



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

(21) **PI 0616468-4 A2**

(22) Data de Depósito: 06/11/2006
(43) Data da Publicação: 26/12/2012
(RPI 2190)



(51) *Int.Cl.:*
G01V 3/00

(54) **Título:** MÉTODO E FERRAMENTA DE PERFILAGEM

(30) **Prioridade Unionista:** 04/11/2005 US 60/733761

(73) **Titular(es):** HALLIBURTON ENERGY SERVICES, INC

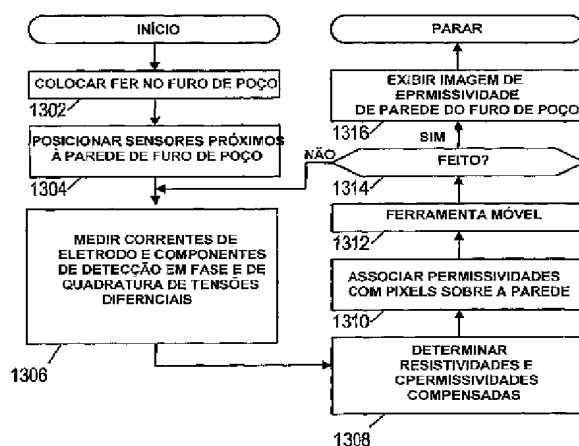
(72) **Inventor(es):** LUIS E. SAN MARTIN, MYRICK L. MONROE, WILLIAM J. SCHAECHER

(74) **Procurador(es):** Momsen, Leonardos & CIA.

(86) **Pedido Internacional:** PCT US2006043244 de 06/11/2006

(87) **Publicação Internacional:** WO 2007/056320 de 18/05/2007

(57) **Resumo:** MÉTODO E FERRAMENTA DE PERFILAGEM. Sistemas e métodos de formação de imagens de lama a base de óleo que medem permissividade de formação. Em algumas formas de concretização, os revelados sistemas de perfilagem incluem uma ferramenta de perfilagem em comunicação com equipamentos de computação na superfície. A ferramenta de perfilagem é provida com um arranjo de sensores tendo pelo menos dois eletrodos de tensão posicionados entre pelo menos dois eletrodos de corrente que cria um campo elétrico em uma parede de furo de sondagem, e é ainda provida com componentes eletrônicos acoplados com os eletrodos de tensão para determinar uma magnitude e fase de tensão diferencial. A partir de magnitude e fase, medições de resistividade de formação e de permissividade podem ser determinadas e usadas para construir uma imagem de parede de furo de sondagem.



“MÉTODO E FERRAMENTA DE PERFILAGEM”

REFERÊNCIA CRUZADA COM RELAÇÃO A PEDIDOS PERTINENTES

A presente invenção reivindica prioridade do Pedido Provisional U.S. No. 60/733,761, depositado em 4 de novembro de 2005.

5 ANTECEDENTES

As modernas operações em campo de petróleo demandam uma grande quantidade de informação que se refere a parâmetros e condições encontradas furo descendente. Visto que os perfuradores e operadores são forçados a operar remotamente a partir das formações subterrâneas e reservatórios que eles desejam explorar, seu acesso a informação relevante é limitado. Conseqüentemente, existe uma demanda por ferramentas que provêm novos tipos de informação, informação mais precisa, ou mais eficiente coleta de informação. Exemplos de informação que pode ser coletada inclui características de formações terrenas atravessadas pelo furo de sondagem, e dados que se referem ao tamanho e configuração do furo de sondagem propriamente dito. Esta informação é usualmente registrada e exibida na forma de um perfil, ou seja, um gráfico do parâmetro medido como uma função de posição ou profundidade da ferramenta. A coleta de informação que se refere a condições de furo descendente, que comumente é referida como "perfilagem", pode ser executada por meio de vários métodos incluindo perfilagem por cabo de perfuração e "perfilagem durante perfuração" (LWD).

Na perfilagem por cabo de perfuração, um sensor ou "sonda" é abaixado no interior do furo de sondagem depois de alguma parte ou todo de um poço ter sido perfurado. A sonda fica suspensa na extremidade de um longo cabo ou "cabo de perfuração" que provê suporte mecânico para a sonda e também provê uma conexão elétrica entre a sonda e equipamento elétrico posicionado na superfície do poço. De acordo com técnicas de perfilagem existentes, vários parâmetros das formações terrenas são medidos e

correlacionados com a posição da sonda no furo de sondagem quando a sonda é puxada para furo acima.

Na LWD, o conjunto de perfuração inclui instrumentos de detecção que medem vários parâmetros quando a formação está sendo penetrada, permitindo assim que medições da formação durante isto sejam menos afetadas por meio de invasão de fluido. Enquanto que as medições de LWD são desejáveis, as operações de perfuração criam um ambiente que é geralmente hostil à instrumentação eletrônica, telemetria, e operações de detecção.

10 Nestes e em outros ambientes de perfilagem, é desejável construir uma imagem da parede de furo de sondagem. Dentre outras coisas, tais imagens revelam a estrutura em fina escala das formações penetradas. A estrutura em fina escala inclui estratificações tais como seqüências de xisto/areia, fraturas, e não-homogeneidades causadas por meio de cimentação
15 irregular e variações em tamanho de poro. Orientações de fraturas e estratos podem também ser identificados, permitindo mais acurada modelação de fluxo de reservatório.

A formação de imagens da parede de furo de sondagem pode ser realizada em um número de maneiras, mas ferramentas de micro-resistividade provaram ser eficazes para esta finalidade. As ferramentas de
20 micro-resistividade medem resistividade da superfície de furo de sondagem em uma escala fina. As medições de resistividade podem ser convertidas em valores de intensidade de pixel para obter uma imagem de parede de furo de sondagem. Todavia, lamas a base de óleo podem inibir tais medições devido à
25 elevada resistividade da lama e à variabilidade da impedância de contato devida à relação variável. A Patente US N.º 6,191,588 (Chen) revela uma ferramenta de formação de imagens para uso em lamas a base de óleo. A ferramenta de resistividade de Chen emprega pelo menos dois pares de eletrodos de tensão posicionados sobre uma superfície não condutora entre

um eletrodo de fonte de corrente e um eletrodo de retorno de corrente. Pelo menos em teoria, a separação de eletrodos de tensão e corrente elimina o efeito da lama a base de óleo sobre medições de eletrodo de tensão, permitindo pelo menos qualitativas medições de resistividade de formação.

5 BREVE DESCRIÇÃO DOS DESENHOS

Na seguinte descrição detalhada, referência será feita aos desenhos acompanhantes, nos quais:

a figura 1 mostra um ambiente ilustrativo de perfilagem durante perfuração (LWD);

10 a figura 2 mostra um ambiente de perfilagem por cabo de perfuração ilustrativo;

a figura 3 mostra uma primeira configuração de ferramenta de perfilagem ilustrativa;

15 a figura 4 mostra uma segunda configuração de ferramenta de perfilagem ilustrativa;

a figura 5 mostra uma vista frontal de uma almofada de sensor ilustrativa;

a figura 6 mostra uma seção transversal da almofada de sensor ilustrativa;

20 a figura 7 mostra um esquema ilustrativo da almofada de sensor;

a figura 8A mostra um esquema ilustrativo de uma impedância de valor complexo;

25 a figura 8B mostra um ilustrativo modelo de circuito equivalente para uma formação;

a figura 9 compara diagramas vetoriais ilustrativos para medições de impedância e admitância;

a figura 10 mostra dados experimentais tendo uma dependência de frequência;

a figura 11 é um gráfico de medições de resistividade compensadas;

a figura 12 é um gráfico de medições de reatância compensadas; e

5 a figura 13 é a fluxograma de um ilustrativo método de formação de imagens com medições de permissividade.

Os desenhos mostram formas de concretização ilustrativas da invenção, as quais serão descritas em detalhe. Todavia, a descrição e desenhos acompanhantes não pretendem limitar a invenção às formas de concretização
10 ilustrativas, mas, pelo contrário, têm a intenção de revelar e proteger todas modificações, equivalentes e alternativas que caem dentro do espírito e escopo das reivindicações anexas.

