



República Federativa do Brasil
Ministério da Economia
Instituto Nacional da Propriedade Industrial

(11) PI 1013305-4 B1



(22) Data do Depósito: 22/01/2010

(45) Data de Concessão: 10/09/2019

(54) Título: SISTEMA PARA MEDIR UMA RESISTIVIDADE DE UMA FORMAÇÃO, MÉTODO PARA DETERMINAR UMA RESISTIVIDADE, E, BROCA DE PERFURAÇÃO INSTRUMENTADA

(51) Int.Cl.: E21B 25/16.

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

(72) Inventor(es): MICHAEL S. BITTAR; VADIM MINOSYAN; GARY E. WEAVER.

(86) Pedido PCT: PCT US2010021715 de 22/01/2010

(87) Publicação PCT: WO 2011/090480 de 28/07/2011

(85) Data do Início da Fase Nacional: 22/12/2011

(57) Resumo: PARA MEDIR UMA RESISTIVIDADE DE UMA FORMAÇÃO, MÉTODO PARA DETERMINAR UMA RESISTIVIDADE E, BROCA Um aparelho para medir uma resistividade de uma formação, compreendendo um conjunto de broca instrumentado acoplado a uma extremidade de fundo do aparelho. Pelo menos uma primeira antena de ondas eletromagnéticas transmite um sinal de onda eletromagnética para a formação. Pelo menos uma segunda antena de ondas eletromagnéticas localizada sobre o conjunto de broca instrumentado e longitudinalmente espaçada da pelo menos uma primeira antena de ondas eletromagnéticas recebe o sinal de onda eletromagnética transmitido através da formação. Circuitos eletrônicos são operacionalmente acoplados à pelo menos uma segunda antena de ondas eletromagnéticas para processar o sinal recebido para determinar uma resistividade da formação próximo ao conjunto de broca instrumentado.

“SISTEMA PARA MEDIR UMA RESISTIVIDADE DE UMA FORMAÇÃO, MÉTODO PARA DETERMINAR UMA RESISTIVIDADE, E, BROCA DE PERFURAÇÃO INSTRUMENTADA”

FUNDAMENTOS DA INVENÇÃO

[0001] Para uma formação conter hidrocarbonetos e permitir que os hidrocarbonetos fluam através dela, a rocha compreendendo a formação deve possuir certas características físicas bem conhecidas. Uma das características reside na formação ter certa resistividade medida (o inverso de condutividade), que pode ser determinada por transceptores apropriados na coluna de perfuração. Análise dos dados destes transceptores fornecem informação com relação à resistividade da formação que circunda a ferramenta de resistividade, que pode ser empregada em conjunto com outros medidores para predizer se a formação produzirá hidrocarbonetos. Além disso, a mudança súbita de medida de resistividade nos limites entre as várias camadas pode ser empregada para localizar esses limites.

[0002] Uma vez que a lama de perfuração no furo de sondagem é normalmente mantida sob uma pressão maior do que a formação, a lama tende a invadir a formação permeável circundando o furo de sondagem, forçando a água conata original ser levada para fora do furo de sondagem. Este fluxo de lama de perfuração se infiltra na formação e cria uma zona invadida ou inundada em torno do furo de sondagem, formando uma zona de transição entre as zonas inundadas e as não afetadas. Esta invasão pode afetar a medida precisa de resistividade da formação. A profundidade de invasão da lama de perfuração é um fator de formação de porosidade, de pressão diferencial de perfuração, de permeabilidade da formação, de perda de água do fluido de perfuração, e de tempo. A fim de reduzir os efeitos de invasão, é desejável medir-se a resistividade o mais próximo possível da broca. Para detectar os limites das camadas é desejável detectar a resistividade da formação à frente da broca.

BREVE DESCRIÇÃO DOS DESENHOS

[0003] Um melhor entendimento da presente invenção pode ser obtido quando as seguintes descrições detalhadas dos exemplos dos modos de realização são consideradas em conjunto com os seguintes desenhos, nos quais a:

A Fig. 1 mostra um diagrama esquemático de um sistema de perfuração;

A Fig. 2 mostra um exemplo de um modo de realização de um conjunto de broca instrumentado;

A Fig. 3A mostra uma seção em corte de uma porção da broca instrumentada mostrando o local de um receptor;

A Fig. 3B-D mostra exemplo de orientação do receptor na broca instrumentada;

A Fig. 4 mostra outro exemplo de sub de broca;

A Fig. 5 mostra um exemplo de um conjunto de broca instrumentado;

A Fig. 6A mostra um exemplo de geometria associada com a análise de uma antena não inclinada;

A Fig. 6B mostra um exemplo de geometria associada com a análise de uma antena inclinada;

A Fig. 7 mostra um modo de realização de um conjunto de broca instrumentado, onde os receptores estão colocados nas lâminas;

A Fig. 8 mostra uma vista em perspectiva de porção da extremidade do conjunto de broca instrumentado;

A Fig. 9 mostra um exemplo de um conjunto de broca instrumentado compreendendo uma antena posicionada na porção da haste da broca de perfuração;

A Fig. 10 mostra um sistema de coordenadas indicando um sistema de coordenadas com relação aos componentes de resistividade ao

acúmulo de sedimentos;

A Fig. 11 mostra outro exemplo de um conjunto de broca instrumentado;

A Fig. 12 mostra outro exemplo de conjunto de broca instrumentado compreendendo uma antena inclinada; e

A Fig. 13 mostra ainda outro exemplo de conjunto de broca instrumentado compreendendo um par de receptores inclinados cruzados.

