



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

(21) **PI1000052-6 A2**

(22) Data de Depósito: 27/01/2010
(43) Data da Publicação: 29/03/2011
(RPI 2099)



(51) *Int.Cl.:*
G01V 3/08
G01V 3/38

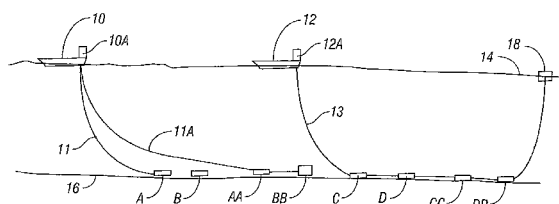
(54) Título: **MÉTODO PARA LEVANTAMENTO ELETROMAGNÉTICO UTILIZANDO DUAS OU MAIS FONTES ELETROMAGNÉTICAS SIMULTANEAMENTE ATUADAS**

(30) Prioridade Unionista: 27/01/2009 US 12/321,884

(73) Titular(es): Mtem LTD.

(72) Inventor(es): Antoni Marjan Ziolkowski

(57) Resumo: MÉTODO PARA LEVANTAMENTO ELETROMAGNÉTICO UTILIZANDO DUAS OU MAIS FONTES ELETROMAGNÉTICAS SIMULTANEAMENTE ATUADAS. A invenção refere-se a um método para exploração eletromagnética que inclui transmitir um primeiro sinal eletromagnético para dentro das formações de subsuperfície e transmitir um segundo sinal eletromagnético para dentro das formações substancialmente contemporaneamente com a transmissão do primeiro sinal eletromagnético. Os primeiro e segundo sinais eletromagnéticos não estão substancialmente correlacionados um com o outro. Uma resposta eletromagnética combinada da formação para os primeiro e segundo sinais eletromagnéticos transmitidos é detectada. Uma resposta das formações para cada um dos primeiro e segundo sinais transmitidos é determinada da resposta detectada.





PI1000052-6

Relatório Descritivo da Patente de Invenção para **"MÉTODO PARA LEVANTAMENTO ELETROMAGNÉTICO UTILIZANDO DUAS OU MAIS FONTES ELETROMAGNÉTICAS SIMULTANEAMENTE ATUADAS"**.
ANTECEDENTES DA INVENÇÃO

5 CAMPO DA INVENÇÃO

A invenção refere-se a sistemas e métodos para estimar a resposta de formações de rocha na subsuperfície da Terra a campos magnéticos transmitidos de modo a determinar a distribuição espacial de propriedades elétricas das formações.

10 DESCRIÇÃO DA TÉCNICA RELACIONADA

As formações de rochas sedimentares de subsuperfície porosas estão tipicamente saturadas com fluidos como um resultado de terem sido depositadas dentro de um corpo de água durante a sedimentação. Como um resultado, os fluidos eram inicialmente inteiramente água. Em algumas formações de subsuperfície a água dentro dos espaços de poros foi deslocada a um certo grau após a sedimentação por hidrocarbonetos tais como o óleo e o gás. Assim, em algumas formações de subsuperfície do dia presente, os fluidos dentro de seus espaços de poros podem ser água, gás ou óleo, ou misturas dos acima.

20 A detecção de formações que têm um espaço de poro menos do que totalmente saturado com água, isto é, quando o óleo ou o gás está presente dentro dos espaços de poros, é de significativo interesse econômico. Certas técnicas para a detecção de tais formações incluem determinar a existência de resistividades elétricas na subsuperfície que sejam anormalmente altas. O princípio de tal detecção está baseado no fato que o fluxo de corrente elétrica através de uma formação de rocha porosa está relacionado ao volume fracionário dos espaços de poros com relação ao volume de rocha total, à configuração espacial dos espaços de poros e às propriedades elétricas dos fluidos que preenchem os espaços de poros. As formações de rocha porosa saturadas de salmoura, por exemplo, são tipicamente muito menos resistivas do que algumas formações de rocha que têm hidrocarbonetos em alguns ou todos os espaços de poros, porque a salmoura é um

condutor elétrico relativamente bom enquanto que os hidrocarbonetos são tipicamente bons isoladores elétricos.

Várias técnicas para medir a resistividade elétrica de formações de rocha de subsuperfície são conhecidas na técnica, por exemplo, as técnicas de levantamento eletromagnético de domínio de tempo tais como descritas na Publicação de Pedido de Patente Internacional Número WO 03/023452. Tais técnicas em geral incluem transmitir um campo eletromagnético para dentro das formações de subsuperfície e medir os campos elétricos e/ou magnéticos induzidos na formação de subsuperfície em resposta ao campo eletromagnético transmitido. Para tais técnicas de medição, o campo eletromagnético pode ser transmitido utilizando um transmissor de campo elétrico, por exemplo, passando uma corrente elétrica através de um par de eletrodos dipolos. Alternativamente, um transmissor de campo magnético pode ser utilizado, por exemplo, passando uma corrente elétrica através de um laço de fio ou uma pluralidade de tais laços. Os receptores utilizados para detectar os campos eletromagnéticos responsivos podem ser pares de eletrodos dipolos para medir as diferenças de potencial (potencial de campo elétrico), ou podem ser laços de fio, uma pluralidade de laços de fio ou magnetômetros para medir a amplitude do campo magnético e/ou as derivadas de tempo de amplitude de campo magnético. A corrente elétrica utilizada para transmitir o campo eletromagnético pode ser controlada para prover uma mudança escalonada na corrente. A mudança escalonada na corrente de transmissor induz o que é referido como campos eletromagnéticos "transientes", e as respostas medidas pelos receptores são relacionadas com a resposta de transiente da formação na subsuperfície da Terra. A mudança escalonada na corrente de transmissor pode ser obtida ligando a corrente, desligando a corrente, invertendo a polaridade, ou combinações dos acima. Uma forma especificamente vantajosa para a configuração de comutação de corrente de transmissor utilizada para transmitir o campo eletromagnético é a assim denominada "sequência binária pseudorrandômica" (PRBS). O seguinte documento descreve a utilização de PRBSs em exploração eletromagnética: Duncan, P.M., Hwang, A., Edwards, R.N., Bailey, R.C.,

e Garland, G.D., 1980, The development and application of a wide band electromagnetic sounding system using a pseudo-noise source, *Geophysica*, Vol. 45, pp. 1276-1296.

No levantamento de uma área da subsuperfície utilizando as técnicas eletromagnéticas, é desejável obter sinais que correspondam a várias distâncias ("deslocamentos") entre o transmissor e o receptor. Em uma implementação de levantamento típica que utiliza comutação de corrente de transmissor de PRBS, uma PRBS de largura de banda diferente pode ser utilizada para as diferentes faixas de deslocamento. Em tal exemplo, para levantar as formações abaixo do fundo de um corpo de água, um navio receptor pode posicionar uma pluralidade de receptores em um padrão selecionado, tal como uma rede de linhas, sobre o fundo da água. Um navio transmissor separado pode posicionar o transmissor no ou a uma distância nominal do fundo da água. O transmissor pode ser atuado e os sinais do receptor gravados. Os sinais eletromagnéticos que correspondem a vários deslocamentos podem ser obtidos movendo o navio transmissor, atuando o transmissor, e gravando os sinais dos receptores, sucessivamente. A corrente de transmissor é medida durante a atuação e a sua medição pode então ser transmitida para o navio receptor para controle de qualidade de dados e processamento.

Para levantar diferentes áreas da subsuperfície abaixo do fundo da água, o navio receptor pode recolher os receptores do fundo da água, mover para uma localização diferente, e mais uma vez posicionar os receptores no fundo da água em uma localização diferente. O posicionamento de transmissor, atuação de transmissor e gravação de sinal acima descrito podem então ser repetidos.

É desejável aperfeiçoar a eficiência com a qual os sinais eletromagnéticos são obtidos. Uma possibilidade é atuar mais de um transmissor aproximadamente ao mesmo tempo, e gravar os sinais gerados em resposta. Tal técnica poderia reduzir o tempo despendido para adquirir uma pluralidade de diferentes sinais eletromagnéticos deslocados. Uma técnica para otimizar um ou mais parâmetros de aquisição de sinal está descrita na Publi-

cação de Pedido de Patente Internacional Número WO 2007/104949. Geralmente, a técnica descrita na publicação acima inclui selecionar uma frequência de comutação de transiente para a corrente aplicada ao transmissor que está inversamente relacionada com o quadrado da distância entre o transmissor e os receptores (denominada "deslocamento"). Tal técnica poderia ser vantajosamente utilizada com uma técnica que permita operar uma pluralidade de transmissores eletromagnéticos essencialmente e simultaneamente.

SUMÁRIO DA INVENÇÃO

Um método para exploração eletromagnética de acordo com um aspecto da invenção inclui transmitir um primeiro sinal eletromagnético para dentro das formações de subsuperfície e transmitir um segundo sinal eletromagnético para dentro das formações substancialmente contemporaneamente com a transmissão do primeiro sinal eletromagnético. Os primeiro e segundo sinais eletromagnéticos não estão substancialmente correlacionados um com o outro. Uma resposta eletromagnética combinada da formação para os primeiro e segundo sinais eletromagnéticos transmitidos é detectada em uma ou mais localizações. Uma resposta das formações para cada um dos primeiro e segundo sinais transmitidos é determinada das uma ou mais respostas detectadas.