DESCRIÇÃO DETALHADA

Aqui são revelados vários métodos e sistemas de perfilagem
15 que medem magnitude e fase de tensão de respostas de formação a partir de um furo de sondagem cheio com um fluido não condutor tal como uma lama à base de óleo. Em algumas formas de concretização, os sistemas de perfilagem revelados incluem uma ferramenta de perfilagem em comunicação com equipamentos de computação na superfície, tais como um computador
20 pessoal, servidor, ou placa de processamento de sinal digital, ou some outra forma de circuito de computação. A ferramenta de perfilagem é provida com um arranjo de sensores tendo pelo menos dois eletrodos de tensão posicionados entre pelo menos dois eletrodos de corrente que criam um campo elétrico em uma parede de furo de sondagem, e é ainda provida com
25 um circuito eletrônico acoplado com os eletrodos de tensão para determinar uma magnitude e fase de tensão diferencial. A partir das medições de tensão diferencial e do fluxo de corrente medido, os equipamentos de computação podem determinar resistividades e permissividades de parede de furo de sondagem compensadas como uma função de profundidade e azimute e

podem exibir a resistividade ou permissividade como uma imagem de parede de furo de sondagem.

A figura 1 mostra um ambiente ilustrativo de perfilagem durante perfuração (LWD). Uma plataforma de perfuração 2 suporta uma torre 4 que tem um bloco de deslocamento 6 para elevar e abaixar uma coluna de perfuração 8. Uma haste quadrada 10 suporta a coluna de perfuração 8 quando ela é abaixada através de uma mesa rotativa 12. Uma broca de perfuração 14 é acionada por meio de um motor de furo descendente e/ou rotação da coluna de perfuração 8. Quando a broca 14 gira, ela cria um furo de sondagem 16 que passa através de várias formações 18. Uma bomba 20 circula fluido de perfuração através de um tubo de alimentação 22 para a haste quadrada 10, furo descendente através do interior da coluna de perfuração 8, através de orifícios na broca de perfuração 14, de volta para a superfície via a coroa circular ao redor da coluna de perfuração 8, e no interior de um poço de retenção 24. O fluido de perfuração transporta fragmentos a partir do furo de sondagem no interior do poço 24 e ajuda em manter a integridade do furo de sondagem.

Uma ferramenta de formação de imagens de resistividade de LWD 26 é integrada no conjunto de furo descendente, próximo à broca 14. Quando a broca se estende no furo de sondagem através das formações, a ferramenta de perfilagem 26 coleta medições que se referem a várias propriedades de formação bem como à orientação de ferramenta e várias outras condições de perfuração. A ferramenta de perfilagem 26 pode tomar a forma de um colar de perfuração, ou seja, uma tubulação de parede espessa que provê peso e rigidez para ajudar o processo de perfuração. Uma ferramenta de telemetria 28 pode ser incluída para transferir medições de ferramenta para um receptor de superfície 30 e para receber comandos a partir da superfície.

Em vários instantes durante o processo de perfuração, a coluna

de perfuração 8 pode ser removida a partir do furo de sondagem, como mostrado na figura 2. Uma vez quando a coluna de perfuração foi removida, operações de perfilagem podem ser conduzidas usando uma ferramenta de perfilagem por cabo de perfuração 34, ou seja, uma sonda com instrumento de detecção suspensa por meio de um cabo 42 que tem condutores para transportar energia para a ferramenta e telemetria a partir da ferramenta para a superfície. Uma porção de formação de imagens de resistividade da ferramenta de perfilagem 34 pode ter almofadas de detecção 36 que deslizam ao longo da parede de furo de sondagem quando a ferramenta é puxada para furo acima. Um equipamento de perfilagem 44 coleta medições a partir da ferramenta de perfilagem 34, e inclui equipamentos de computação para processar e armazenar a medições coletadas por meio da ferramenta de perfilagem.

A figura 3 mostra uma vista em seção transversal de uma ferramenta de formação de imagem de resistividade de LWD em um furo de sondagem 16. Um mecanismo de solicitação 302 descentraliza a ferramenta 26 para minimizar o contrapeso entre os sensores da ferramenta e a parede de furo de sondagem. Os sensores da ferramenta podem ser posicionados em uma almofada no mecanismo de solicitação 302, ou alternativamente os sensores podem ser posicionados no corpo principal da ferramenta, oposto ao mecanismo de solicitação. Quando a ferramenta 26 gira e progride para o furo descendente na taxa de perfuração, os sensores percorrerão um percurso helicoidal sobre a parede de furo de sondagem. Sensores de orientação dentro da ferramenta podem ser usados para associar as medições de resistividade com as posições dos sensores sobre a parede de furo de sondagem. Equipamentos de computação na superfície podem coletar medições de resistividade, medições de orientação (azimute), e medições de posição de ferramenta, e podem processar as medições coletadas para criar uma imagem de resistividade da parede de furo de sondagem.

A figura 4 mostra uma vista em seção transversal da ferramenta de formação de imagem de resistividade a cabo de perfuração 34 em um furo de sondagem 16. (algumas formas de concretização de ferramenta de formação de imagem de LWD podem ser construídas com uma configuração similar). Almofadas de detecção 36 são estendidas contra a parede de furo de sondagem para minimizar contrapeso. Múltiplas almofadas podem ser usadas para obter medições sobre uma maior fração da circunferência do furo de sondagem. Em algumas formas de concretização, as almofadas são providas em grupos axialmente deslocados para aumentar cobertura circunferencial sem indevida concentração na configuração não estendida.

Nos cenários de perfilagem acima descrito com respeito às figuras 1e 2, o fluido de perfuração presente no furo de sondagem é um fluido eletricamente não condutor, tal como uma lama à base de óleo. Algum do fluido pode se misturar com fragmentos de perfuração ou material que vem das paredes do furo de sondagem para formar uma camada semi-sólida viscosa sobre a parede de furos de sondagem. Esta camada é comumente denominada "torta de lama", e ela previne o contato íntimo entre sensores de perfilagem e formação de material não contaminado. Em adição, o movimento dos instrumentos de perfilagem pode criar uma camada de fluxo de fluido que também separa os sensores de perfilagem a partir da formação de material não contaminado.

A torta de lama e camadas de fluxo de fluido têm uma condutividade muito baixa, a qual cria alguma dificuldade para medições com alta resolução da resistividade de parede de furo de sondagem. A torta de lama cria problemas adicionais onde formações de baixa resistividade são medidas, porque o fluxo de corrente para dentro da formação pode ser relativamente pequeno e, por sua vez, gera uma diferença de tensão extremamente pequena que é difícil de ser medida. Medições através das

camadas de baixa condutividade podem ser melhoradas por: (1) uso de uma corrente alternada; (2) separação dos eletrodos de tensão a fim de aumentar o sinal (ao custo de degradação da resolução espacial); e (3) uso de uma corrente de fonte com uma frequência de operação mais alta.

5 A figura 5 mostra a face de uma almofada de sensor ilustrativa 502 tendo seis pares de eletrodos de tensão 504 posicionados entre eletrodos de corrente 506 e 508. Na prática, as almofadas de sensor podem ser providas com eletrodos de tensão e corrente adicionais, e, de fato, podem operar em múltiplos eixos. Com almofadas de sensor uniaxiais, tais como a almofada 10 502, o comprimento da almofada de sensor é mantido paralelo ao eixo geométrico longo da ferramenta 34. A distância entre os eletrodos de corrente 506, 508 controla a profundidade de investigação, com maiores distâncias provendo maiores profundidades de investigação. A distância entre os eletrodos de tensão 504 controla a resolução espacial da ferramenta, com 15 menores distâncias provendo resoluções mais altas. Atrás de cada um dos eletrodos de corrente 506, 508 está uma correspondente blindagem de condução 510, 512, as quais podem alternativamente ser denominadas como um "eletrodo de proteção". As blindagens ("eletrodos de proteção") podem ser mantidas no mesmo potencial que o correspondente eletrodo de corrente de modo a minimizar quaisquer correntes de fuga a partir dos eletrodos de 20 corrente.