DESCRIÇÃO DETALHADA

[0004] A Fig. 1 mostra um diagrama esquemático de um sistema de perfuração 710 tendo um conjunto de interior de furo de sondagem de acordo com um modo de realização da presente invenção. Como mostrado, o sistema 710 inclui uma torre convencional 711, erigida no convés de perfuração 712, que suporta uma mesa giratória 714 que é girada por movimento primário (não mostrado) a uma velocidade de rotação desejável. Uma coluna de perfuração 720, que inclui uma seção de tubo de perfuração 722 que se estende para baixo desde a mesa giratória 714 até o furo de sondagem 726. O furo de sondagem 726 pode percorrer um caminho tridimensional. A direção tridimensional do fundo 751 do furo de sondagem 726 é indicada pelo vetor 752. Em um exemplo, o conjunto de broca instrumentado 10 é acoplado à extremidade de interior de furo de sondagem da coluna de perfuração 720 e desintegra a formação geológica 30 quando o conjunto de broca instrumentado 10 gira. A coluna de perfuração 720 é acoplada ao quadro de manobras 730 através da junta do Kelly 721, tornel 728 e linha 729 através de um sistema de polias (não mostradas). Durante as operações de perfuração o quadro de manobras 730 é operado para controlar o peso no conjunto de broca instrumentado 10 e a faixa de penetração da coluna de perfuração 720 no furo de sondagem 726. A operação do quadro de manobras 730 é bem conhecida pela técnica e, assim sendo, ela não é descrita aqui em detalhes. Em um exemplo, o conjunto de broca instrumentado 10 pode girar somente pelo uso

do motor de interior de furo de sondagem 790. Em outro exemplo, o conjunto de broca instrumentado 10 pode girar pela ação combinada da mesa giratória 714 e pelo motor de interior de furo de sondagem 790. Alternativamente, um conjunto de motor de topo (não mostrado) pode ser usado em vez da mesa giratória 714.

[0005] Durante as operações de perfuração, o fluido de perfuração adequado (normalmente referido na técnica como 'lama') 731 de um depósito de lama 732 é circulado sob pressão pela coluna de perfuração 720 e pela bomba de lama 734. O fluido de perfuração 731 passa da bomba de lama 734 para a coluna de perfuração 720 através da linha de fluido 738 e da junta do Kelly 721. O fluido de perfuração 731 é descarregado no fundo do furo de sondagem 751 através de uma abertura do conjunto de broca instrumentado 10. O fluido de perfuração 731 circula para cima, através do espaço anular 727 entre a coluna de perfuração 720 e o furo de sondagem 726, e é descarregado no depósito de lama 732 através da linha de retorno 735. Preferivelmente, uma variedade de sensores (não mostrados) é devidamente empregada na superfície, de acordo com métodos conhecidos pela técnica, para fornecer informação sobre vários parâmetros relacionados com a perfuração, tais como, sobre o grau de fluxo do fluido, peso na broca, carga no ganho, etc.

[0006] Uma unidade de controle de superfície 740 pode receber sinais dos dispositivos e sensores de interior de furo de sondagem através do sensor 743 colocado na linha de fluido 738, e processar sinais de acordo com instruções programadas para a unidade de controle de superfície 740. A unidade de controle de superfície 740 pode mostrar parâmetros de perfuração desejados e outras informações na tela/monitor 742, que pode ser usada por um operador para controlar as operações de perfuração. A unidade de controle de superfície 740 pode conter um computador, memória para armazenar dados, gravador de dados e outros periféricos. A unidade de controle de superfície 740 pode também incluir modelos e pode processar dados, de

acordo com instruções programadas, e responder aos comandos do usuário, que deram entrada através do dispositivo adequado de entrada, como um teclado (não mostrado).

[0007] Em um exemplo de modo de realização da presente invenção, o sistema de fundo de furo de perfuração dirigível (BHA) 759 pode compreender um sistema de medição durante a perfuração (MWD) 758 compreendendo vários sensores para fornecerem informação sobre a formação 30 e sobre parâmetros de perfuração do furo de sondagem. O BHA 759 pode ser acoplado entre o conjunto de broca instrumentado 10 e o duto de perfuração 722. O BHA 759 pode também compreender um motor de perfuração 790.