Em um exemplo, a frequência de comutação dos primeiro e segundo sinais eletromagnéticos está inversamente relacionada com o quadrado de uma distância entre a localização de transmissão e a localização de detecção.

Outros aspectos e vantagens da invenção ficarão aparentes da descrição e das reivindicações que seguem.

BREVE DESCRIÇÃO DOS DESENHOS

Figura 1 mostra uma disposição típica de um transmissor e receptores eletromagnéticos.

Figura 2 mostra um gráfico de corrente de transmissor como medida para um sinal de sequência binária pseudorrandômica.

Figura 3 mostra um gráfico de voltagem medida simultaneamente

te entre um par de eletrodos de receptor em resposta à corrente de transmissor mostrada na Figura 2.

Figura 4 mostra um gráfico de resposta de impulso recuperada pela desconvolução do sinal de voltagem da Figura 3 com o sinal de corrente da Figura 2.

Figura 5 mostra dois transmissores utilizados com um receptor em um exemplo de um método de acordo com a invenção.

Figura 6 mostra um fluxograma de um exemplo de implementação da invenção.

Figura 7 mostra um navio de levantamento rebocando uma pluralidade de fontes eletromagnéticas cada uma tendo um diferente espaçamento de eletrodo de fonte.

DESCRIÇÃO DETALHADA

A descrição a qual segue inclui uma explicação geral dos princípios de levantamento eletromagnético de fonte controlada de transiente, que inclui um exemplo de sistema de aquisição. Após tal explicação está uma descrição de um exemplo de implementação de uma técnica para transmitir uma pluralidade de sinais eletromagnéticos essencialmente ao mesmo tempo, e em sinais eletromagnéticos detectados por pelo menos um receptor, que identifica a resposta de subsuperfície para cada um dos sinais eletromagnéticos que foi transmitido.

Um posicionamento típico de navios de levantamento geofísico marinho que podem ser utilizados para conduzir um levantamento geofísico eletromagnético está esquematicamente mostrado na Figura 1. Um navio transmissor 10 está posicionado sobre a superfície de um corpo de água 14 tal como um lago ou o oceano. O navio transmissor 10 pode posicionar um ou mais transmissores eletromagnéticos 11 dentro da água 14, tipicamente próximo do fundo da água 16. No exemplo mostrado na Figura 1, o transmissor 11 pode ser os eletrodos A, B dispostos ao longo de um cabo elétrico isolado. Os eletrodos A, B estão dispostos a uma distância selecionada um do outro e estão acoplados a um sistema de controle de receptor e fonte de alimentação 10A disposto no navio transmissor 10. Um navio receptor 12

pode também estar posicionado sobre a água 14 próximo do navio transmissor 10. O navio receptor 12 pode posicionar um ou mais receptores eletromagnéticos 13 dentro da água 14, tipicamente sobre o fundo da água 16. No exemplo da Figura 1, o receptor 13 pode ser uma pluralidade de pares de eletrodos C, D dispostos ao longo de um cabo elétrico isolado. Os pares de eletrodos C, D podem estar configurados para detectar as voltagens que resultam de campos eletromagnéticos induzidos na subsuperfície pelo transmissor 11 sendo energizado. As voltagens transmitidas através de cada par de eletrodos C, D podem ser detectadas por um sistema de gravação 12A disposto no navio receptor 12, ou podem ser comunicadas para armazenamento em uma bóia de gravação 18 em uma extremidade mais distante do cabo de receptor.

A atuação do transmissor 11 pode ser executada transmitindo uma corrente elétrica através dos eletrodos de transmissor A, B. O sistema mostrado na Figura 1 inclui um transmissor e receptores referidos como dipolos elétricos horizontais. Será apreciado por aqueles versados na técnica que qualquer outra forma conhecida de transmissor e receptor eletromagnético, por exemplo, dipolos elétricos verticais (pares de eletrodos verticalmente orientados), dipolos magnéticos horizontais (bobinas de fio orientadas de modo que o eixo geométrico longitudinal das bobinas seja horizontal) e dipolos magnéticos verticais (o análogo magnético vertical do dipolo elétrico vertical) podem ser utilizados em outros exemplos, assim como os magnetômetros para a detecção de campos magnéticos. O exemplo acima de sistema de aquisição utilizado em um ambiente marinho está provido somente para ilustrar a aquisição de dados de levantamento eletromagnéticos. Os métodos de acordo com a invenção podem ser utilizados em levantamentos eletromagnéticos conduzidos em terra, e a invenção, portanto, não está limitada ao uso com levantamentos marinhos.

Na execução de um método de acordo com a invenção, tanto a amplitude de sinal recebido quanto a corrente elétrica utilizada para induzir o campo eletromagnético no transmissor são medidas simultaneamente, e a resposta de impulso das formações de subsuperfície localizadas abaixo do

transmissor e do receptor pode ser recuperada de tais medições por desconvolução. A implementação específica de desconvolução será adicionalmente abaixo explicada. Uma explicação geral de desconvolução como utilizada em levantamento eletromagnético está descrita na publicação WO 03/023452 acima referida. Outras publicações que explicam o processamento de aquisição e de desconvolução de sinais de levantamento eletromagnéticos incluem: Ziolkowski, A., Hobbs, B.A., e Wright, D., 2007, Multitransient electromagnetic demonstration survey in France, *Geophysics*, 72, F197-F209; Ziolkowski, A., 2007, Developments in the transient electromagnetic method, *First Break*, 25, 99-106; Ziolkowski, A., Wright, D., Hall, G., and Clarke, C., 2008, First shallow-water multitransient EM survey, *Expanded Abstracts*, Geophysical Seminar, London, 30-31 de Janeiro de 2008, Petroleum Exploration Society of Great Britain.

Uma corrente elétrica comutada em transiente, tipicamente um sinal de comprimento finito tal como uma sequência binária pseudorrandômica (PRBS), é aplicada através dos eletrodos de transmissor A e B para induzir um campo eletromagnético na subsuperfície. A voltagem induzida através de cada par de eletrodos de receptor, por exemplo, C e D na Figura 1, é medida simultaneamente. A voltagem induzida será pelo menos em parte induzida com campos eletromagnéticos gerados na subsuperfície em resposta ao campo transmitido pelo transmissor. Se, após o final da PRBS a voltagem medida através dos eletrodos de receptor C, D atingir substancialmente um estado estável antes da próxima PRBS ser aplicada através dos eletrodos de transmissor A, B, uma resposta substancialmente completa das formações na subsuperfície para o campo eletromagnético transmitido foi medida e tal resposta pode ser representada pela expressão:

$$v_{CD}(t) = \Delta x_s \Delta x_r i_{AB}(t) * g_{CD,AB}(t) + n_{CD}(t) \quad (1)$$

em que $v_{CD}(t)$ é a voltagem medida através dos eletrodos de receptor C, D com relação ao tempo, $i_{AB}(t)$ é a corrente aplicada através dos eletrodos de transmissor A, B com relação ao tempo, $g_{CD,AB}(t)$ é a resposta de impulso das formações de subsuperfície, o asterisco * denota a convolução, e $n_{CD}(t)$ é o ruído nos eletrodos de receptor C, D com relação ao tempo.

Δx_s e Δx_r são os comprimentos em linha dos dipolos de transmissor e de receptor, respectivamente (isto é, o respectivo espaçamento entre A e B e C e D). Se um transmissor ou receptor de campo magnético for utilizado ao invés de um transmissor e receptor elétrico de dipolo, uma expressão equivalente para o momento de dipolo pode ser substituída na equação (1) por Δx_s e Δx_r .

Foi determinado da experiência na utilização de sistemas tal como mostrado na Figura 1 que as distâncias de transmissor para receptor ("deslocamentos"), representadas por r , dentro de uma faixa de aproximadamente $2d \leq r \leq 4d$ são requeridas para resolver a resistividade de uma formação específica ("alvo") disposta a uma profundidade d abaixo do fundo da água 16 (ou da superfície de Terra em levantamentos baseados em terra). Na determinação da resistividade de uma formação alvo de subsuperfície é também importante determinar as resistividades de todos os meios (formações, e a camada de água em um levantamento marinho) acima da formação alvo, isto é, um modelo da subsuperfície deve ser feito de cima para baixo. Portanto, uma faixa de deslocamentos deve ser utilizada em qualquer levantamento específico que estenda a aproximadamente quatro vezes a profundidade de cada formação do topo da subsuperfície para baixo para a formação-alvo mais profunda. O campo em linha de um transmissor de campo elétrico de bipolo aproxima-se daquele de um dipolo equivalente a deslocamentos de $r \geq 4\Delta x_s$.

Na execução de um levantamento eletromagnético prático, uma pluralidade de receptores eletromagnéticos (bipolos de eletrodo) espaçados é utilizada, com cada comprimento de bipolo de receptor, Δx , sendo substancialmente o mesmo que os outros e em que os bipolos de receptor estão dispostos geralmente extremidade com extremidade para prover uma cobertura de levantamento de subsuperfície substancialmente contínua.