 A seção transversal da almofada de sensor ilustrativa 502 é mostrada na figura 6. A almofada de sensor 502 compreende um substrato de metal 602 para prover a almofada com a rigidez e resistência necessárias. O 25 substrato de metal 602 pode incluir cavidades 604 para reter circuitos de sensores. Para finalidades ilustrativas, as alimentações de eletrodo são mostradas passando através da almofada de sensor 502, mas as alimentações de eletrodo podem alternativamente se conectarem com os circuitos de sensores nas cavidades 604 ou em uma cavidade central (não mostrada).

Em algumas formas de concretização, o substrato de metal 602 compreende aço. A face do substrato de metal 602 é coberta com uma camada de isolamento 606, a qual, em algumas formas de concretização, compreende um material de polietereetercetona (PEEK). Eletrodos de corrente 506 e 508 são embutidos na face da camada de isolamento 606. As blindagens 510 e 512 separam os eletrodos de corrente 506 e 508 a partir do corpo da almofada 502, e as linhas que alimentam os eletrodos de corrente 506, 508 são preferivelmente também blindadas, possivelmente com as blindagens de linha em uma configuração de cabo coaxial ou de cabo triaxial. Em algumas formas de concretização, blindagens são também providas para os eletrodos de tensão e alimentações de eletrodo de tensão. A separação dos eletrodos de corrente a partir das blindagens de eletrodo são insertos de isolamento 608, os quais, em algumas formas de concretização, compreendem um material de PEEK.

Em frequências de medição mais altas, o acoplamento capacitivo com o substrato de metal cria correntes de fuga. Tais correntes de fuga podem severamente prejudicar as medições de permissividade. Para permitir medições em tais frequências, a configuração geométrica da almofada deve ser projetada para minimizar acoplamento capacitivo (por exemplo, por meio do aumento da espessura dos materiais de isolamento). Além disto, o uso de eletrodos de proteção, particularmente quando combinados com uma configuração de detecção de corrente que exclui fluxo de corrente a partir dos eletrodos de proteção, é particularmente eficaz na minimização dos efeitos de fuga de corrente.

A figura 7 mostra um esquema para o circuito de medição 802 da almofada de sensor ilustrativa. O circuito de medição 802 se acopla com os eletrodos de tensão, eletrodos de corrente, e as blindagens de eletrodo. Os vários eletrodos e blindagens, por sua vez, se acoplam com o ambiente de medição que é modelado como um circuito equivalente (discutido abaixo com referência à figura 8).

O circuito de medição 802 compreende uma fonte de corrente ou tensão 806 que estabelece uma corrente oscilante entre os eletrodos de corrente ("eletrodo direito" e "eletrodo esquerdo"). A fonte 806 é também acoplada entre as blindagens de eletrodo ("blindagem direita" e "blindagem esquerda") para manter as blindagens em aproximadamente o mesmo potencial que seus correspondentes eletrodos. Sensores de corrente são acoplados com os eletrodos de corrente para medir simultaneamente fluxos de corrente a partir dos dois eletrodos de corrente. Na forma de concretização ilustrativa, o transformador 808 é acoplado entre a fonte e o eletrodo de corrente esquerdo para converter a corrente de eletrodo em uma tensão que é medida por meio de um primeiro amplificador de detecção 810. Similarmente, o transformador 812 é acoplado entre a fonte e o eletrodo de corrente direito para converter a corrente de eletrodo em uma tensão que é medida por meio de um segundo amplificador de detecção 814. Note que a configuração ilustrada dos transformadores 808, 812 acopla o primário entre a correspondente blindagem e eletrodo de corrente, de modo que fluxo de corrente a partir da blindagem não é incluído como parte do fluxo de corrente medido dos eletrodos de corrente.

A fonte 806 é acoplada com o eletrodo direito e eletrodo esquerdo através de transformadores 808, 812. O eletrodo direito 506 e eletrodo esquerdo 508 injetam uma corrente de excitação em uma formação, criando uma diferença de tensão na formação que é medida por meio de eletrodos de tensão 504. Sensores de corrente, compreendendo transformadores 808, 812 e amplificadores 810, 814, são acoplado com o eletrodo direito e eletrodo esquerdo para medir simultâneos fluxos de corrente a partir dos dois eletrodos de corrente. As correntes medidas podem ser corrigidas para compensar fluxo de corrente de linha de base (ou seja, o fluxo de corrente que seria medido se a ferramenta estivesse isolada em um vácuo ou em ar). Em algumas formas de concretização, a tensão de cada eletrodo de

corrente (em relação ao corpo de ferramenta) é medida e multiplicada por uma constante de calibração no vácuo para determinar corrente de linha de base a partir daquele eletrodo de corrente. Note que os eletrodos de corrente podem estar em diferentes tensões, causando com que uma diferente corrente de linha de base seja determinada para cada eletrodo de corrente. Os valores de corrente corrigidos são determinados por meio de subtração de cada corrente de linha de base a partir da corrente medida para o respectivo eletrodo de corrente, excluindo assim da medição as correntes de linha de base.

Em adição a amplificadores de detecção de corrente 810, 814 para as medições de corrente, o circuito de medição 802 inclui um detector 816 para cada par de eletrodos de tensão para medir a diferença de potencial gerada por meio das correntes de formação. O detector 816 pode tomar a forma de amplificadores de detecção separados para cada eletrodo de tensão, e, em formas de concretização alternativas, pode tomar a forma de um amplificador de tensão diferencial. Em ambos casos, o circuito 802 pode incluir um processador digital para permitir o processamento digital das correntes medidas e diferenças de potencial. Estas correntes e diferenças de potencial são associadas com uma posição na parede de furo de sondagem e processadas para estimar resistividade de formação e permissividade naquela posição. Em algumas formas de concretização, o circuito de medição 802 inclui análogos invólucros e detectores de fase para reduzir as exigências de desempenho do processador de sinal digital.

A figura 8A mostra um circuito equivalente ilustrativo 820 para uma formação. O circuito equivalente 820 inclui uma capacitância 822 em paralelo com uma resistência 824. A impedância de formação resultante é complexa, tendo um componente real (resistivo) e um componente imaginário (capacitivo). Por meio de medição da amplitude e fase relativa da tensão criada por meio de um fluxo de corrente através deste circuito equivalente, os

componentes resistivo e capacitivo podem ser, ambos, determinados. Para uma dada configuração de eletrodo, o valor do componente capacitivo é diretamente proporcional à permissividade de uma formação, permitindo uma honesta determinação de permissividade a partir do valor do componente capacitivo.

O circuito equivalente 820 pode ser uma parte de uma maior configuração de circuito equivalente, a qual mais precisamente modela a configuração de medição de uma almofada de sensor 502. Por exemplo, a figura 8B mostra um modelo de circuito equivalente 830 tendo três valores de impedância complexos Z_1 , Z_2 , e Z_3 para modelar a configuração de medição da almofada de sensor 502. A primeira impedância Z_1 representa as perdas através do corpo de almofada (as quais são grandemente reduzidas pelo uso de eletrodos de proteção), e pode ser esperado que tenham uma resistência na ordem de 10^6 ohms e uma capacitância na ordem de 10^{-8} Farads. A segunda impedância, a qual é mostrada separada em duas, representa a impedância de contato com metade entre a formação e o eletrodo de corrente esquerdo, e metade entre a formação e o eletrodo de corrente direito. A segunda impedância pode ser esperada que tenha uma resistência na faixa entre 10^3 e 10^6 ohms, e uma capacitância na faixa entre 10^{-9} e 10^{-11} Farads. A terceira impedância Z_3 é mostrada acoplada entre a primeira e segunda metades da impedância de contato Z_2 , e ela representa a impedância de formação entre os eletrodos de corrente. (na prática, a queda de tensão através de uma dada fração desta impedância será detectada entre os eletrodos de tensão). A impedância Z_3 terá uma resistência que varia com a resistividade de formação aproximadamente como $R = \rho/G$ (onde G é um fator geométrico dependente de ferramenta com um valor típico de aproximadamente 10 m), e uma capacitância que varia com permissividade de formação aproximadamente como $C = \epsilon \epsilon_0/G$. As porções de resistividade das impedâncias podem ser esperadas que dominem as medições abaixo de em torno de 2-5 kHz, com os

componente capacitivos assumindo um papel mais significativo quando as frequências de medição aumentam além de em torno de 2-5 kHz.