[0008] Os sensores MWD no BHA 759 podem compreender sensores para medir a resistividade na formação próxima do conjunto de broca instrumentado 10, um dispositivo de raios-gama para medir a intensidade dos raios-gama na formação, sensores para determinar a inclinação e o azimute da coluna de perfuração, e sensores de pressão de interior de furo de sondagem para medir a pressão do fluido de perfuração. Os dispositivos acima indicados podem transmitir dados para um transmissor de interior de furo de sondagem 733 que, por sua vez, transmite dados de volta para a unidade de controle de superfície 740. Em um modo de realização, a técnica de telemetria de pulso de lama pode ser usada para comunicar dados dos dispositivos e sensores de interior de furo de sondagem durante as operações de perfuração. Um transceptor 743, colocado na linha de suprimento de lama 738, detecta os pulsos da lama em resposta aos dados transmitidos pelo transmissor de interior de furo de sondagem 733. O transceptor 743 gera sinais elétricos em resposta às variações de pressão da lama e transmite esses sinais para a unidade de controle de superfície 740. Alternativamente, outras técnicas de telemetria como técnicas eletromagnéticas e/ou acústicas, ou qualquer outra técnica adequada conhecida pode ser utilizada para a finalidade desta

invenção. Em um modo de realização, tubulação de perfuração com fiação pode ser usada para comunicação entre os dispositivos de superfície e de interior de furo de sondagem. Em um exemplo, o transmissor receptor de superfície 780 se comunica com as ferramentas de interior de furo de sondagem usando qualquer técnica de transmissão descrita, por exemplo, a técnica de telemetria de pulso de lama. Isto pode permitir uma comunicação em duas vias entre a unidade de controle de superfície 740 e as ferramentas de interior de furo de sondagem descritas abaixo.

[0009] Em um modo de realização, veja a Fig. 2, o conjunto de broca instrumentado 10 é acoplado à extremidade inferior do BHA 759. O conjunto de broca instrumentado 10 pode compreender uma antena de ondas eletromagnéticas (EW) 15, localizada em uma ranhura circunferencial ou recesso no sub de broca (16) acoplado à broca 5. A antena EW 15 pode ser habilitada para transmitir e/ou receber sinais de ondas eletromagnéticas. Como usada no exemplo da Fig. 2, a antena EW 15 age como transmissora. A ranhura circunferencial pode ser localizada em um plano orientado a 90° do eixo longitudinal da ferramenta. Alternativamente, a ranhura 17 pode ser localizada na seção reduzida da broca calibradora estendida. Em um exemplo, a antena EW 15 compreende um loop de arame circunferencial, como discutido abaixo. A antena EW 15 pode ser recoberta com um material não condutivo, como conhecido pela técnica. Em um modo de realização, a antena transmissora 15 pode ser designada a operar em mais de uma frequência. Frequência de operação pode ser na faixa de, aproximadamente, 1 kHz até, aproximadamente, 10 MHz. O uso dessas técnicas de resistividade, empregando ondas eletromagnéticas, permite determinar a resistividade na presença de fluídos de perfuração condutivos ou não condutivos, por exemplo, em lamas à base de óleo ou água. No modo de realização mostrado na Fig. 2, receptores de bobina 20 e 22 são espaçados axialmente separados como mostrado. Pelo menos um dos receptores pode ser localizado na

passagem entre as lâminas 9. Compreende-se que nesta figura, e nas subsequentes, a formação 30 (não mostrada por questões de clareza) está em contato com uma ou todas as lâminas 9. Em um modo de realização os receptores de bobina 20 e 22 estão localizados axialmente em uma linha que é substancialmente paralela à linha central longitudinal da ferramenta, também chamada de eixo longitudinal da ferramenta.

[00010] A distância entre a antena EW 15 e o ponto médio aproximado entre o receptor 20 e o receptor 22 é designado como L. Em um exemplo, L pode ser da ordem de 30cm. Em outro exemplo, a distância L pode ser \leq 90cm. Uma pessoa experiente na técnica verificará que a profundidade de investigação da formação é relacionada ao espaço entre a antena transmissora e os receptores.

[00011] Como mostrado na Fig. 2, a antena EW 15 é acoplada ao amplificador 26 que, por sua vez, é conduzido pelo oscilador 28 sob o controle do processador 32. O processador 32 mantém interface com o circuito de interface de comunicação 34 e o conversor digital 36. O circuito de interface de comunicação 34 pode fornecer uma interface com o transmissor de pulso de lama 733 do BHA 759.

[00012] Receptores 20 e 22 são, respectivamente, conectados aos amplificadores 40 e 42, e aos circuitos de misturador 44 e 46. Os circuitos de misturador 44 e 46 acionam os filtros de passa-baixa 50 e 52, respectivamente. As saídas dos circuitos de medição de amplitude 54 e 56 são conectadas ao multiplexador 60. As saídas dos filtros de passa-baixa 50 e 52 também são conectadas à entrada do circuito de medição de fase relativa 62, saída da qual é alimentada no multiplexador 60. O circuito de medição de amplitude 54 fornece a medida do sinal da medida de amplitude recebida pelo receptor 20, enquanto o circuito de medição de amplitude 56 mede a amplitude do sinal recebido pelo receptor 22. Similarmente, o circuito de medição de fase relativa 62 fornece uma indicação da diferença de fase entre

os sinais recebidos pelo receptor 20 e os sinais recebidos pelo receptor 22. A pessoa experiente na técnica verificará que a relação entre as medidas de amplitude e a medida da fase relativa são, ambas, indicativas de resistividade da formação próximas dos receptores 20 e 22 no conjunto de broca instrumentado 10. Os receptores 20 e 22 detectam a resistividade azimutal.

[00013] Em outro modo de realização, ainda com referência a Fig. 2, o transmissor de sinal 33 pode alimentar o multiplexador 60 e o comparador de fase 62. A relação entre a amplitude transmitida e a amplitude receptor 20 ou do 22, e a diferença de fase entre o sinal transmitido e fase em qualquer dos receptores, podem ser comparadas para determinar a resistividade da formação entre o transmissor e o receptor selecionado.