Considere um caso específico para a equação (1) no qual

$$i_{AB}(t) = I\Delta t \quad (2)$$

e na qual Δt "(abaixo explicado) é muito pequeno comparado com qualquer intervalo de tempo de interesse na resposta de impulso da Terra, $g_{CD,AB}(t)$. O resultado pode ser expresso como:

$$v_{CD}(t) = I\Delta x_s \Delta x_r \Delta t g_{CD,AB}(t) + n_{CD}(t), \quad (3)$$

da qual pode ser determinado que uma razão de sinal para ruído instantânea pode ser expressa como:

$$\frac{|I\Delta x_s \Delta x_r \Delta t g_{CD,AB}(t)|}{|n_{CD}(t)|} \quad (4)$$

Para maximizar a razão de sinal para ruído, com base na equação (4), é desejável maximizar I , Δx_s , Δx_r , e Δt . Como acima explicado, nos métodos descritos nas publicações acima referidas, uma sequência binária pseudorrandômica (PRBS) é utilizada como a função de comutação de corrente de transmissor. Uma PRBS de ordem n é uma sequência de $N = 2^n - 1$ "amostras" comutadas entre dois níveis, por exemplo, $+1$ e -1 , múltiplos de inteiro pseudorrandômico de um tempo fixo (tempo de amostra) representado por Δt . A PRBS tem um espectro de frequência com uma amplitude substancialmente uniforme na faixa de $1/N\Delta t \leq f \leq 1/2\Delta t$. Pode ser mostrado que a taxa de amostra de corrente de transmissor $1/\Delta t$ deve diminuir com o deslocamento em relação ao seu quadrado, isto é, $1/r^2$. A função de comutação de corrente de transmissor acima é esperada maximizar Δt . O processo de deconvolução comprime a PRBS em um único pulso de amplitude NI ; isto é, a deconvolução aumenta a amplitude de sinal por um fator N .

A Figura 2 mostra um gráfico de um exemplo da corrente de transmissor medida quando uma PRBS foi utilizada para energizar o transmissor (11 na Figura 1). A Figura 3 mostra a voltagem medida simultaneamente entre um par de eletrodos de receptor (por exemplo, C,D na Figura 1) em resposta ao exemplo de corrente de transmissor mostrado na Figura 2. A Figura 4 mostra a resposta de impulso recuperada pela deconvolução do sinal de voltagem da Figura 3 com a medição de corrente da Figura 2. A resposta de impulso na Figura 4 inclui um componente conhecido como a "onda de ar" 20 que é gerada pela interface entre o ar e o topo da água, e um componente mostrado em 22 que representa a resposta da formação abaixo do fundo da água (16 na Figura 1). Nota-se que no presente exemplo, o qual representa os dados adquiridos em terra para o propósito de me-

lhor ilustrar os componentes de sinal da resposta de impulso, a duração da resposta de impulso é menor do que aproximadamente 20 milissegundos, enquanto que o sinal de corrente de entrada medido (Figura 2) e o sinal de voltagem de saída medido (Figura 3) são ambos de uma duração muito mais longa, por exemplo, aproximadamente 140 milissegundos.

Uma técnica para determinar as resistividades das formações de subsuperfície de todas as respostas de impulso da Terra determinadas é conhecida como "inversão" e tal técnica está descrita em detalhes na publicação de Ziolkowski et al. (2007) acima citada.

Na invenção, a aquisição de levantamento eletromagnético de uma pluralidade de diferentes sinais deslocados assim como os sinais gravados acima de uma pluralidade de áreas na subsuperfície pode ser executada atuando dois ou mais transmissores contemporaneamente, enquanto gravando os sinais que resultam da atuação dos dois ou mais transmissores.

A Figura 5 mostra um exemplo de sistema de levantamento eletromagnético marinho que pode ser utilizado com os métodos de acordo com a invenção. O exemplo da Figura 5 pode incluir um navio receptor 12 como na Figura 1 com um receptor 13 posicionado do mesmo. Um navio transmissor 10 pode posicionar um transmissor como na Figura 1. O navio transmissor 10 na Figura 5, no entanto, pode posicionar pelo menos um transmissor adicional 11A. O pelo menos um transmissor adicional 11A pode incluir dois eletrodos espaçados AA, BB similares àqueles A, B no transmissor 11, e podem ser posicionados de modo a terem um deslocamento diferente do receptor 13. O pelo menos um transmissor adicional 11A pode ser posicionado por um navio diferente (não mostrado).

Os transmissores 11, 11A no presente exemplo têm eletrodos A, B, AA, BB tipicamente espaçados afastados de 200 m um do outro e suspensos aproximadamente 2 m acima do fundo da água, e aos quais uma corrente elétrica comutada de PRBS é aplicada. A comutação de corrente na PRBS é por inversão de polaridade, entre, por exemplo, +700 Ampères e -700 Ampères. A taxa de amostra de transmissor pode ser variada para diferentes faixas de deslocamento, por exemplo, 200 Hz podem ser utilizados

para um deslocamento de 800-1800 m, 50 Hz podem ser utilizados para um deslocamento de 1800-2800 m, e 20 Hz podem ser utilizados para um deslocamento de 2800-4000 m.

Exatamente como no exemplo anterior mostrado na Figura 1, cada transmissor 11, 11A pode ser um transmissor de campo elétrico, por exemplo, um bipolo elétrico como mostrado, ou pode ser um transmissor de campo magnético tal como um laço de fio ou bobina. Os receptores podem ser bipolos elétricos para medir as diferenças de potencial como mostrado, ou podem ser laços de fio ou bobinas, ou magnetômetros para medir os campos magnéticos e/ou as derivadas de tempo de campos magnéticos.

O sinal transmitido de cada transmissor 11, 11A pode ser um sinal de transiente, por exemplo, uma sequência binária pseudorrandômica (PRBS). De acordo com a Invenção, os sinais gerados por cada transmissor 11, 11A não estão correlacionados e podem ser substancialmente e contemporaneamente ou mesmo simultaneamente transmitidos para induzir os respectivos campos eletromagnéticos dentro da subsuperfície da Terra. Os sinais de transmissor são diretamente medidos, e é a resposta resultante em cada receptor.

Os sinais detectados pelo receptor podem ser analisados para determinar a resposta de impulso da Terra que corresponde ao sinal de cada transmissor. As respostas de impulso da Terra podem ser utilizadas para determinar a distribuição espacial de resistividade elétrica na subsuperfície, como acima explicado. Uma análise adequada para determinar a resposta de impulso da Terra que corresponde ao sinal de cada transmissor está delineada. Os sinais não correlacionados emitidos por cada um dos dois transmissores 11, 11A de preferência têm as seguintes duas propriedades: (1) cada sinal é fácil de distinguir de uma versão deslocada no tempo de si próprio; e (2) cada sinal é fácil de distinguir do outro sinal, incluindo as suas versões deslocadas no tempo. Exemplos de sinais que podem ser utilizados são conhecidos daqueles versados na técnica, e estão descritos, por exemplo, em Sarwate, D.V., e Pursley, M.B., 1980, Crosscorrelation properties of pseudorandom and related sequences, Proceedings of the IEEE, 68, 593-

619. De preferência, ambos os sinais de transmissor são sequências binárias pseudorrandômicas. Os sinais de transmissor podem ter funções de correlação cruzada de substancialmente zero. O sinal transmitido em cada transmissor pode ser diretamente medido, por exemplo, utilizando um magnetômetro ou por medição direta da corrente no circuito de transmissor.

Um método para analisar um sinal eletromagnético recebido que inclui os componentes de pelo menos um primeiro e segundo sinais de transmissor eletromagnético não correlacionados, conhecidos, transmitidos contemporaneamente de diferentes transmissores eletromagnéticos através da Terra inclui determinar a diferença entre a resposta da Terra para o primeiro sinal e o sinal recebido (por exemplo, subtraindo a resposta da Terra para o primeiro sinal do sinal recebido), e processar a diferença utilizando o segundo sinal transmitido para estimar a resposta da Terra para o segundo sinal transmitido.

Em alguns exemplos, mais de dois transmissores podem ser utilizados, cada um gerando um sinal conhecido que não está substancialmente correlacionado com o sinal de qualquer outro transmissor. Quando mais do que dois sinais eletromagnéticos não correlacionados, conhecidos, são transmitidos (por exemplo, utilizando três ou mais transmissores), o método ainda inclui determinar uma diferença entre a resposta da Terra estimada para os primeiro e segundo sinais e o sinal recebido e processar esta diferença utilizando outro sinal de transmissor conhecido para estimar a resposta da Terra para aquele sinal transmitido.

Um exemplo de implementação está mostrado em um fluxograma na Figura 6. Em 60, um primeiro sinal eletromagnético é transmitido pelo primeiro transmissor (por exemplo, 11 na Figura 5). Um segundo sinal eletromagnético é transmitido pelo segundo transmissor (por exemplo, 11A na Figura 5). Em 62, os sinais que resultam tanto do primeiro sinal de transmissor quanto do segundo sinal de transmissor são detectados (por exemplo, pelo receptor 13 na Figura 5).

Processar o sinal detectado pode incluir: (a) desconvolver o sinal recebido utilizando o primeiro sinal de transmissor mostrado em 64; (b) esti-

mar a resposta de formação para o primeiro sinal de transmissor utilizando o sinal recebido desconvolvido, mostrado em 66; (c) convolver a resposta de formação estimada de (b) com o primeiro sinal de transmissor, mostrado em 68; e (d) subtrair o resultado da convolução executada em (c) do sinal recebido, como mostrado em 70 na Figura 6.