Modelos de circuito equivalente mais complexos são possíveis e podem ser usados para modelar mais acuradamente a configuração de medição. Por exemplo, o amplificador de tensão diferencial 816 (figura 7) pode ser representado por meio de suas impedâncias de entrada característica com relação ao solo, e a impedância da camada de lama à frente de cada eletrodo de tensão pode ser adicionada ao circuito equivalente. Todavia, em algum ponto, a complexidade adicionada falha em melhorar o desempenho de sistema, pois os ganhos marginais em precisão se tornam deslocados por meio de acréscimos em esforço para solucionar os parâmetros de modelo. Por exemplo, se a impedância de entrada para o amplificador de tensão diferencial 816 é suficientemente grande, os efeitos da impedância de camada de lama sobre as medições de eletrodo de tensão pode ser grandemente descontados. Para finalidades de explicação, o circuito equivalente 820 será suficiente.

Um processador pode ser provido como parte do circuito de medição 802 para calcular resistividade de formação e valores de permissividade. Alternativamente, medições de corrente e tensão podem ser comunicadas para os equipamentos de computação na superfície para calcular valores de resistividade e permissividade. Para permitir medições da resistividade de formação, a fase relativa entre as medições de corrente e tensão são incluídas na avaliação. A estimativa de resistividade pode ser expressa como uma função f:

$$R = f(V, I_{\text{TEST}}, \alpha) \quad (1)$$

onde I_{TEST} é a corrente de teste calculada por meio de realização de média I_{LE} (o fluxo de corrente a partir do eletrodo de corrente esquerdo) e IRE (o fluxo de corrente to o eletrodo de corrente direito), V é a tensão medida entre os eletrodos de tensão, e α é o ângulo de fase. A função pode tomar um número de formas que dependem das características de almofada de sensor

experimentalmente medidas e modelos de circuito equivalente da formação. O modelo de circuito equivalente captura a ação recíproca dos efeitos capacitivo e resistivo, permitindo que as contribuições resistiva e capacitiva sejam separadas. Por exemplo, a tensão medida V pode ser expressa como uma
 5 função da corrente I_{TEST} :

$$V = I_{TESTE} * Z_3 = I_{TESTE} \left(\frac{R - j\omega CR^2}{1 + \omega^2 C^2 R^2} \right) \quad (2)$$

onde Z_3 (figura 8B) é modelado como uma resistência R em paralelo com uma capacitância C (figura 8A). é notado que com duas incógnitas (R e C) e duas equações (componentes em fase e de quadratura), a resistividade e a capacitância podem ser encontradas. Todavia, se a tensão medida é usada
 10 como a variável de impedância, as duas incógnitas são muito mais fáceis de serem calculadas:

$$I_{TESTE} = V * Y_3 = V \left(\frac{1}{R} + j\omega C \right) \quad (3)$$

onde Y_3 é o inverso de Z_3 . Quando dividido em partes real e imaginária,

$$\text{Re}\{I_{TEST}\} = I_{TESTE} \cos \alpha = V / R \quad (4)$$

$$\text{Im}\{I_{TESTE}\} = I_{TESTE} \sin \alpha = V (\omega C)$$

Que se reduz para:

$$R = V / (I_{TESTE} \cos \alpha) \quad (5)$$

$$C = (I_{TESTE} \sin \alpha) / \omega V \quad (6)$$

É notado que a resistividade ρ e a permissividade relativa ϵ são proporcionais
 15 às estimadas resistência R e capacitância C :

$$\rho = G \delta V / I_{TESTE} \cdot \cos(\alpha), \quad (7)$$

$$\epsilon = (1/\epsilon_0) \cdot G \cdot (I_{TESTE} \cdot \sin(\alpha)) / \omega \cdot \delta V, \quad (8)$$

onde G é um coeficiente geométrico com base na corrente distribuição em espaço. O valor do fator geométrico G pode ser estimado numericamente ou solucionado experimentalmente e então utilizado como o fator constante que correlaciona resistividade com resistência. O fator geométrico G é calculado
 20 quando da calibração da ferramenta 34.

A figura 9 mostra um primeiro gráfico 902 da relação de fasor entre corrente e tensão no plano complexo, com a fase da tensão sendo medida em relação à corrente. (É notado que a fase dos sinais de corrente e tensão pode, cada, ser individualmente medida com respeito a um dado sinal de referência, e em seguida a diferença de fase dos sinais de corrente e tensão pode ser calculada com fase de um sinal de tensão sendo exibido em relação à fase do sinal de corrente). Os componentes em fase (real) e de quadratura (imaginário) da tensão medida não têm uma simples relação com relação aos desejados valores de resistividade e permissividade (ver a equação (2) acima).

5

10 O segundo gráfico 904 novamente mostra a relação entre a tensão e a corrente, mas com a fase da corrente sendo medida em relação à tensão. A medição dos componentes em fase e de quadratura desta maneira permite um cálculo honesto de resistividade e permissividade a partir do modelo de circuito equivalente 830 pelas equações (7)-(8).

15 Medições experimentais de corrente e tensão foram feitas com uma ferramenta-protótipo. A figura 10 mostra a magnitude da impedância, $|V|/|I|$, como uma função de frequência. Em baixas frequências, o componente resistivo é dominante, causando com que a impedância pareça relativamente constante. Em frequências mais elevadas, o componente capacitivo é

20 dominante, causando com que a impedância exiba uma dependência de $1/\omega$. Esta dependência pode ser explorada para permitir uma estimativa mais acurada do componente capacitivo, e, por sua vez, uma estimativa mais acurada de permissividade relativa.

A figura 11 mostra um gráfico da equação (5) como uma

25 função de frequência, quando calculada a partir de medições experimentais. É observado que a consideração do ângulo de fase α entre sinais de corrente e tensão amplamente compensa for a dependência de frequência, provendo uma medida relativamente independente de frequência de resistência. Se desejado, pode se fazer a média das várias medições de resistência juntas e usada como

a base de uma medição de resistividade de formação.

Similarmente, a figura 12 mostra um gráfico da (o inverso da) equação (6) como uma função de frequência quando calculada a partir de medições experimentais. A consideração do ângulo de fase α amplamente
5 compensa a dependência de frequência, provendo uma medida relativamente independente de frequência da capacitância. Se desejado, se pode fazer a média das várias medições de capacitância juntas e usada como a base uma medição de permissividade de formação.

É notado que, em algumas formas de concretização, medições
10 são realizadas em múltiplas frequências e a constância relativa de estimativas de resistência e capacitância é usada como uma indicação da precisão de modelo de circuito equivalente. Onde os cálculos com base em um dado modelo falham em adequadamente considerar a dependência de frequência, o modelo pode ser atualizado para adicionar componentes adicionais de circuito
15 equivalente para prover tal compensação e melhorar assim a precisão de medição.

A figura 13 mostra a fluxograma de um método de perfilagem ilustrativo. No bloco 1302, uma ferramenta de formação de imagens de resistividade é colocada em um furo de sondagem. Para LWD, a ferramenta é
20 parte do conjunto de furo descendente e é usada para executar perfilagem quando as operações de perfuração são realizadas. Para perfilagem por cabo de perfuração, a ferramenta é parte de uma sonda que é abaixada até o fundo da região de interesse para executar perfilagem quando a ferramenta de perfilagem é puxada para furo acima a uma taxa constante.

25 No bloco 1304, a ferramenta é colocada em modo de perfilagem. Para LWD, esta operação pode (ou não pode) envolver o posicionamento de um descentralizador que força os sensores no corpo de ferramenta contra a parede de furo de sondagem. Alternativamente, a ferramenta de formação de imagens de resistividade de LWD pode ter uma ou

mais almofadas de sensor que são estendidas contra a parede de furo de sondagem. Para perfilagem por cabo de perfuração, múltiplas almofadas de sensor são estendidas contra a parede de furo de sondagem.