[00014] Combinando-se as medidas de resistividade com medidas direcionais adequadas, uma imagem do furo de sondagem pode ser gerada pelo uso de leituras múltiplas à medida que a broca gira em torno do furo de sondagem. Colocando-se múltiplos pares de receptores, por exemplo, 6 pares, em torno da circunferência do conjunto de broca instrumentado 10, a resistividade da formação na broca pode ser calculada.

[00015] Exemplos de receptores 20 e 22 são mostrados nas Figs. 3A-3D. A Fig. 3A mostra uma seção em corte de uma porção da broca 5 com um receptor 322 na cavidade 321 na superfície exterior da broca 5. Como mostrado nas Figs. 3B-3D, o receptor compreende um centro magnético 301 circundado pela bobina 302. O receptor 322 pode ser orientado ao longo de diferentes eixos, como mostrado para medir diferentes componentes do sinal eletromagnético.

[00016] Como mostrado nas Figs. 2 e 3, em um exemplo, os receptores são montados em um diâmetro reduzido da extremidade de trás da broca (receptor 20), ou nas calhas entre as lâminas de calibração próximas na broca 5. Este local propicia proteção para os receptores contra contato direto com a parede do furo de sondagem.

[00017] A Fig. 4 mostra outro exemplo de sub de broca 416 possuindo um transmissor 415 e receptores 420 e 422 montados nele. O sub de broca 416 pode ser montado na broca 5. O transmissor e o receptor podem ser similares aos acima descritos. Também é mostrado um inserto de eletrônica 405 tendo circuitos eletrônicos 430, por exemplo, aqueles descritos na Fig. 2 para controlar a medida de resistividade e comunicar os resultados a um dispositivo de telemetria adequado para transmissão à superfície.

[00018] Em um exemplo, sinais de energia e comunicação são transmitidos entre os eletrônicos 430 e o transmissor de telemetria MWD 733 através do sistema de monocabo 450 colocado no furo do BHA 759. Em um modo de realização, o conjunto de aranha 435 posiciona o conector 436 no caminho do fluxo. O monocabo 450 é conectado ao conjunto de aranha 435 e a um conjunto de aranha similar furo acima próximo ao transmissor MWD 733. Em um exemplo, a energia pode ser fornecida aos sensores por baterias de interior de furo, e as técnicas telemétricas de saltos curtos conhecidas podem ser usadas para transmitir sinais de comunicação, por exemplo, em torno do motor de interior de furo. Em ainda outro exemplo, o motor de interior de furo pode compreender uma alimentação elétrica por fio.

[00019] Os eletrônicos 430 podem compreender circuitos, componentes e processadores para força, interface, e controle de antena e dos receptores associados com o sub de furo instrumentado 416. Além disso, os eletrônicos 430 podem compreender conversão de energia e interface para os eletrônicos para receberem energia e comunicação pelo monocabo 440. Os eletrônicos 430 podem compreender módulos híbridos e/ou multi-chips para minimizar as necessidades de espaço, consumo de energia, e para aumentar confiabilidade. Em um exemplo, os eletrônicos 430 podem compreender sensores direcionais para determinar a inclinação e o azimute do conjunto de broca instrumentado. Alternativamente, esses sensores direcionais podem ser localizados no sistema de MWD 758.

[00020] Como mostrado na Fig. 4, o transmissor 415 pode ser conectado aos eletrônicos 430 através da passagem 445. Da mesma forma, os receptores 420 e 422 podem ser conectados aos eletrônicos 430 através das passagens 423 e 424, respectivamente. Como descrito acima, o transmissor 415 e os receptores 420 e 422, estão em um diâmetro em recesso com relação às lâminas 409. Compreende-se pelas pessoas experientes na técnica que o sub de broca 416 pode ser usado em conjunto com brocas de corte e brocas de cones rotativos.

[00021] Em outro modo de realização, veja Fig 11, um conjunto de broca instrumentado 1200 compreende um conjunto de broca 1205 e um sub de broca 1216. No exemplo mostrado o conjunto de broca 1205 compreende uma coroa de broca 1206 acoplada à haste de broca 1218. A luva calibradora 1210 é montada em torno da haste de broca 1218. A coroa de broca 1206 pode ser acoplada à haste de broca 1218 usando técnicas de soldagem adequadas como discutidas abaixo. A luva calibradora 1210 pode ser acoplada à coroa de broca 1206 e/ou à haste de broca 1218 por quaisquer das muitas técnicas de acoplamento, incluindo, mas não limitativamente, pinagem, ajuste por retração, e/ou soldagem. A antena de transmissão EW 1215 transmite o sinal que é detectado pelo receptor de bobina 1220. Enquanto somente um receptor de bobina é mostrado aqui, outros receptores de bobina podem ser axial ou circunferencialmente espaçados em torno do conjunto de broca 1205. Além disso, enquanto o receptor de bobina 1220 é mostrado aqui na lâmina calibradora 1209, deve-se compreender que o receptor de bobina 1220 pode ser localizado na passagem de diâmetro reduzido 1211 entre as lâminas calibradoras 1209 e/ou no diâmetro reduzido da seção traseira sem lâminas da haste de broca 1218. Os eletrônicos 1230 podem ser localizados em um inserto 1217 que está localizado no furo da seção de traz da haste de broca 1218. A conexão para a antena de transmissão EW 1215 pode ser feita através de condutores (não mostrados), através das