Processar o resultado da subtração em 70 pode incluir (e) desconvolver o resultado de 70 na Figura 6 com o segundo sinal de transmissor, em 72, para produzir uma estimativa da resposta de formação para o segundo sinal transmitido, em 74.

10 A estimar a resposta de formação para o primeiro sinal de transmissor utilizando o sinal recebido desconvolvido pode inclui identificar um pico associado com o primeiro sinal de transmissor e utilizar o pico para determinar a estimativa.

O método pode ainda incluir: (f) convolver a estimativa da res-
 15 posta de formação para o segundo sinal de transmissor com o segundo sinal de transmissor como mostrado em 76; (g) subtrair o resultado em 76 do sinal recebido, como mostrado em 78; (h) desconvolver o resultado de (g) com o primeiro sinal de transmissor como mostrado em 80, (i) estimar a resposta de formação para o primeiro sinal de transmissor utilizando resultado de (h)
 20 como mostrado em 82. Em 84, a estimativa aperfeiçoada da resposta de formação determinada em 82 é comparada com a estimativa de resposta de formação determinada em 66. Se a diferença entre as duas estimativas estiver abaixo de um limite selecionado, então o processo pode terminar. Se a diferença exceder o limite selecionado, o processo pode continuar por (j)
 25 utilizando a estimativa de (i) em (c), assim retornando o processo para 66 na Figura 6. As etapas (c) até (j) podem ser iterativamente repetidas até que uma convergência seja alcançada, significando que a diferença determinada em 84 está abaixo do limite selecionado.

Mais de dois sinais podem ser simultaneamente ou contemporaneamente transmitidos e o método pode incluir processar o sinal recebido utilizando cada um dos sinais transmitidos para determinar a resposta de formação.

Tendo explicado as ações requeridas para executar um método de acordo com a invenção, o seguinte é uma explicação do princípio de tal método. Deixemos um primeiro transmissor de sinal eletromagnético (ou "fonte") ser disposto em uma posição designada por x_{s1} e deixemos uma
 5 segunda fonte ser disposta na posição designada por x_{s2} . Cada transmissor ou fonte emite sinais de transmissor separados e independentes designados por $s(x_{s1}, t)$ e $s(x_{s2}, t)$. No presente exemplo, os dois sinais de transmissor são medidos como acima explicado e assim são conhecidos. Podem existir um ou mais receptores eletromagnéticos para detectar a resposta da Terra, um
 10 dos quais está disposto em uma posição designada por x_r . O sinal recebido em x_r , designado por $v(x_{s1}, x_r, t)$, pode ser representado pela expressão:

$$v(x_{s1}, x_{s2}, x_r, t) = s(x_{s1}, t) * g(x_{s1}, x_r, t) + s(x_{s2}, t) * g(x_{s2}, x_r, t) + n_1(x_r, t) \quad (5)$$

A equação (5) é a sobreposição de duas convoluções diferentes, mais ruído. Se os dois sinais de fonte $s(x_{s1}, t)$ e $s(x_{s2}, t)$ forem conhecidos, tal como por medição, a resposta de impulso da Terra para cada um dos dois
 15 sinais de transmissor, designados por $g(x_{s1}, x_r, t)$ e $g(x_{s2}, x_r, t)$ pode ser estimada do sinal recebido. Na equação (5), $n_1(x_r, t)$ representa o ruído. Um exemplo de técnica para estimar as duas respostas da Terra está abaixo delineado para propósitos de ilustração.

Considere a situação na qual $s(x_{s1}, t)$ e $s(x_{s2}, t)$ são sequências
 20 binárias pseudorrandômicas (não correlacionadas) ortogonais que têm a mesma largura de banda. É útil, mas não essencial, se $s(x_{s1}, t)$ e $s(x_{s2}, t)$ tiverem durações de tempo significativamente maiores do que cada resposta de impulso da Terra, $g(x_{s1}, x_r, t)$ ou $g(x_{s2}, x_r, t)$. Deixou-se que $g(x_{s1}, x_r, t)$ seja de duração T_1 , $g(x_{s2}, x_r, t)$ seja de comprimento T_2 , e o sinal de receptor
 25 $v(x_{s1}, x_{s2}, x_r, t)$ seja de duração T_v , o qual é substancialmente mais longo do que ou T_1 ou T_2 .

O primeiro elemento da técnica para determinar cada resposta de impulso da Terra é desconvolver a equação (5) para ou $s(x_{s1}, t)$ ou $s(x_{s2}, t)$. Na prática, é melhor escolher para a desconvolução a fonte que produz a
 30 maior contribuição para o sinal recebido, tipicamente a fonte que está mais próxima do receptor. Se as fontes forem equidistantes do receptor e tiverem

a mesma amplitude e largura de banda de sinal transmitido, então qualquer fonte pode ser escolhida. Para facilitar a desconvolução, primeiro, a equação (5) pode ser transformada para o domínio de frequência utilizando, por exemplo, a transformada de Fourier, para prover a expressão

$$V(\mathbf{x}_{s1}, \mathbf{x}_{s2}, \mathbf{x}_r, \omega) = S(\mathbf{x}_{s1}, \omega).G(\mathbf{x}_{s1}, \mathbf{x}_r, \omega) + S(\mathbf{x}_{s2}, \omega).G(\mathbf{x}_{s2}, \mathbf{x}_r, \omega) + N_1(\mathbf{x}_r, \omega) \quad (6)$$

- 5 na qual ω é a frequência angular, a substituição de letras minúsculas por letras maiúsculas denota a mudança em domínio do domínio de tempo para o domínio de frequência, e as convoluções tornam-se multiplicações. A divisão do acima por $S(\mathbf{x}_{s1}, \omega)$ resulta na desconvolução sendo executada no domínio de frequência. O resultado da desconvolução pode ser expresso como:

$$\frac{V(\mathbf{x}_{s1}, \mathbf{x}_{s2}, \mathbf{x}_r, \omega)}{S(\mathbf{x}_{s1}, \omega)} = X_1(\mathbf{x}_{s1}, \mathbf{x}_{s2}, \mathbf{x}_r, \omega) = G(\mathbf{x}_{s1}, \mathbf{x}_r, \omega) + \frac{S(\mathbf{x}_{s2}, \omega)}{S(\mathbf{x}_{s1}, \omega)}.G(\mathbf{x}_{s2}, \mathbf{x}_r, \omega) + \frac{N_1(\mathbf{x}_r, \omega)}{S(\mathbf{x}_{s1}, \omega)} \quad (7)$$

- 10 Se $s(\mathbf{x}_{s1}, t)$ e $s(\mathbf{x}_{s2}, t)$ forem cada um uma PRBS, estes podem cada um ter uma amplitude constante independente de frequência. A razão de seus espectros de amplitude é também independente de frequência, e é um valor constante:

$$\left| \frac{S(\mathbf{x}_{s2}, \omega)}{S(\mathbf{x}_{s1}, \omega)} \right| = C \quad (8)$$

- 15 Os espectros de fase tanto de $s(\mathbf{x}_{s1}, t)$ quanto de $s(\mathbf{x}_{s2}, t)$ são randômicos, e a razão dos espectros de fase é o espectro de fase de $s(\mathbf{x}_{s2}, t)$ menos o espectro de fase de $s(\mathbf{x}_{s1}, t)$, o qual é também randômico. A razão de domínio de frequência acima dos primeiro e segundo sinais transmitidos tem um espectro de amplitude plano e um espectro de fase randômico. No domínio de tempo este é um ruído branco.

- 20 Transformando a equação (7) de volta para o domínio de tempo gera a expressão:

$$\begin{aligned} x_1(\mathbf{x}_{s1}, \mathbf{x}_{s2}, \mathbf{x}_r, t) &= \delta(t) * g(\mathbf{x}_{s1}, \mathbf{x}_r, t) + w(\mathbf{x}_{s1}, \mathbf{x}_{s2}, t) * g(\mathbf{x}_{s2}, \mathbf{x}_r, t) + n_1(\mathbf{x}_{s1}, \mathbf{x}_r, t) \\ &= g(\mathbf{x}_{s1}, \mathbf{x}_r, t) + w(\mathbf{x}_{s1}, \mathbf{x}_{s2}, t) * g(\mathbf{x}_{s2}, \mathbf{x}_r, t) + n_1(\mathbf{x}_{s1}, \mathbf{x}_r, t) \end{aligned} \quad (9)$$

na qual $w(x_{s1}, x_{s2}, t)$ representa o ruído branco.