Os blocos 1306-1314 representam operações que ocorrem durante o processo de perfilagem. Embora mostradas e descritas em uma forma seqüencial, as várias operações podem ocorrer simultaneamente, e além disto, elas podem simultaneamente ocorrer para múltiplos pares de eletrodos de tensão e múltiplas almofadas de sensor. No bloco 1306, a ferramenta fornece um sinal de corrente em múltiplas freqüências entre os eletrodos de corrente, Em algumas formas de concretização, a ferramenta cicla seqüencialmente através de um conjunto de diferentes freqüências. Em outras formas de concretização, o sinal de corrente provê energia em múltiplas freqüências simultaneamente. Quando a ferramenta energiza a formação via os eletrodos de corrente, a ferramenta mede a amplitude e fase relativa das tensões diferenciais entre os vários pares de eletrodos de tensão. Para as seqüenciais formas de concretização de multi-freqüências, medições de tensão diferencial são feitas para cada freqüência. Para as simultâneas formas de concretização de multi-freqüências, as medições de tensão diferencial podem ser filtradas ou transformadas para obter a amplitude e resposta de fase para cada freqüência.

No bloco 1308, a ferramenta determina uma medição de resistividade e permissividade para cada par de eletrodos de tensão de acordo com as equações (7) e (8). Ao fazer as medições, algumas formas de concretização de ferramenta determinam a corrente de teste I_{TEST} por meio de combinação das medições a partir dos sensores de corrente 810 e 814 (figura 7). Em adição, algumas formas de concretização de ferramenta podem fazer e combinar múltiplas medições de amplitude e fase das tensões diferenciais em dada freqüência, e combinar as múltiplas medições para obter uma medição de amplitude e fase média para uso como a base do cálculo de resistividade e

permissividade. Tal realização de média pode melhorar a relação de sinal para ruído e melhorar assim a precisão de medição.

Ainda adicionalmente algumas formas de concretização de ferramenta podem combinar medições de permissividade a partir de diferentes pares de eletrodos de tensão, negociando assim resolução espacial para alta precisão de medição. Em ainda outras formas de concretização de ferramenta, as medições de permissividade feitas em frequências diferentes podem ser combinadas para melhorar ainda mais a precisão de medição. Alternativamente, as medições de permissividade feitas com diferentes frequências de sinal podem ser analisadas para prover uma indicação da qualidade da estimativa de permissividade (estimativas consistentes indicam qualidade mais alta), e podem ser usadas para refinar ainda mais o modelo de circuito equivalente se as medições exibirem uma consistente dependência de frequência.

Em uma variação do cálculo de medição, medições de amplitude e fase de tensão absoluta são feitas para cada eletrodo de corrente e tensão. Com a informação adicional tornada disponível por meio desta proposta, as impedâncias de camada de lama (representadas no circuito equivalente 830 pela impedância Z_2), são medidas e usadas juntamente com as medições de tensão para determinar correções de medição. As correções de medição levam em conta as correntes de fuga residuais e variações de medição causadas por alterações na impedância de lama. Em algumas formas de concretização, as correções de medição são aplicadas diretamente nas medições de corrente e/ou tensão, enquanto que, em formas de concretização alternativas, as correções são levadas em conta para solucionar o modelo de circuito equivalente para a impedância de formação Z_3 .

No bloco 1310, a ferramenta, ou mais provavelmente, o equipamento de perfilagem em superfície, acoplado com a ferramenta, associa as medições de resistividade e permissividade compensadas com uma

medição de posição e orientação, permitindo assim uma determinação de valores de pixel de imagem da parede do furo de sondagem. No bloco 1312, a ferramenta se move ao longo do furo de sondagem, e no bloco 1314, uma verificação é realizada para determinar se as operações de perfilagem devem
 5 continuar (por exemplo, se a ferramenta de perfilagem atingiu o fim da região de interesse). Para operações de perfilagem continuadas, os blocos 1306-1314 são repetidos. Uma vez quando as operações de perfilagem estão completas, o equipamento de perfilagem na superfície mapeia as medições de permissividade em pixéis de imagem de parede de furo de sondagem e exibe
 10 uma imagem de permissividade da parede de furo de sondagem no bloco 1316.

O que segue é uma discussão da faixa de frequências de medição preferidas e sensibilidade de medição de permissividade potencial para certas formas de concretização de ferramenta. A equação (3) pode ser re-
 15 escrita como

$$Y_3 = G \left(\frac{1}{\rho} + j\omega\epsilon_0\epsilon \right) \quad (9)$$

onde G é um coeficiente geométrico com base na distribuição de corrente no espaço, ρ é a resistividade de formação, e ϵ é a permissividade relativa de uma formação. O ângulo de fase relativa α pode ser facilmente verificado como sendo

$$\alpha = \arctan (\rho.(\omega\epsilon_0\epsilon)) \quad (10)$$

20 Considerando-se uma resistividade de formação de 10 Ωm , uma frequência de medição de 600 kHz, e uma permissividade de espaço livre de $8,8 \times 10^{-12}$ F/m, a permissividade relativa mínima que pode ser medida é aproximadamente:

$$\epsilon = (\rho\omega\epsilon_0)^{-1} \tan (\Delta\alpha) \approx 3000 \tan (\Delta\alpha) \approx 52 \Delta\alpha \quad (11)$$

onde $\Delta\alpha$ é a resolução da medição de ângulo de fase em graus e a
 25 aproximação é boa para pequenos ângulos ($< 25^\circ$). Assumindo uma resolução angular de 1° , a mínima permissividade relativa que pode ser medida é em

torno de 52. Com uma formação mais condutora ($1 \Omega\text{m}$), a aproximação se torna

$$\varepsilon \approx 520 \Delta\alpha \quad (12)$$

ou em torno de 520 com uma resolução angular de 1° . Com uma frequência de interrogação mais baixa de 300 kHz ou uma pior resolução angular de 2° , estes valores de permissividade mínima se duplicam. Embora estes valores de permissividade relativa possam parecer ser altos, a sensibilidade de ferramenta pode, não obstante, ser adequada para detectar formações que têm valores de permissividade anormalmente altos (em dezenas ou centenas), os quais podem ser indicativos de certos tipos de rocha de fonte. Se $\varepsilon = 10.000$ é tomado como a desejada permissividade mínima que pode ser detectada com uma resolução angular de 1° em formações com resistividades de $10 \Omega\text{m}$ ou mais altas, a frequência de interrogação para medições de permissividade pode ser ajustada tão baixa quanto 20 kHz. Evidentemente, com formações mais resistivas ou melhor resolução angular (o que pode ser obtido por meio da combinação de múltiplas medições), frequências de interrogação apropriadas podem cair até mesmo abaixo de 5 kHz.

Assim, pode ser desejado se ter uma ferramenta que faz medições com uma faixa de frequências de fonte, preferivelmente variando de abaixo de em torno de 5 kHz até acima em torno de 500 kHz. Algumas formas de concretização irão empregar pelo menos três diferentes frequências de medição. É notado que estimativas de permissividade de diferentes frequências podem ser combinadas para obter uma melhor estimativa. Uma tal combinação poderia assumir a forma de uma média ponderada, com maior ponderação sendo colocada nas estimativas em frequências mais altas, as quais podem ser esperadas que sejam mais exatas. Medições de permissividade para algumas ferramentas podem exibir uma tendência ou dependência de frequência que pode ser modelada, e uma técnica de ajuste de curva pode ser empregada para refinar a estimativa de permissividade.

Embora formas de concretização ilustrativas desta invenção tenham sido mostradas e descritas, modificações das mesmas podem ser feitas por uma pessoa especializada na arte sem fugir do espírito ou ensinamento desta invenção. As formas de concretização descritas aqui são ilustrativas e não são limitativas. Muitas variações e modificações do sistema e aparelho são possíveis e estão dentro do escopo da invenção. Por exemplo, não obstante a descrição e reivindicações usem o termo "resistividade", é amplamente reconhecido que condutividade (o inverso de resistividade) tem uma correspondência de um para um com resistividade e, conseqüentemente, freqüentemente serve como um equivalente funcional para resistividade. Capacitância e permissividade relativa são diretamente proporcionais uma à outra e, em conseqüência, alguns sistemas podem usar um como um equivalente funcional do outro. Por conseguinte, o escopo de proteção não é limitado às formas de concretização descritas aqui, mas é somente limitado por meio das reivindicações que seguem, cujo escopo deve incluir todos equivalentes da matéria das reivindicações.