passagens 1223 e 1222. As conexões para os componentes do furo acima podem ser feitas através do sistema de monocabo 1250 colocado no furo do BHA 759. O conjunto de aranha 1235 posiciona o conector 1236 no caminho de fluxo. O monocabo 1240 é conectado ao conjunto de aranha 1235 num conjunto de aranha similar furo acima próximo aos componentes do furo acima. A operação do sistema de monocabo 1250 pode ser similar à operação do sistema de monocabo 450. Alternativamente, tubulação de fios pode ser usada para transmitir energia e sinais de comunicação. Em um exemplo, a energia pode ser fornecida para os sensores e para as baterias de interior de furo, e técnicas telemétricas de saltos curtos podem ser empregadas para transmitir sinais de comunicação, por exemplo, em torno de um motor de interior de furo. Em ainda outro exemplo, o motor de interior de furo pode compreender alimentação elétrica por fios. Deve-se compreender que quaisquer dos exemplos apresentados aqui podem utilizar eletrônicos que estão localizados na haste da broca e/ou no sub de broca.

[00022] A Fig. 5 mostra outro exemplo de conjunto de broca instrumentado 510 compreendendo um sub de broca 516 e uma antena EW inclinada 515 atuando como transmissora. A antena EW inclinada 515 transmissora é inclinada de tal forma que o plano da antena EW inclinada 515 é inclinado em um ângulo ξ_T com relação ao eixo longitudinal da ferramenta de interior de furo. O Ângulo ξ_T pode ficar na faixa de 0-90°. Esse sistema permite determinar a resistividade horizontal, a resistividade vertical e o ângulo de mergulho relativo de formação. Os receptores de bobina 520 e 522 são similares àqueles descritos anteriormente. As antenas inclinadas podem também permitir medida da resistividade à frente da broca 5.

[00023] A Fig. 12 mostra um exemplo de conjunto de broca instrumentado 550 e uma antena EW inclinada 565 espaçada separadamente do conjunto de broca instrumentado. No exemplo mostrado a antena EW inclinada 565 pode ser espaçada do conjunto de broca instrumentado cerca de

76m. Em um exemplo, a antena EW inclinada 565 pode ser colocada acima do motor de perfuração 790. Alternativamente, uma seção de colar de perfuração pode separar a antena EW inclinada 565 do conjunto de broca instrumentado 550. O conjunto de broca instrumentado 550 compreende um sub de broca 560 possuindo uma antena EW 517 que pode atuar como receptora e/ou uma transmissora montada sobre ele. Em um exemplo, a antena EW 517 pode receber sinais EW da antena EW inclinada 565. O espaçamento entre a antena EW inclinada 565 e a antena EW 517 e a inclinação do transmissor EW inclinado 515 faz com que o sinal transmitido se propague mais profundamente na formação à frente da broca e o sinal recebido da antena EW 517 permite medir a resistividade da formação à frente da broca. A rotação da ferramenta no furo de sondagem durante as medidas pode ser usada para fornecer uma imagem de 360° de resistividade da formação à frente da broca.

[00024] Em outro exemplo, a antena EW 517 pode agir como uma transmissora para transmitir ondas eletromagnéticas que são recebidas pelo receptores de bobina 520 e 522, que fornecem a resistividade azimutal e formação de imagem na broca.

[00025] A comunicação entre a antena EW 565 e a antena EW 517 pode ser habilitada pelo uso do sistema de monocabo como discutido previamente com relação a Fig. 4 e Fig. 11. Alternativamente, tubo de fios pode ser empregado para transmitir energia e sinais de comunicação. Em um exemplo, a energia pode ser fornecida para os sensores por baterias de interior de furo, e técnicas telemétricas de saltos curtos podem ser utilizados para transmitir sinais de comunicação, por exemplo, em torno de motor de interior de furo. Em ainda outro exemplo, o motor de interior de furo pode compreender alimentação elétrica for fio.

[00026] Em outro exemplo, a antena EW 517 pode ser eletronicamente mudada para atuar como uma receptora de sinais de ondas eletromagnéticas

transmitidas pela antena EW inclinada 565, e como uma transmissora para transmitir sinais de ondas eletromagnéticas para os receptores de bobina 520 e 522.

[00027] A Fig. 13 mostra outro exemplo de um conjunto de broca instrumentado 570, e de uma antena EW transmissora inclinada 585 espaçada separadamente. O conjunto de broca instrumentado 570 compreende duas antenas EW receptoras inclinadas 571 e 572. O plano da antena EW receptora inclinada 572 é inclinado em ângulo ξ_R do eixo longitudinal da ferramenta. O plano da antena EW receptora inclinada 571 é inclinado em ângulo α do plano da antena EW receptora 572. Em um exemplo ξ_R é cerca de 45° , e α é cerca de 90° . Os sinais de ondas eletromagnéticas transmitidos pela antena EW transmissora 515 são recebidos pelas ambas as antenas EW receptoras 571 e 572. Os sinais podem ser processados empregando-se os circuitos similares aos descritos com relação a Fig. 2 para comparar a relação da amplitude do transmissor com a amplitude do receptor para cada receptor, e a mudança de fase entre o transmissor e cada receptor para permitir a medida de resistividade à frente da broca.