No lado direito da equação (9), o primeiro termo é a convolução da resposta de impulso da Terra $g(x_{s1}, x_r, t)$ para a primeira posição de transmissor com o impulso $\delta(t)$. Isto é, toda a energia no primeiro sinal transmitido $s(x_{s1}, t)$ foi comprimida em um impulso representado por $\delta(t)$. O segundo termo é a convolução da resposta de impulso da Terra $g(x_{s2}, x_r, t)$ para a segunda posição de transmissor com o ruído branco $w(x_{s1}, x_{s2}, t)$. O terceiro termo é o ruído. A sequência de dados desconvolvidos $x_1(x_{s1}, x_{s2}, x_r, t)$, de comprimento T_v , são duas sequências de ruído sobrepostas relativamente longas mais um sinal curto, de alta amplitude $g(x_{s1}, x_r, t)$ de comprimento T_1 no início. A razão de sinal para ruído desta primeira parte, $t \leq T_1$, é tipicamente grande; devido ao grande ganho de processamento introduzido pela etapa de desconvolução. Assim esta primeira parte é uma boa estimativa da resposta de impulso da Terra $g(x_{s1}, x_r, t)$ para o primeiro sinal de transmissor; isto é:

$$x_1(x_{s1}, x_{s2}, x_r, t) = \hat{g}(x_{s1}, x_r, t) \approx g(x_{s1}, x_r, t), \quad t \leq T_1 \quad (10)$$

A seguir, a estimativa acima derivada da resposta de impulso da Terra para o primeiro sinal de transmissor, $g(x_{s1}, x_r, t)$, é convolvida com o primeiro sinal de transmissor, $s(x_{s1}, t)$ e o resultado da convolução é subtraído da medição de sinal original $v(x_{s1}, x_{s2}, x_r, t)$. O restante, representado por $x_2(x_{s1}, x_{s2}, x_r, t)$ é quase igual à convolução da resposta de impulso da Terra $g(x_{s2}, x_r, t)$, com o segundo sinal transmitido $s(x_{s2}, t)$ mais o ruído não correlacionado, dado pela expressão:

$$\begin{aligned} x_2(x_{s1}, x_{s2}, x_r, t) &= v(x_{s1}, x_{s2}, x_r, t) - s(x_{s1}, t) * \hat{g}(x_{s1}, x_r, t) \\ &= [s(x_{s1}, t) * g(x_{s1}, x_r, t) - s(x_{s1}, t) * \hat{g}(x_{s1}, x_r, t)] \\ &\quad + s(x_{s2}, t) * g(x_{s2}, x_r, t) + n_1(x_r, t) \\ &\approx s(x_{s2}, t) * g(x_{s2}, x_r, t) + n_1(x_r, t). \quad (11) \end{aligned}$$

$x_2(x_{s1}, x_{s2}, x_r, t)$ pode agora ser desconvolvido de $s(x_{s2}, t)$ para obter uma estimativa $\hat{g}(x_{s2}, x_r, t)$, de $g(x_{s2}, x_r, t)$, a qual fica dentro da faixa de tempo de $t \leq T_2$.

Para aperfeiçoar as estimativas de $g(x_{s1}, x_r, t)$ e $g(x_{s2}, x_r, t)$, a resposta de impulso estimada para o segundo sinal de transmissor $\hat{g}(x_{s2}, x_r, t)$,

pode ser convolvida com o segundo sinal de transmissor $s(x_{s2}, t)$ e o resultado subtraído da medição original $v(x_{s1}, x_{s2}, x_r, t)$. O restante $x_3(x_{s1}, x_{s2}, x_r, t)$ é quase igual à convolução da resposta de impulso da Terra com o primeiro sinal de transmissor $g(x_{s1}, x_r, t)$ com o primeiro sinal de transmissor $s(x_{s1}, t)$ mais o ruído não correlacionado. Desconvolvendo $x_3(x_{s1}, x_{s2}, x_r, t)$ para $s(x_{s1}, t)$ gera uma estimativa aperfeiçoada de $g(x_{s1}, x_r, t)$ comparada com aquela a qual foi obtida na desconvolução original. A estimativa aperfeiçoada acima pode ser utilizada na desconvolução subsequente para o segundo sinal de transmissor para prover uma estimativa aperfeiçoada da resposta de impulso da Terra para o segundo sinal de transmissor $g(x_{s2}, x_r, t)$. O procedimento iterativo acima pode ser repetido até que não exista substancialmente nenhuma mudança nas estimativas da resposta de impulso da Terra para os primeiro e segundo sinais de transmissor. Na prática, o procedimento normalmente convergirá em duas ou três iterações se a razão de sinal para ruído da medição inicial da equação (4) for adequada. O grau no qual as respostas para o primeiro e o segundo sinais de transmissor podem ser separadas do sinal de receptor depende das características dos sinais de transmissor e da precisão com a qual estes são conhecidos. Uma vez que a resposta da Terra para cada um dos sinais de transmissor é determinada, tais respostas da Terra podem ser utilizadas para estimar a distribuição de resistividade. O acima pode ser executado utilizando quaisquer técnicas conhecidas, por exemplo, uma técnica de inversão tal como descrito em Ziolkowski, A., Hobbs, B. A., e Wright, D., 2007, Multitransient electromagnetic demonstration survey in France, *Geophysics*, 72, F197-F209 acima referido.

Como os sinais de transmissor são sequências codificadas e não impulsos, a convolução de qualquer sinal de fonte com a resposta de impulso da Terra resulta em um sinal que é mais longo do que a resposta de impulso da Terra. O processo de desconvolução para cada sinal de transmissor comprime aquele sinal de origem para um impulso grande. A resposta de impulso da Terra, a qual está confinada a uma janela de tempo mais curta do que todo o comprimento de sinal recebido, então levanta acima do fundo, o qual é essencialmente um ruído randômico. Isto torna relativamente

fácil estimar esta resposta. O procedimento iterativo aperfeiçoa as estimativas iniciais.

A técnica de levantamento eletromagnético acima permite a determinação da resposta da Terra para cada um da pluralidade de sinais eletromagnéticos transientes transmitidos para dentro da subsuperfície substancialmente e contemporaneamente ou mesmo simultaneamente. A técnica de levantamento acima foi descrita em termos de transmitir uma pluralidade de sinais eletromagnéticos utilizando uma pluralidade de transmissores eletromagnéticos, e detectar os sinais eletromagnéticos em um ou mais receptores eletromagnéticos. Em um método de acordo com a invenção, a técnica de levantamento eletromagnético pode ser utilizada com um transmissor eletromagnético (que transmite um sinal igual à soma de uma pluralidade de sinais substancialmente não correlacionados) ou uma pluralidade de transmissores eletromagnéticos, e uma pluralidade de receptores eletromagnéticos. Os transmissores e os receptores podem estar dispostos de modo que aquele transmissor ou cada transmissor e cada receptor tenha uma distância diferente ("deslocamento") entre o respectivo transmissor e o receptor. Referindo de volta à Figura 5, um primeiro receptor eletromagnético pode ser implementado como um par de eletrodos C, D como acima explicado. O segundo par de eletrodos, mostrado em CC e DD pode estar disposto a uma maior distância ao longo de um cabo de receptor. Assim, o sinal eletromagnético detectado pelo primeiro par de eletrodos C, D representará um diferente deslocamento para cada transmissor eletromagnético A, B e AA, BB do que um sinal detectado pelo segundo par de eletrodos CC e DD.

A Figura 7 mostra outro exemplo do navio transmissor 10. O presente exemplo inclui três transmissores eletromagnéticos 11, 11A, 11B rebocados pelo navio, cada um dos quais pode ser implementado como um par de eletrodos A, B, AA, BB AAA, BBB dispostos ao longo de um respectivo cabo elétrico isolado. O espaçamento entre os eletrodos em cada par A, B, AA, BB, AAA, BBB pode ser predeterminado, ou em alguns exemplos o espaçamento entre os eletrodos pode ser selecionável. Cada transmissor 11, 11A, 11B pode estar acoplado a uma respectiva porção da fonte de ali-

mentação 10A (ou pode estar acoplado a uma fonte de alimentação separada para cada transmissor). Cada porção de fonte de alimentação (ou fonte de alimentação individual) pode estar programada para fazer com que uma corrente elétrica seja transmitida para cada respectivo transmissor 11, 11A, 11B. A corrente transmitida para cada transmissor 11, 11A, 11B pode não estar substancialmente correlacionada com a corrente transmitida para os outros transmissores. Tal corrente pode ser gerada substancialmente como acima explicado com referência às Figuras 3 até 6. Os transmissores mostrados na Figura 7 podem resultar em um diferente deslocamento com relação a cada receptor eletromagnético (por exemplo, pares de eletrodos C, D e CC, DD na Figura 5). Os sinais detectados em cada receptor podem ser avaliados para determinar a resposta da Terra que resulta do sinal transmitido por cada transmissor. Portanto, uma pluralidade de diferentes deslocamentos pode ser avaliada sem a necessidade de levantar sequencialmente utilizando diferentes deslocamentos. Apesar do exemplo mostrado na Figura 7 incluir três transmissores, será apreciado por aqueles versados na técnica que o número de transmissores e os deslocamentos correspondentes não são limitados. Outros exemplos podem utilizar mais ou menos transmissores. É também possível energizar um único transmissor (por exemplo, eletrodo bipolo) com uma pluralidade de diferentes configurações de corrente elétrica como acima explicado para causar a transmissão do campo eletromagnético substancialmente da mesma localização. Alternativamente, uma pluralidade de transmissores eletromagnéticos individuais pode estar em proximidade estreita uns dos outros, e terem substancialmente as mesmas dimensões que os outros, de modo a efetivamente transmitir uma pluralidade de campos eletromagnéticos para dentro da subsuperfície substancialmente da mesma localização.

Em alguns exemplos, os parâmetros de aquisição podem ser otimizados para cada deslocamento específico. Uma técnica para otimizar um ou mais parâmetros de aquisição de sinal está descrita na Publicação de Pedido de Patente Internacional Número WO 2007/104949. Mais especificamente, uma frequência de comutação da corrente utilizada para energizar

cada transmissor pode ser inversamente relacionada com o quadrado do deslocamento.