REIVINDICAÇÕES

1. Método de perfilagem, caracterizado pelo fato de que compreende:

5 criar um campo elétrico oscilatório em uma parede de furo de sondagem usando pelo menos dois eletrodos de corrente de um arranjo de sensores;

medir uma magnitude e fase de tensão diferencial com pelo menos dois eletrodos de tensão posicionados entre os pelo menos dois eletrodos de corrente; e

10 determinar uma medição indicativa de uma propriedade de formação com base pelo menos em parte na fase de tensão diferencial.

2. Método de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pelo fato de que a propriedade de formação compreende pelo menos uma de permissividade de formação e resistividade de formação.

15 3. Método de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pelo fato de que compreende adicionalmente:

usar a magnitude e fase de tensão diferencial e magnitude e fase de fluxo de corrente para determinar uma medição de permissividade que é associada com uma posição sobre a parede de furo de sondagem.

20 4. Método de acordo com a reivindicação 2, caracterizado pelo fato de que a fase de tensão diferencial e a fase de fluxo de corrente são, cada, medidas com respeito a um sinal de referência, e a medição de permissividade é determinada com base pelo menos em parte em uma diferença de fase entre a fase de tensão diferencial e a fase de fluxo de corrente.

25 5. Método de acordo com a reivindicação 3, caracterizado pelo fato de que ainda compreende:

formar uma imagem de parede de furo de sondagem a partir de múltiplas de tais medições de permissividade.

6. Método de acordo com a reivindicação 2, caracterizado pelo

fato de que dito campo elétrico oscilatório é criado com múltiplas frequências, e em que dita medição indicativa de permissividade de formação é determinada a partir de medições de magnitude e fase de tensão em frequências diferentes.

- 5 7. Método de acordo com a reivindicação 3, caracterizado pelo fato de que uma medição de permissividade é determinada de acordo com

$$\varepsilon = (1/\varepsilon_0) \cdot G \cdot (I_{\text{TESTE}} \cdot \sin(\alpha)) / \omega \cdot \delta V,$$

em que ε_0 é a permissividade de um vácuo, G é um coeficiente geométrico, δV é a tensão diferencial, I_{TEST} é o fluxo de corrente através da formação, ω é a frequência de I_{TEST} , e α é o ângulo de fase.

- 10 8. Método de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pelo fato de que ainda compreende:

determinar uma medição indicativa de resistividade de formação com base na magnitude e fase de tensão diferencial.

- 15 9. Método de acordo com a reivindicação 8, caracterizado pelo fato de que a medição de resistividade é determinada de acordo com

$$\rho = G \delta V / I_{\text{TEST}} \cdot \cos(\alpha),$$

em que G é um coeficiente geométrico, δV é a tensão diferencial, I_{TEST} é o fluxo de corrente através da formação, e α é o ângulo de fase.

- 20 10. Método de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pelo fato de que o campo elétrico oscilatório tem uma frequência entre aproximadamente 5 kHz e aproximadamente 100 kHz.

11. Método de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pelo fato de que cada dos pelo menos dois eletrodos de corrente é provido com blindagens de condução para minimizar corrente de fuga a partir dos pelo menos dois eletrodos de corrente.

- 25 12. Ferramenta de perfilagem, caracterizada pelo fato de que compreende:

um arranjo de sensores tendo pelo menos dois eletrodos de

tensão posicionados entre pelo menos dois eletrodos de corrente, em que os pelo menos dois eletrodos de corrente são energizados para criar um campo elétrico oscilatório em uma formação que forma uma parede de furo de sondagem;

5 um detector de tensão acoplado com os pelo menos dois eletrodos de tensão para medir uma magnitude e fase de tensão diferencial induzida pelo campo elétrico;

 um processador em comunicação com o detector de tensão e com o pelo menos um sensor de corrente para determinar uma medição
10 indicativa de uma propriedade de formação com base na magnitude e fase de tensão diferencial.

13. Ferramenta de perfilagem de acordo com a reivindicação 12, caracterizada pelo fato de que a propriedade de formação é permissividade.

15 14. Ferramenta de acordo com a reivindicação 13, caracterizada pelo fato de que o processador usa a magnitude e fase de tensão diferencial para determinar uma medição de permissividade que é associada com uma posição na parede de furo de sondagem.

 15. Ferramenta de acordo com a reivindicação 14,
20 caracterizada pelo fato de que o processador determina uma imagem de parede de furo de sondagem a partir de múltiplas de tais medições de permissividade.

 16. Ferramenta de acordo com a reivindicação 13, caracterizada pelo fato de que o campo elétrico oscilatório é criado com
25 múltiplas frequências, e em que dita medição indicativa de permissividade de formação é determinada a partir de medições de magnitude e fase de tensão em frequências diferentes.

 17. Ferramenta de acordo com a reivindicação 14, caracterizada pelo fato de que uma medição de permissividade é determinada

de acordo com

$$\varepsilon = (1/\varepsilon_0) \cdot G \cdot (I_{\text{TESTE}} \cdot \sin(\alpha)) / \omega \cdot \delta V,$$

em que ε_0 é a permissividade de um vácuo, G é um coeficiente geométrico, δV é a tensão diferencial, I_{TEST} é o fluxo de corrente total através da formação, ω é a frequência de I_{TEST} , e α é o ângulo de fase.

5 18. Ferramenta de acordo com a reivindicação 13, caracterizada pelo fato de que o processador determina uma medição indicativa de resistividade de formação com base na magnitude e fase de tensão diferencial.

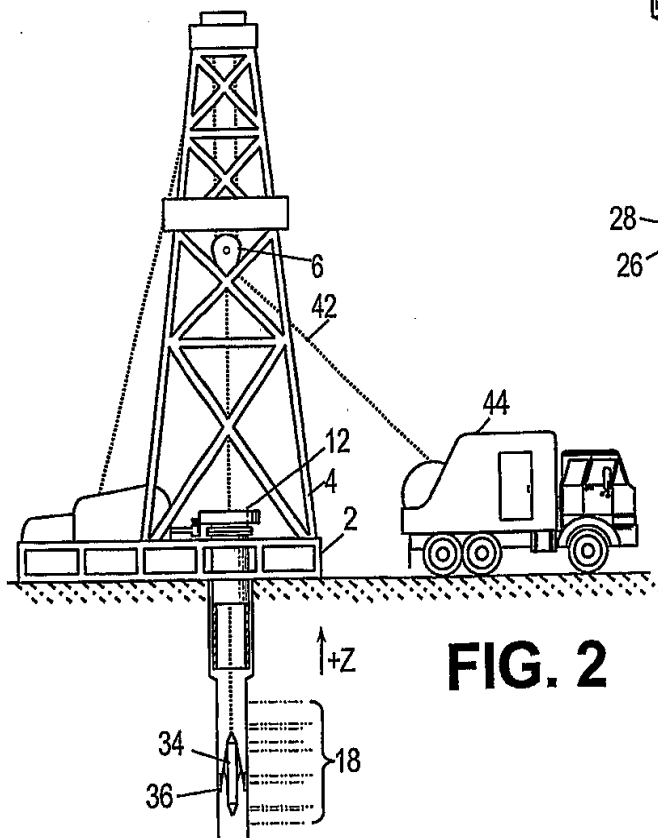
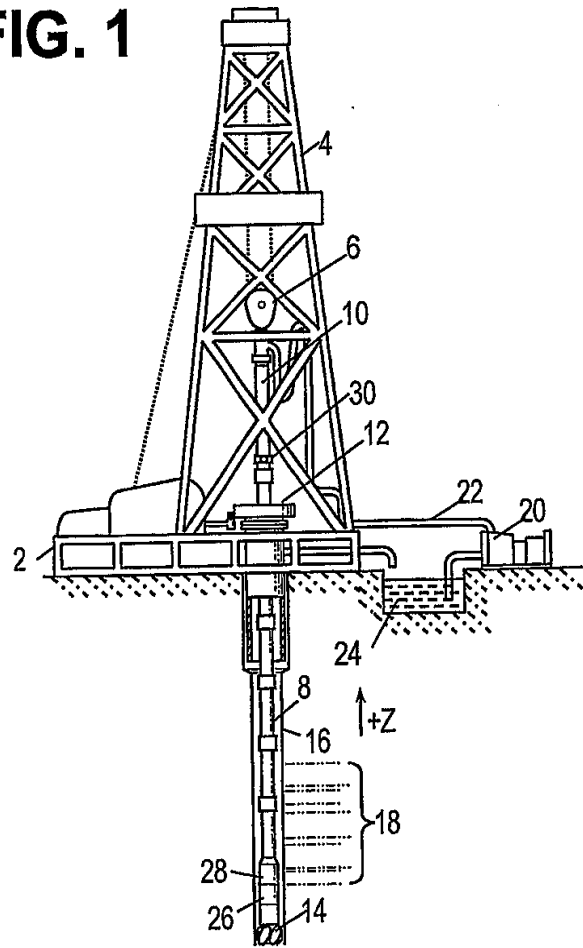
10 19. Ferramenta de acordo com a reivindicação 18, caracterizada pelo fato de que a resistividade é determinada de acordo com:

$$\rho = G \delta V / I_{\text{TESTE}} \cdot \cos(\alpha),$$

em que G é um coeficiente geométrico, δV é a tensão diferencial, I_{TEST} é o fluxo de corrente através da formação, e α é o ângulo de fase.