[00028] Em outro exemplo, cada antena EW 571 e 572 pode atuar como transmissora para transmitir ondas eletromagnéticas que são recebidas pelos receptores de bobina 520 e 522 que fornecem resistividade azimutal e formação de imagem na broca.

[00029] A comunicação entre a antena EW 585 e as antenas EW 571, 572 pode ser habilitada para usar o sistema de monocabo como descrito previamente com relação a Fig. 4 e Fig. 11. Alternativamente, tubo de fios pode ser empregado para transmitir energia e sinais de comunicação. Em um exemplo, a energia pode ser fornecida para os sensores por baterias de interior de furo, e técnicas telemétricas de saltos curtos podem ser utilizados para transmitir sinais de comunicação, por exemplo, em torno do motor de interior de furo. Em ainda outro exemplo, o motor de interior de furo pode

compreender alimentação elétrica for fio.

[00030] Em outro exemplo, cada antena EW 571, 572 pode ser eletronicamente mudada para atuar como uma receptora de sinais EW transmitidas pela antena EW inclinada 585, e como uma transmissora para transmitir sinais EW para os receptores de bobina 520 e 522.

[00031] Devido à natureza das formações sedimentares, os técnicos em análise de formação empregam tecnicamente o termo “horizontal” para designar o plano de formação (ou seja, o plano x-y da Fig. 10), e o termo “vertical” para designar a direção perpendicular ao plano de formação (ou seja, a direção z da Fig. 10 que é a direção da formação sedimentaria). Para conveniência em distinguir esses termos da técnica das direções normalmente associadas com a gravidade da terra, as Fig. 6A e 6B utilizam as seguintes termos: “vertical verdadeira” indica a direção da gravidade da terra; “horizontal verdadeira” indica a direção perpendicular à gravidade da terra; “vertical da formação” indica a direção perpendicular ao plano da formação; e “horizontal da formação” indica o plano da formação. Nesta descrição, o termo “horizontal” e “vertical” tem a intenção de associar os significados com “horizontal da formação” e “vertical da formação”, respectivamente. Nas Fig. 6A e 6B, δ é o ângulo de desvio de furo (ângulo entre o buraco do furo/eixo da ferramenta e o vertical verdadeiro), e ψ é o ângulo de mergulho de camada (o ângulo entre o plano da camada da formação e o horizontal verdadeiro).

[00032] Referindo-se à Fig. 6A, a bobina transmissora (antena) com um momento magnético M_T pode ser considerado como superposição de um dipolo magnético horizontal (HMD) com um dipolo magnético vertical (VMD), com componente horizontal e vertical correspondentes M_{Th} e M_{Tv} , respectivamente, que são fornecidos pelas equações

$$M_{Th} = M_T \sin \theta = T_t A_t \sin \theta \quad [1]$$

$$M_{Tv} = M_T \cos \theta = T_t A_t \cos \theta \quad [2]$$

onde

I_t = corrente na bobina transmissora

A_t = área da seção transversal da bobina transmissora, e

θ = o ângulo de mergulho relativo (o ângulo entre o eixo da ferramenta e o normal da formação)

[00033] Pode-se ver que o HMD produz os campos magnéticos H_{hx} e H_{hz} , e o VMD produz os campos magnéticos H_{vx} e H_{vz} como segue:

$$H_{hx} = \frac{M_T \text{sen} \theta}{4\pi} \left[\frac{e^{ik_h L}}{L^3} \left[3 \text{sen}^2 \theta - 1 + k_h^2 L^2 \cos^2 \theta + \frac{ik_h}{\text{sen}^2 \theta} L + ik_h L - ik_h L \text{sen}^2 \theta \right] - \frac{ik_h}{L^2 \text{sen}^2 \theta} e^{ik_h L \beta} \right] \quad [3]$$

$$H_{hz} = M_T \text{sen} \theta \cos \theta \frac{e^{ik_h L}}{4\pi L^3} [3 - k_h^2 L^2 - 3ik_h L] \quad [4]$$

$$H_{vz} = M_T \cos \theta \frac{e^{ik_h L}}{4\pi L^3} [3 \cos^2 \theta - 1 + k_h^2 L^2 \text{sen}^2 \theta - 3ik_h L \cos^2 \theta + ik_h L] \quad [6]$$

onde:

$$k_h = \sqrt{\omega^2 \mu \left(\epsilon_h - \frac{i\sigma_h}{\omega} \right)}$$

$$k_v = \sqrt{\omega^2 \mu \left(\epsilon_v - \frac{i\sigma_v}{\omega} \right)}$$

$$\beta = \sqrt{\cos^2 \theta + \left(\frac{k_v}{k_h} \right)^2 \text{sen}^2 \theta}$$

k_h = número complexo de onda na direção horizontal

k_v = número complexo de onda na direção vertical

ω = frequência angular (em radianos/segundo) da bobina transmissora = $2\pi f$

f = frequência da bobina transmissora (em Hertz)

μ = permeabilidade magnética da formação (assumindo que $\mu = \mu_{ar} = 1$)

σ_h = condutividade horizontal da formação

σ_v = condutividade vertical da formação

ϵ_h = constante dielétrica horizontal (assumida)

ε_v = constante dielétrica vertical (assumida)

L = distancia entre a bobina transmissora e a bobina receptora

$$i = \sqrt{-1}$$

[00034] Se um receptor for paralelo ao transmissor, para a configuração convencional como mostrada na Fig. 6 na qual $\xi_T = \xi_R = 90^\circ$, o campo H_z no loop receptor é dado pela equação

$$H_z = (H_{hx} + H_{vx}) \sen\theta + (H_{hz} + H_{vz}) \cos\theta \quad [7]$$

[00035] e a voltagem induzida no loop receptor é

$$V = \mathfrak{W} A_r \mu H_z \quad [8]$$

onde A_r é a área de seção transversal da bobina receptora.