- Os métodos de acordo com a invenção podem permitir uma avaliação mais rápida de propriedades eletromagnéticas da subsuperfície da Terra do que utilizando o levantamento sequencial de vários deslocamentos de transmissor para receptor.

- Apesar da invenção ter sido descrita com relação a um número limitado de modalidades, aqueles versados na técnica, tendo o benefício desta descrição apreciarão que outras modalidades podem ser imaginadas as quais não afastam do escopo da invenção como aqui descrito. Consequentemente, o escopo da invenção deve ser limitado somente pelas reivindicações anexas.

REIVINDICAÇÕES

1. Método para exploração eletromagnética, que compreende:
transmitir um primeiro sinal eletromagnético para dentro das
formações de subsuperfície;
5 transmitir um segundo sinal eletromagnético para dentro das
formações substancialmente e contemporaneamente com a transmissão do
primeiro sinal, os primeiro e segundo sinais eletromagnéticos substancial-
mente não correlacionados um com o outro;
detectar uma resposta eletromagnética combinada da formação
10 para os primeiro e segundo sinais eletromagnéticos transmitidos; e
determinar uma resposta das formações para cada um dos pri-
meiro e segundo sinais transmitidos da resposta detectada.
2. Método de acordo com a reivindicação 1, em que os primeiro
e segundo sinais eletromagnéticos são sequências binárias pseudorrandô-
15 micas não correlacionadas.
3. Método de acordo com a reivindicação 1, em que os primeiro
e segundo sinais eletromagnéticos têm uma função de correlação cruzada
de substancialmente zero.
4. Método de acordo com a reivindicação 1, ainda compreen-
20 dendo detectar uma resposta combinada em uma pluralidade de localiza-
ções separadas de uma localização da transmissão e uma localização das
localizações de detecção.
5. Método de acordo com a reivindicação 4, em que uma fre-
quência de comutação dos primeiro e segundo sinais transmitidos está in-
25 versamente relacionada a um quadrado de uma distância entre uma locali-
zação de transmissão do primeiro sinal e uma localização de transmissão do
segundo sinal e uma localização de detecção da resposta eletromagnética
combinada.
6. Método de acordo com a reivindicação 1, ainda compreen-
30 dendo transmitir um terceiro sinal eletromagnético para dentro das forma-
ções de subsuperfície, o terceiro sinal transmitido não sendo substancial-
mente correlacionado com o primeiro e o segundo sinais transmitidos.

7. Método de acordo com a reivindicação 6, ainda compreendendo detectar um primeiro, um segundo e terceiro sinais eletromagnéticos em uma localização, e em que uma frequência de comutação em cada um dos primeiro, segundo e terceiro sinais eletromagnéticos está inversamente relacionada a um quadrado da distância entre cada localização de transmissão e cada localização de detecção.

8. Método de acordo com a reivindicação 1, em que os primeiro e segundo sinais transmitidos têm larguras de banda sobrepostas.

9. Método de acordo com a reivindicação 1, que envolve medir uma propriedade dos primeiro e segundo sinais eletromagnéticos mais próximos da sua localização de transmissão.

10. Método de acordo com a reivindicação 9, em que a propriedade é a corrente utilizada para atuar um transmissor eletromagnético.

11. Método de acordo com a reivindicação 1, em que os primeiro e segundo sinais eletromagnéticos são transmitidos substancialmente na mesma localização.

12. Método de acordo com a reivindicação 1, em que determinar a resposta de formação para o primeiro sinal eletromagnético compreende:

(a) desconvolver o sinal detectado utilizando o primeiro sinal eletromagnético;

(b) estimar a resposta de formação para o primeiro sinal eletromagnético utilizando o sinal detectado desconvolvido;

(c) convolver a resposta de formação estimada de (b) com o primeiro sinal eletromagnético; e

(d) subtrair um resultado da convolução da resposta de formação estimada com o primeiro sinal eletromagnético do sinal detectado.

13. Método de acordo com a reivindicação 12, em que a estimativa da resposta de formação para o primeiro sinal eletromagnético utilizando o sinal detectado desconvolvido inclui identificar um pico associado com o primeiro sinal eletromagnético e utilizar o pico para determinar a estimativa.

14. Método de acordo com a reivindicação 12, ainda compreendendo (e) desconvolver o resultado de (d) com o segundo sinal eletromagnético.

tico para produzir uma estimativa da resposta de formação para o segundo sinal eletromagnético.

15. Método de acordo com a reivindicação 14, ainda compreendendo:

5 (f) convolver a estimativa da resposta de formação para o segundo sinal eletromagnético com o segundo sinal eletromagnético;

(g) determinar uma diferença entre o resultado de (f) e o sinal detectado:

10 (h) desconvolver o resultado de (g) com o primeiro sinal eletromagnético para produzir uma estimativa aperfeiçoada da resposta de formação para o primeiro sinal eletromagnético; e

(j) utilizar a estimativa aperfeiçoada produzida em (h) (1) convolvendo a resposta de formação estimada de (h) com o primeiro sinal eletromagnético, e (2) subtrair um resultado da convolução da resposta de formação estimada de (h) com o primeiro sinal eletromagnético do sinal detectado.

16. Método de acordo com a reivindicação 1, ainda compreendendo repetir iterativamente (c) até (j) até a convergência ocorrer.

17. Método de acordo com a reivindicação 1, em que a transmissão dos primeiro e segundo sinais eletromagnéticos compreende transmitir uma corrente elétrica através de um bipolo elétrico.

18. Método de acordo com a reivindicação 1, em que a detecção compreende medir a voltagem transmitida através de um bipolo elétrico.

19. Método para determinar uma resposta de formação de um sinal eletromagnético detectado que resulta de um primeiro sinal eletromagnético transmitido para dentro de uma formação terrestre de subsuperfície e de um segundo sinal eletromagnético transmitido para dentro da formação, os primeiro e segundo sinais sendo transmitidos substancialmente contemporaneamente, o método compreendendo:

30 (a) desconvolver o sinal detectado utilizando o primeiro sinal eletromagnético;

(b) estimar a resposta de formação para o primeiro sinal eletromagnético utilizando o sinal detectado desconvolvido;

(c) convolver a resposta de formação estimada de (b) com o primeiro sinal eletromagnético; e

(d) subtrair um resultado da convolução da resposta de formação estimada com o primeiro sinal eletromagnético do sinal detectado.

5 20. Método de acordo com a reivindicação 19, em que a estimativa da resposta de formação para o primeiro sinal eletromagnético utilizando o sinal detectado desconvolvido inclui identificar um pico associado com o primeiro sinal eletromagnético e utilizar o pico para determinar a estimativa.

10 21. Método de acordo com a reivindicação 20, ainda compreendendo (e) desconvolver o resultado de (d) com o segundo sinal eletromagnético para produzir uma estimativa da resposta de formação para o segundo sinal eletromagnético.

22. Método de acordo com a reivindicação 21, ainda compreendendo:

15 (f) convolver a estimativa da resposta de formação para o segundo sinal eletromagnético com o segundo sinal eletromagnético;

(g) determinar uma diferença entre o resultado de (f) e o sinal detectado:

20 (h) desconvolver o resultado de (g) com o primeiro sinal eletromagnético para produzir uma estimativa aperfeiçoada da resposta de formação para o primeiro sinal eletromagnético; e

25 (j) utilizar a estimativa aperfeiçoada produzida em (h) convolvendo a resposta de formação estimada de (h) com o primeiro sinal eletromagnético, e subtrair um resultado da convolução da resposta de formação estimada de (h) com o primeiro sinal eletromagnético do sinal detectado.

23. Método de acordo com a reivindicação 22, ainda compreendendo repetir iterativamente (c) até (j) até a convergência ocorrer.

30 24. Método de acordo com a reivindicação 19, em que o primeiro e o segundo sinais eletromagnéticos são sequências binárias pseudorrandômicas não correlacionadas.

25. Método de acordo com a reivindicação 19, em que o primeiro e o segundo sinais eletromagnéticos têm uma função de correlação cruzada

de substancialmente zero.

26. Método de acordo com a reivindicação 19, em que os primeiro e segundo sinais transmitidos têm larguras de banda sobrepostas.

27. Método de acordo com a reivindicação 19, em que os primeiro e segundo sinais eletromagnéticos são transmitidos substancialmente na mesma localização.

28. Método de acordo com a reivindicação 19, em que o sinal detectado é obtido a uma pluralidade de diferentes localizações, cada uma das localizações tendo uma distância diferente para uma localização em que os primeiro e segundo sinais são transmitidos.