15 20. Ferramenta de acordo com a reivindicação 12, caracterizada pelo fato de que o campo elétrico oscilatório tem uma frequência entre aproximadamente 5 kHz e aproximadamente 100 kHz.

21. Ferramenta de acordo com a reivindicação 12, caracterizada pelo fato de que cada dos pelo menos dois eletrodos de corrente é provido com uma correspondente blindagem de condução para minimizar corrente de fuga a partir dos pelo menos dois eletrodos de corrente.

FIG. 1**FIG. 2**

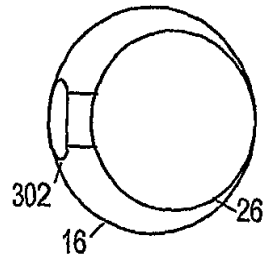


FIG. 3

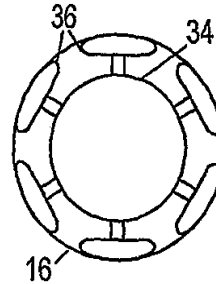


FIG. 4

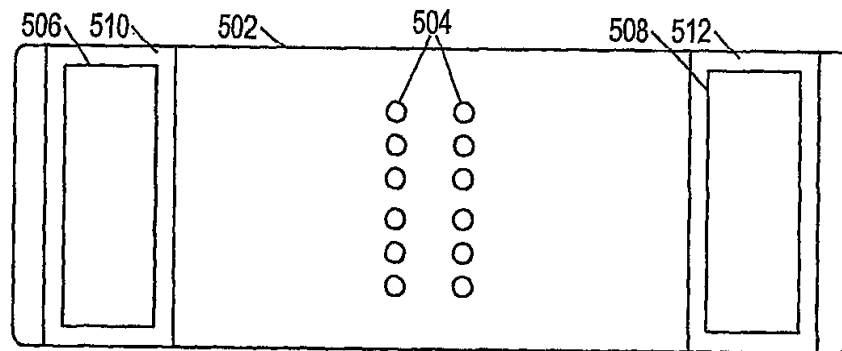


FIG. 5

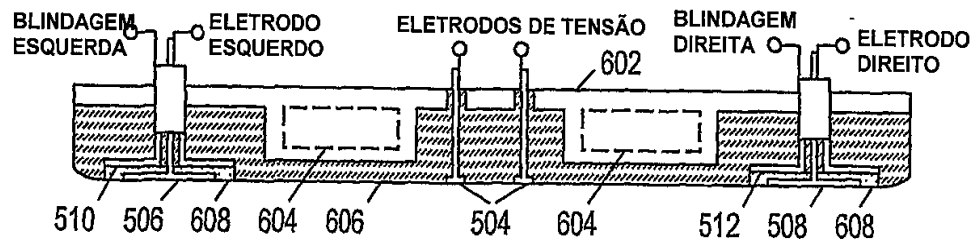


FIG. 6

FIG. 7

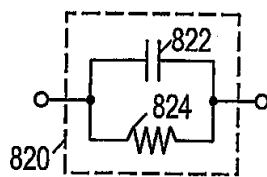
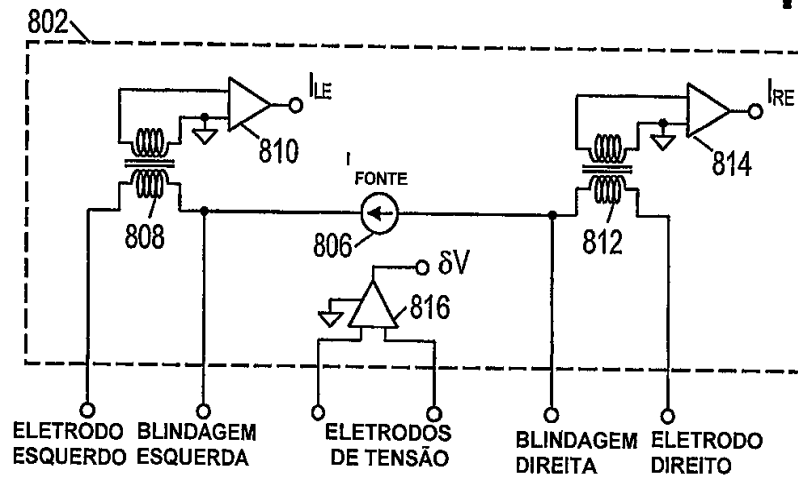
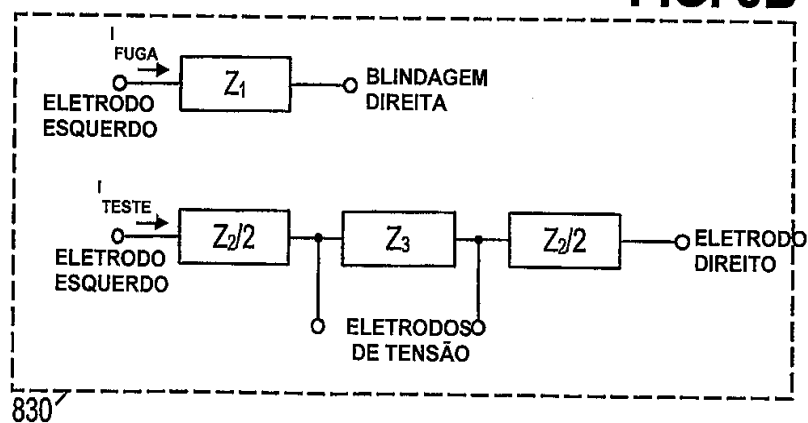
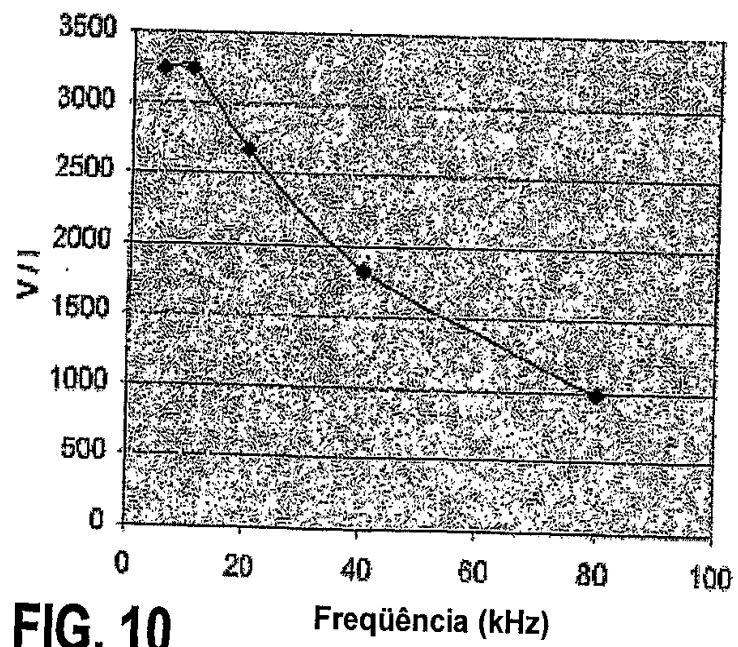
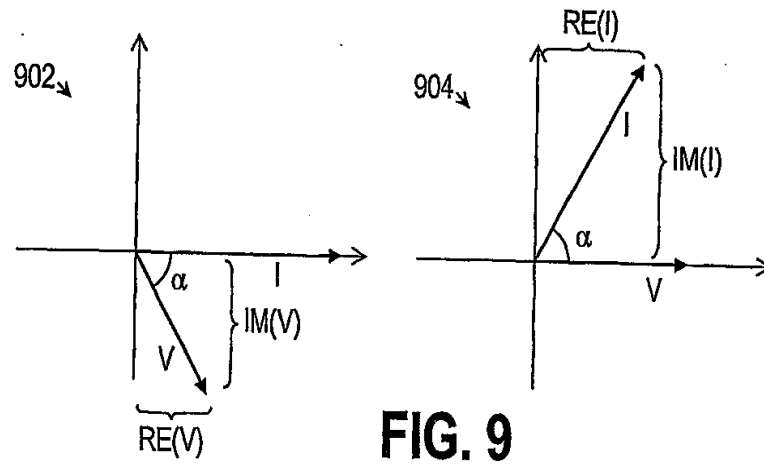