Substituindo-se as Eq. [3], [4], [5], [6] e [7] na Eq. [8] temos

$$V = \frac{i \mathfrak{W} \mu A_r A_t I_t}{4\pi L^3} \left\{ (2 - ikL) e^{ik_h L} - ik_h e^{ik_h L \beta} \right\} \quad [9]$$

[00036] A equação [9] mostra que a voltagem induzida V , depende de k_h e β . Por sua vez k_h depende de σ_h ; e β depende de σ_h , σ_v e θ . Estas relações indicam que σ_v , e θ são dependentes, e esta dependência evita convergência de solução simultânea para σ_h , σ_v , e θ , como discutido acima.

[00037] Para quebrar essa dependência e permitir uma solução para σ_h , σ_v , e θ é necessário inclinar tanto o transmissor ou o receptor com relação ao eixo da ferramenta, como mostrado na Fig. 6B (transmissor não inclinado, receptor inclinado). Para a configuração transmissor/receptor como mostrado na Fig. 6B onde $\xi_T = 90^\circ$ e $\xi_R < 90^\circ$, o campo H_z no loop do receptor é dado pela equação

$$H_z = (H_{hx} + H_{vx}) \sen\theta' + (H_{hz} + H_{vz}) \cos\theta' \quad [10]$$

[00038] Substituindo as Eqs. [3],[4],[5],[6], e [10] na Eq. [8] temos

$$V = \frac{i \mathfrak{W} \mu A_r A_t I_t}{4\pi L^3} \left\{ 2 \cos(\theta - \theta') e^{ik_h L} (1 - ik_h L) + \frac{ik_h L \sen\theta'}{\sen\theta} (e^{ik_h L} - e^{ik_h L \beta}) \right\} \quad [11]$$

onde

$$\theta' = \theta + \xi_R - 90^\circ$$

ξ_R = o ângulo de inclinação da antena receptora (ou seja, o

ângulo entre o plano da antena receptora e o eixo da ferramenta)

$\xi_T k_v$ = o ângulo de inclinação da antena transmissora (ou seja, o ângulo entre o plano da antena receptora e o eixo da ferramenta).

[00039] A equação [11] mostra que a voltagem induzida V depende de k_h , β , θ e θ' . À medida que θ seja diferente de θ' , então θ pode ser calculado com três medidas usando um espaçamento múltiplo ou ferramenta de resistividade de EW de múltiplas frequências. Inclinando-se tanto a receptora ou a transmissora de um sensor de resistividade de EW (ou seja, fazendo θ diferente de θ'), σ_v e θ são dissociados, o que permite uma solução para σ_h , σ_v , e θ como descrito abaixo. Embora a formulação acima seja para uma transmissora não inclinada com uma receptora inclinada, a teoria de reciprocidade estabelece que o mesmo resultado se aplica à transmissora inclinada com uma receptora não inclinada. De fato, ambas a transmissora e a receptora podem ser inclinadas, desde que os respectivos ângulos de inclinação não sejam os mesmos, ou seja, ξ_T diferente de ξ_R . Para o caso em geral nas quais ambas a transmissora e a receptora são inclinadas nos ângulos arbitrários ξ_T e ξ_R respectivamente, as Eqs. [1] até [11] se aplicam com a substituição de θ'' pelo θ onde $\theta'' = \theta + \xi_T - 90^\circ$.

[00040] A Fig. 7 mostra outro modo de realização de um conjunto de broca instrumentado 610 onde os receptores 620 e 622 estão localizados nas lâminas 609a e 609b. A antena 615 pode ser inclinada ou não. Esta configuração pode permitir uma medida de resistividade mais precisa se comparada com a configuração da Fig. 2, pela redução de espessura do fluido de perfuração entre os receptores 620, 622 e a formação.

MODELO DE BROCA

[00041] A Fig. 8 mostra uma vista em perspectiva de uma porção da extremidade 825 do conjunto de broca instrumentado 810. A porção da extremidade inclui as lâminas de face 827a e 827b sobre as quais são montadas os elementos cortantes PDC 830. As áreas adjacentes às lâminas de

face são referidas como canais de fluido de face 826 que são bem conhecidas pela técnica. Neste modo de realização o receptor 820 está localizado na calha entre a lâmina calibradora 809a próxima e a 809b.

[00042] Em outro modo de realização, veja Fig. 9, o conjunto de broca instrumentado 910 tem a antena 915 posicionada na porção da haste da broca de perfuração. Os receptores 922 e 920 estão localizados na lâmina calibradora 909.