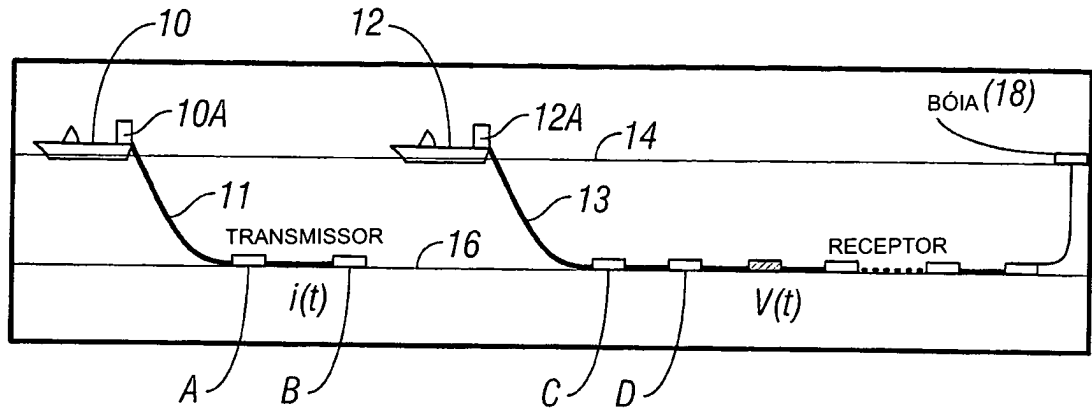


FIG. 1
(TÉCNICA ANTERIOR)

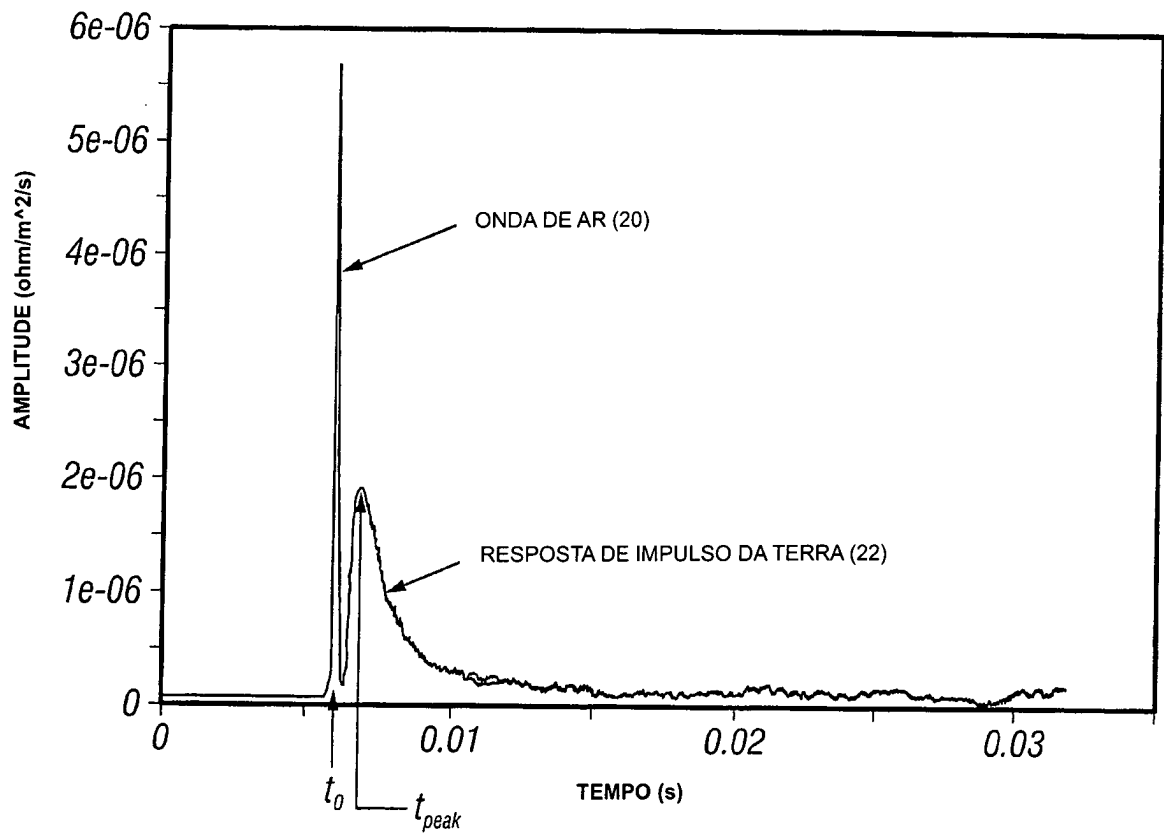
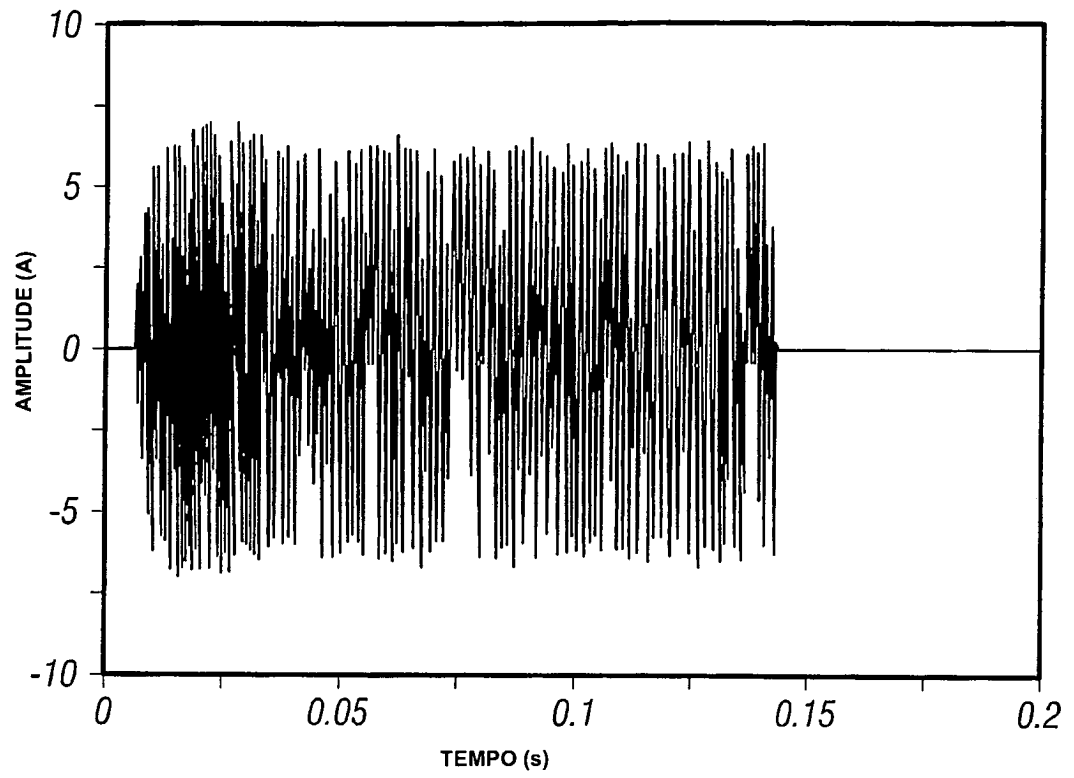
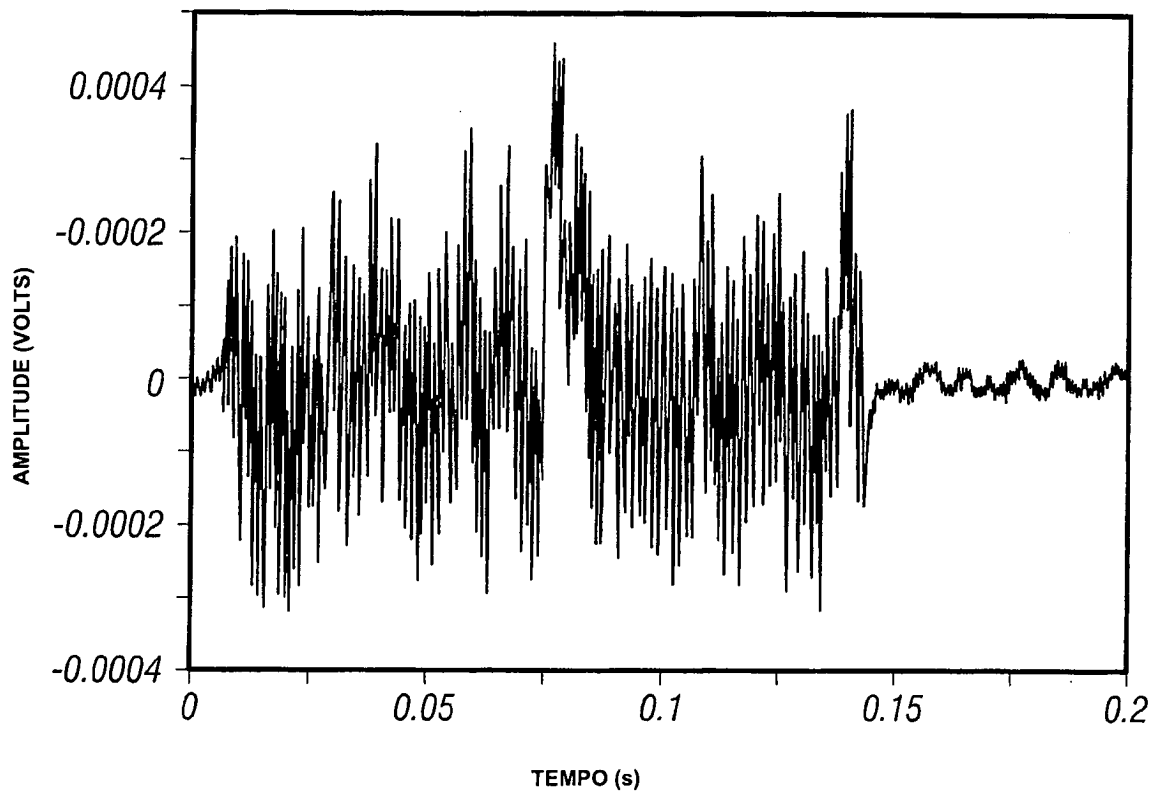


