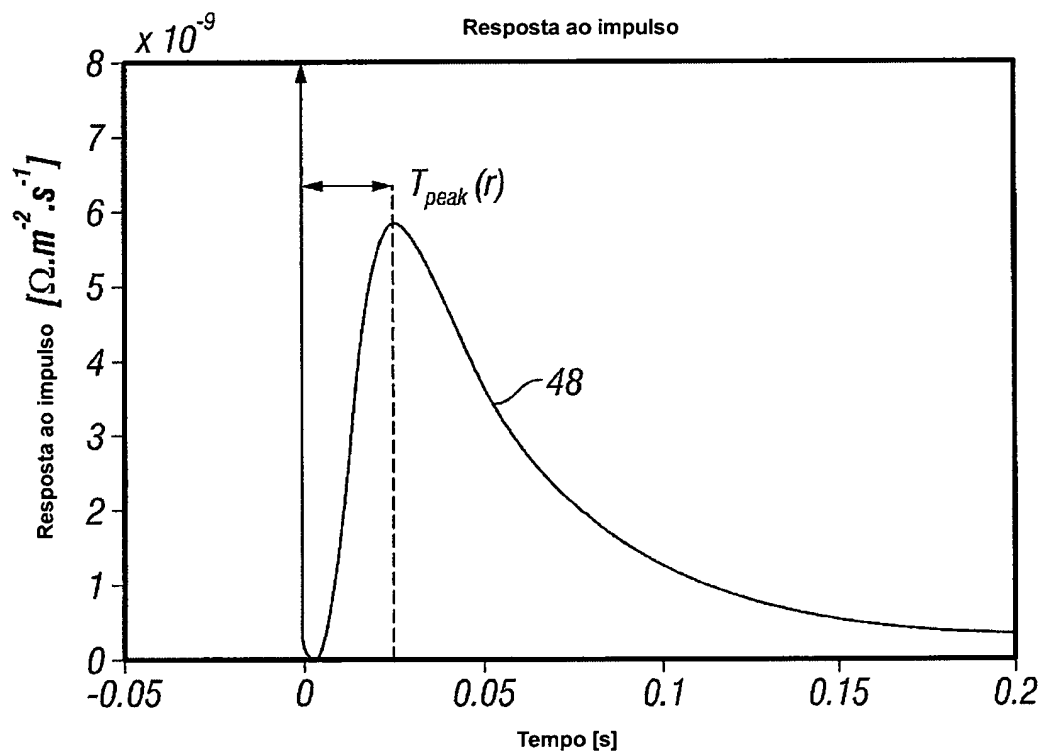
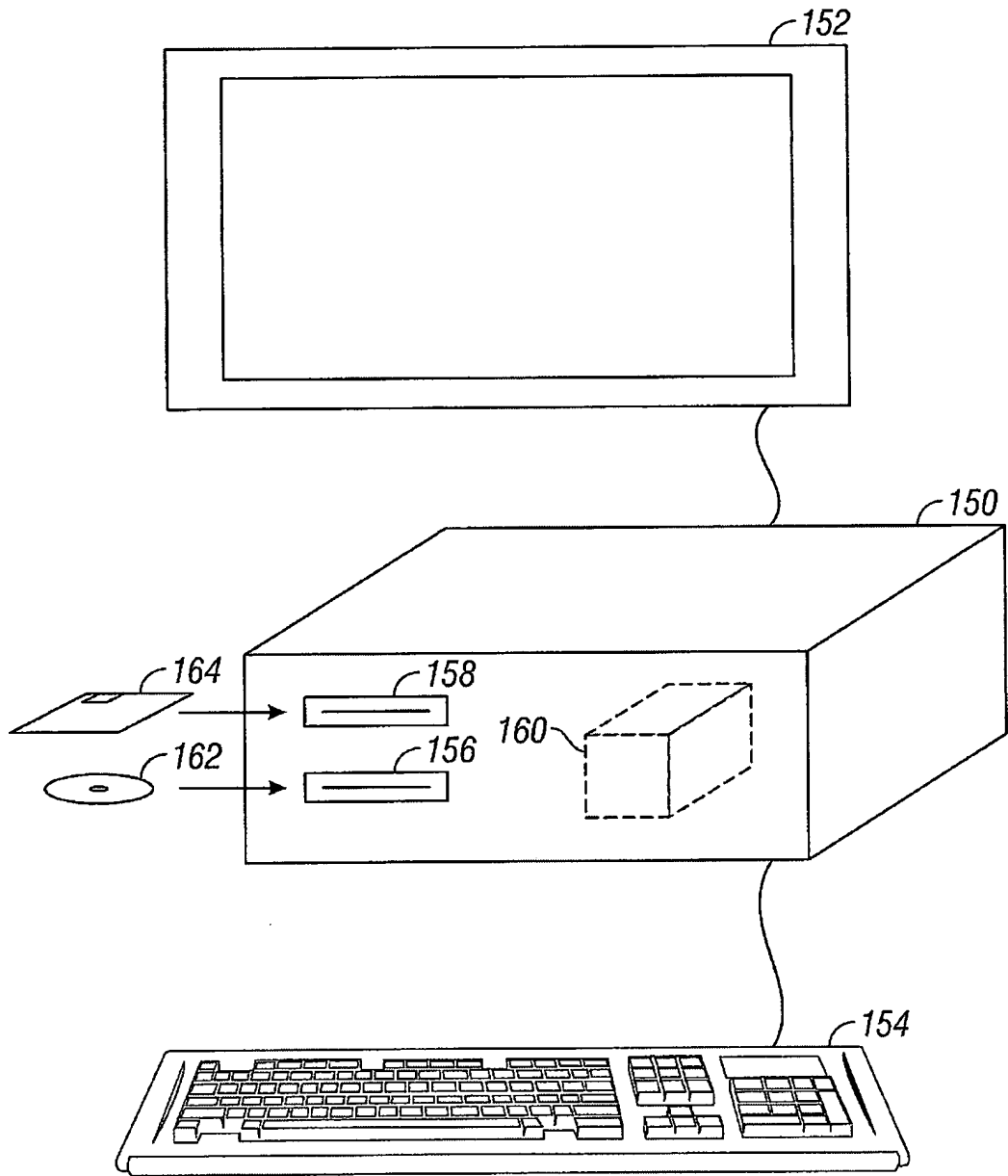


FIG. 5



**FIG. 6**

**RESUMO**

Patente de Invenção: **"MÉTODO PARA DETERMINAR A ANISOTROPIA DE RESISTIVIDADE A PARTIR DA RESPOSTA TRANSITÓRIA ELETROMAGNÉTICA AO DEGRAU DA TERRA E DE RESPOSTA TRANSITÓRIA ELETROMAGNÉTICA AO IMPULSO DE PICO"**.

A presente invenção refere-se a um método para determinar a anisotropia de resistividade de formações rochosas de subsuperfície, que inclui a transmissão de um campo eletromagnético transitório nas formações rochosas de subsuperfície. A resposta eletromagnética das formações é medida em uma pluralidade de desvios a partir de uma posição da transmissão. Para cada deslocamento, um tempo de chegada a partir da transmissão é determinado de um pico de uma resposta ao impulso, de tal modo que a resposta refira-se a resistividades horizontal e vertical de subsuperfície. Para cada deslocamento, uma resposta ao degrau das formações é determinada em um tempo a partir da transmissão, selecionado de tal modo que a resposta ao degrau seja relacionada substancialmente apenas com a resistividade média. O tempo de chegada do pico da resposta ao impulso e o valor de tempo tardio da resposta ao degrau são usados para determinar a anisotropia de resistividade.