FIG. 8A

FIG. 8B





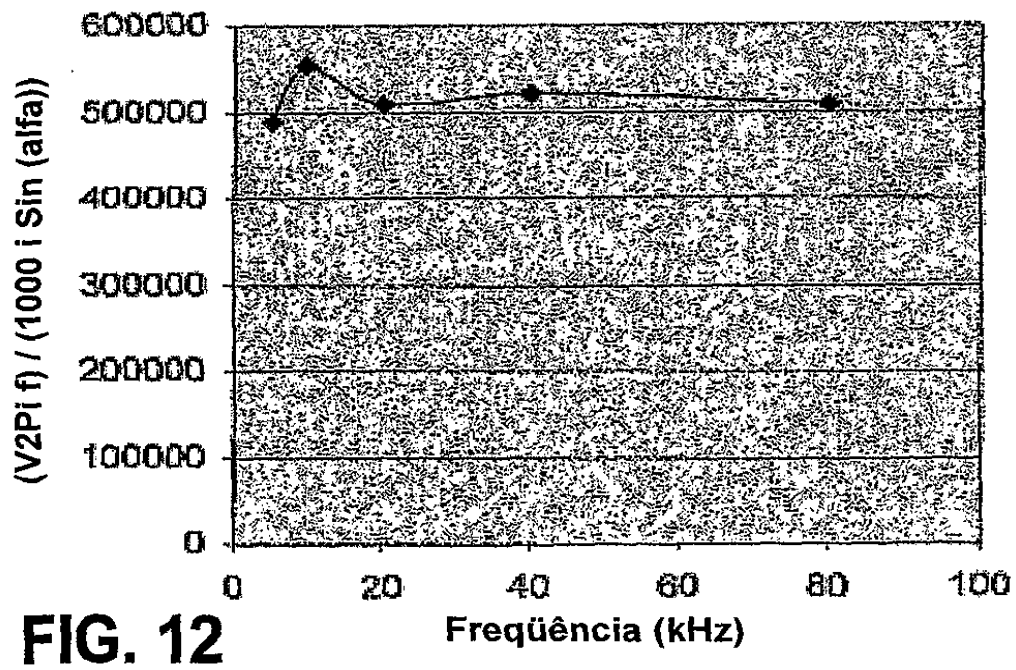
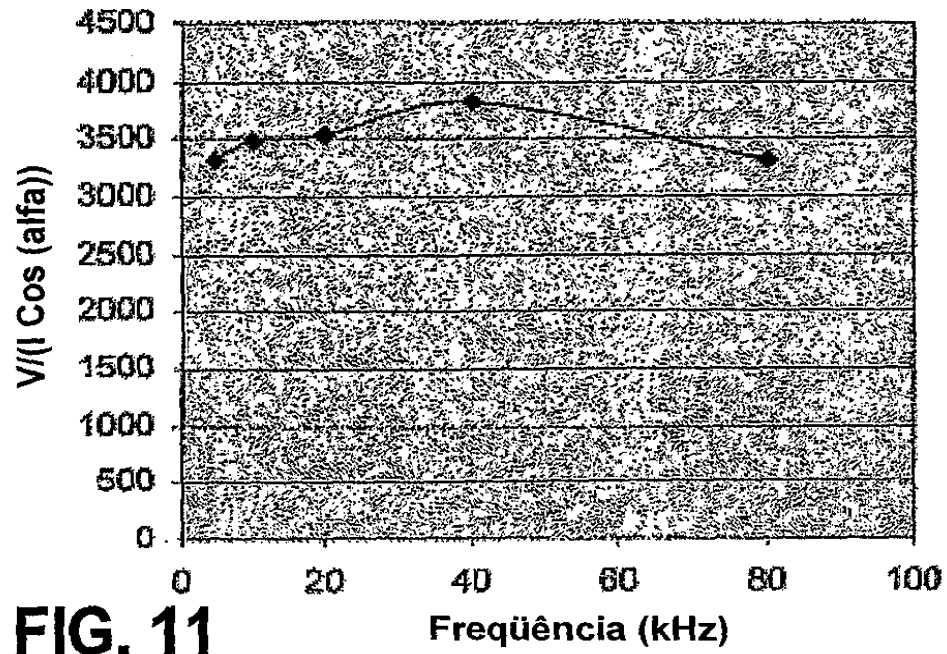
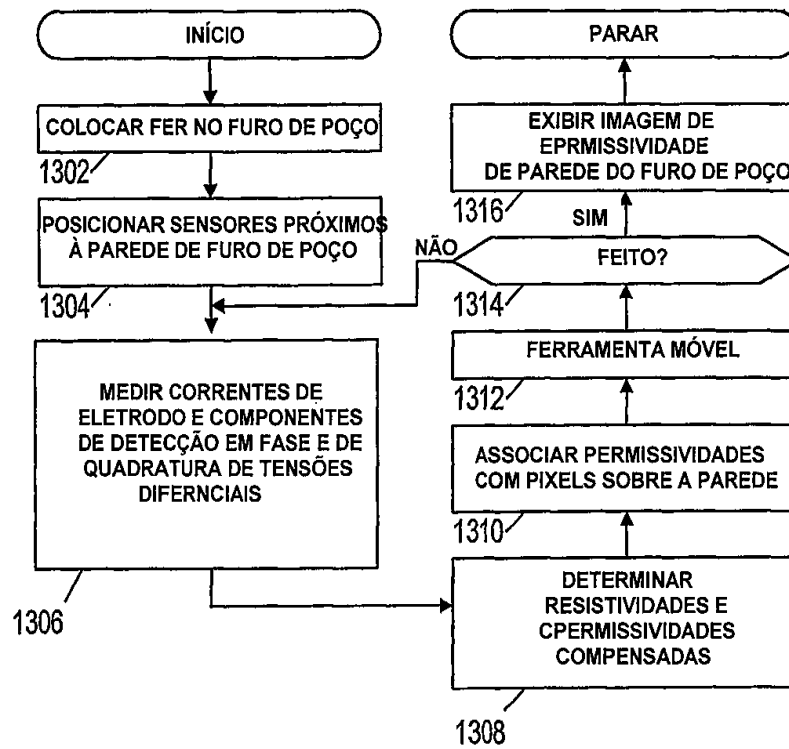


FIG. 13



RESUMO

“MÉTODO E FERRAMENTA DE PERFILAGEM”

Sistemas e métodos de formação de imagens de lama a base de óleo que medem permissividade de formação. Em algumas formas de concretização, os revelados sistemas de perfilagem incluem uma ferramenta de perfilagem em comunicação com equipamentos de computação na superfície. A ferramenta de perfilagem é provida com um arranjo de sensores tendo pelo menos dois eletrodos de tensão posicionados entre pelo menos dois eletrodos de corrente que cria um campo elétrico em uma parede de furo de sondagem, e é ainda provida com componentes eletrônicos acoplados com os eletrodos de tensão para determinar uma magnitude e fase de tensão diferencial. A partir de magnitude e fase, medições de resistividade de formação e de permissividade podem ser determinadas e usadas para construir uma imagem de parede de furo de sondagem.