FIG. 4

**FIG. 2****FIG. 3**

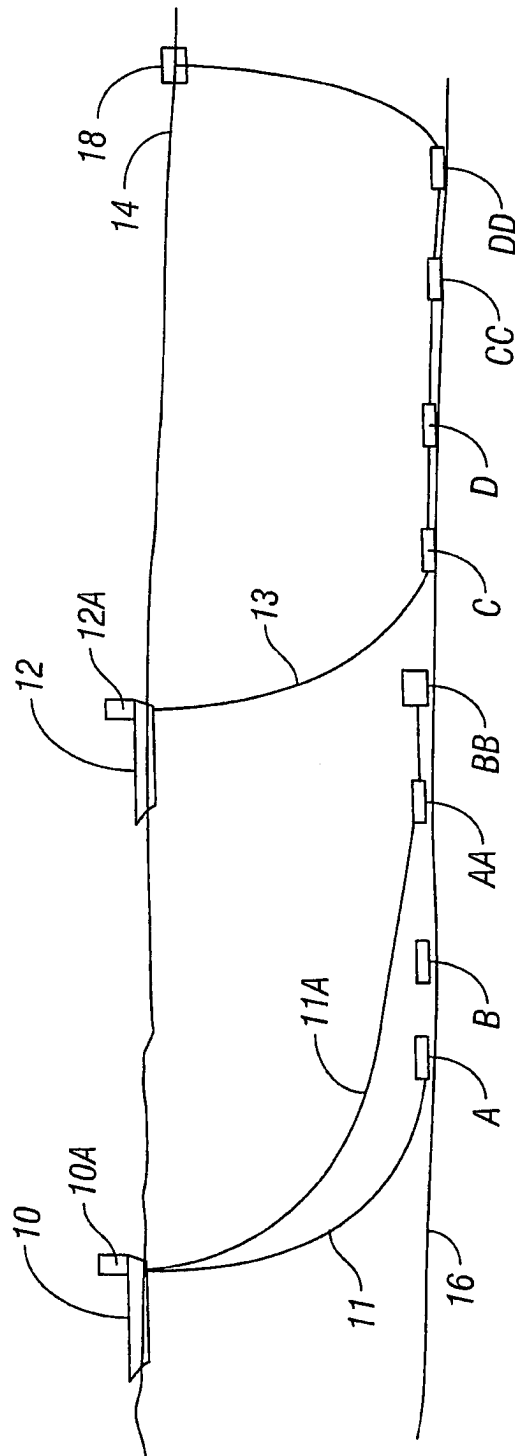


FIG. 5

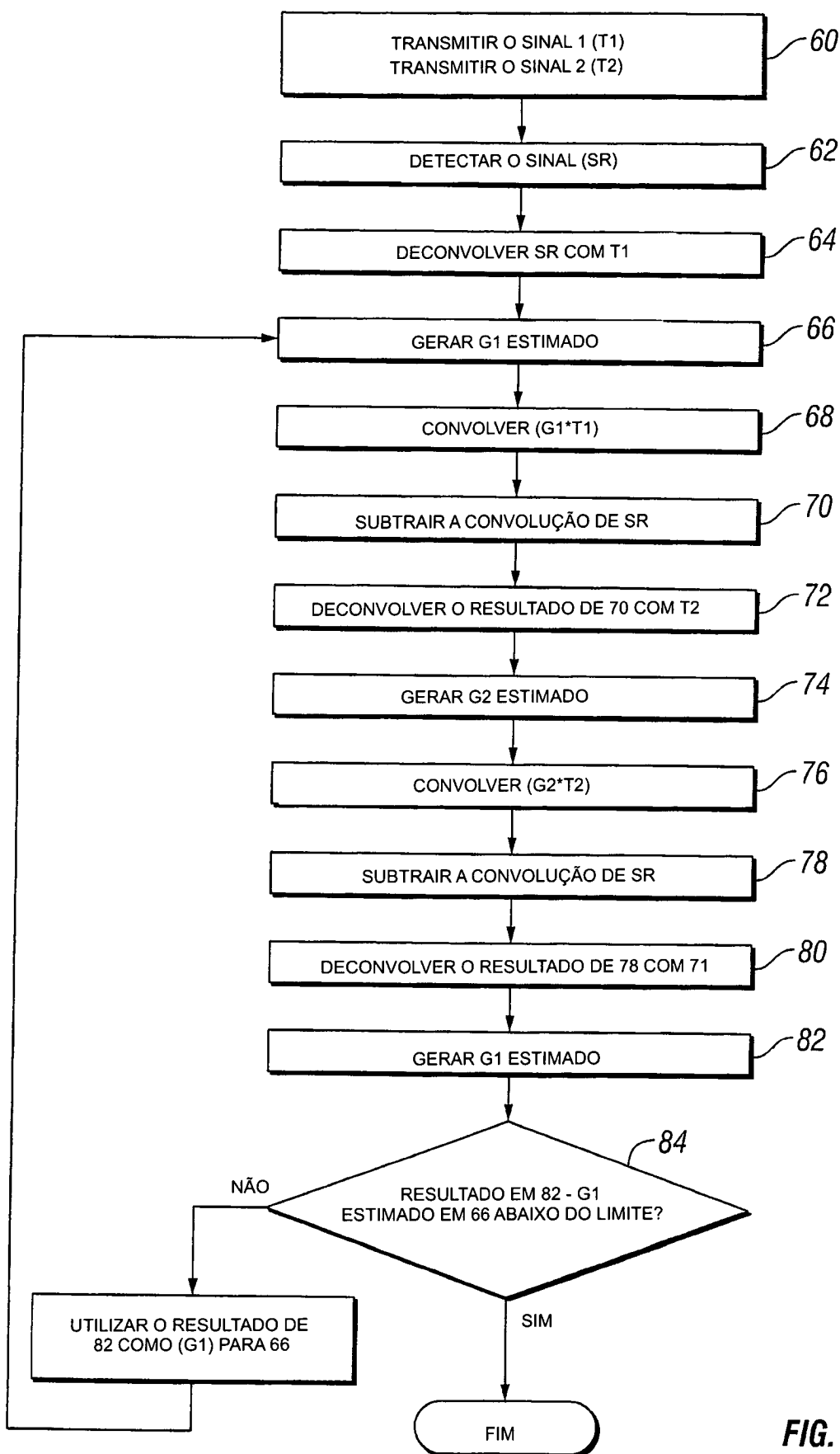
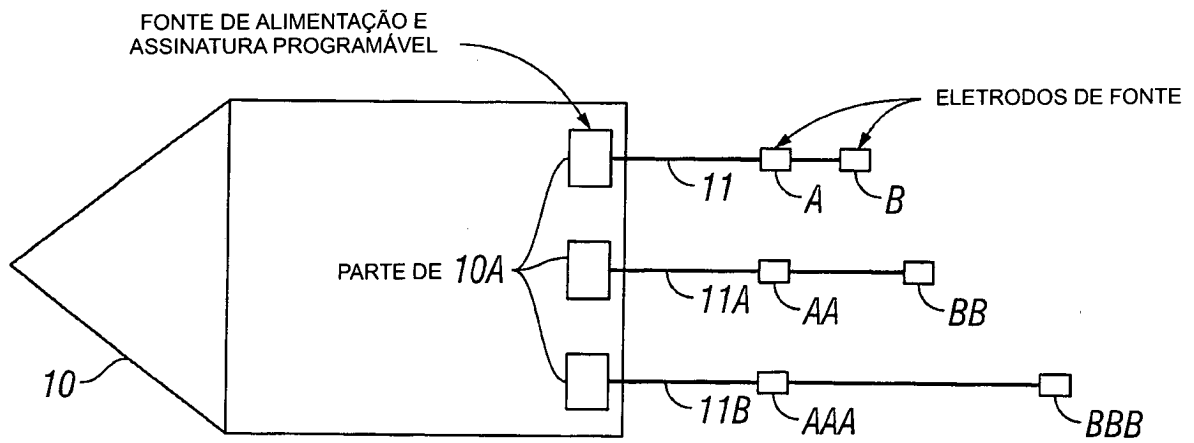


FIG. 6

**FIG. 7**

RESUMO

Patente de Invenção: **"MÉTODO PARA LEVANTAMENTO ELETROMAGNÉTICO UTILIZANDO DUAS OU MAIS FONTES ELETROMAGNÉTICAS SIMULTANEAMENTE ATUADAS"**.

- 5 A invenção refere-se a um método para exploração eletromagnética que inclui transmitir um primeiro sinal eletromagnético para dentro das formações de subsuperfície e transmitir um segundo sinal eletromagnético para dentro das formações substancialmente contemporaneamente com a transmissão do primeiro sinal eletromagnético. Os primeiro e segundo sinais
- 10 eletromagnéticos não estão substancialmente correlacionados um com o outro. Uma resposta eletromagnética combinada da formação para os primeiro e segundo sinais eletromagnéticos transmitidos é detectada. Uma resposta das formações para cada um dos primeiro e segundo sinais transmitidos é determinada da resposta detectada.