ASPECTOS DE FABRICAÇÃO

Antena de ondas eletromagnéticas

[00043] No modo de realização mostrado na Fig. 2, o conjunto de broca instrumentado 10 compreende um sub de broca 16 que é tipicamente fabricado em liga de aço com um diâmetro nominal consistente com o sistema MWD 758 ao qual está conectado. A ranhura circunferencial ou recesso 17 no qual a antena 15 é montada pode ser formada pelas operações convencionais em torno mecânico.

[00044] A Fig. 5 mostra antena transmissora de eixo inclinado 515 que é acoplada ao sub de broca 516 também fabricado em liga de aço. Neste modo de realização, a ranhura onde a antena é montada deveria ser formada por um processo diferente de fabricação exigindo o uso de uma fresa devido à orientação do eixo da transmissora.

[00045] Outro método para acoplar a antena transmissora (15, 515) seria o de amarrá-la à superfície externa do sub de broca (16, 516). Ela poderia então ser coberta com um material não condutivo como conhecido pela técnica.

RECEPTORES

[00046] Referindo-se novamente a Fig. 3A, a cavidade 321 pode ser formada por vários métodos. Quando a broca 5 é fabricada de aço, os processo de fresa e perfuração podem ser empregados para formar a cavidade. Este método poderia ser utilizado para executar tanto a cavidade na lâmina

calibradora 9, e na lâmina de face 827, como para as calhas e canais de fluido entre quaisquer das lâminas.

[00047] Se a broca 5 for formada pelo material matriz que é comum na fabricação de brocas PDC, a cavidade 321 deve ser formada de maneira diferente. O material matriz é formado de carbeto de tungstênio ou por outro material duro infiltrado de uma liga a base de cobre que não é “usinável”. Uma forma de fundição pode ser usada para formar entalhes de detritos de forma próxima à inicial, deslocamentos de bocais e bolsas de corte quando da preparação do molde usado para fabricar a broca de perfuração. Este material pode ser grafite, areia, cerâmica ou outros materiais os quais após o processo de forno podem ser facilmente removidos da fundição. Esta técnica pode ser usada para formar a cavidade do receptor. Um método alternativo para formar as cavidades em matriz é o êmbolo EDM. A fundição deve ser efetuada através de técnicas normalmente bem conhecidas pelos experientes na técnica, pelas quais o molde é construído de um material apropriado (por exemplo, areia, grafite, cerâmica, etc.) para uso na moldagem do componente. O molde ou subconjunto, ou a parte final pode também ser formada por quaisquer das muitas técnicas incluindo construção pela estéreo litografia. Como outro exemplo, a “impressão de areia” pode ser usada, onde o molde da forma resultante é criado e depois usado como sendo a forma positiva para criar o molde reverso formado de areia em uma resina apropriada, que finalmente é endurecida na conformidade desejada. Esse molde reverso pode então ser usado para fundir o material matriz. Outra alternativa de fabricação seria fundir a forma primária da luva estabilizadora 208 da forma convencional para, então, empregar técnicas de usinagem não tradicionais para formar as aberturas descritas e, potencialmente, outras conformações. Um exemplo de técnica de usinagem não tradicional é a usinagem por descarga elétrica (“EDM”) onde uma série de descargas elétricas entre o eletrodo da ferramenta e a matriz de fundição (agindo como outro eletrodo), tipicamente em um

ambiente de um líquido dielétrico interveniente (conhecido como “mergulhador” ou “êmbolo” EDM) ocasiona a remoção incremental de material entre os eletrodos.

[00048] Na Fig. 4, a transmissora 415 e as receptoras 420 e 422 são conectadas ao inserto eletrônico 405 através dos caminhos 423 e 445. Quando o material do corpo do sub de broca 416, ou broca de perfuração 5, 809, 710 é de aço, técnicas de perfuração profundas podem ser usadas. Quando o corpo da broca incluindo a seção estabilizadora é feita de matriz, novamente seriam empregadas formas para formar as passagens para os conectores.

[00049] Inúmeras variações e modificações se tornam aparentes por aqueles experientes na técnica. Pretende-se que as reivindicações seguintes sejam interpretadas de modo a abranger todas essas variações e modificações.

REIVINDICAÇÕES

1. Sistema para medir uma resistividade de uma formação compreendendo:

uma broca de perfuração instrumentada (10, 510, 550, 570, 610, 810, 910, 1200) acoplada a uma extremidade de fundo de um sistema de fundo de furo;

pelo menos uma antena de ondas eletromagnéticas (15, 515, 517, 565, 571, 572, 585, 615, 915) localizada no sistema de fundo de furo para transmitir um sinal de onda eletromagnética para a formação;

caracterizado pelo fato de compreender:

pelo menos um receptor de bobina (20, 22, 520, 522, 620, 622, 820, 822, 920, 922, 1220) compreendendo uma bobina (302) enrolada em torno de um centro magnético (301), o pelo menos um receptor de bobina (20, 22, 520, 522, 620, 622, 820, 822, 920, 922, 1220) localizado em uma superfície externa da broca de perfuração instrumentada (10, 510, 550, 570, 610, 810, 910, 1200) e longitudinalmente espaçado da pelo menos uma primeira antena de ondas eletromagnéticas (15, 515, 517, 565, 571, 572, 585, 615, 915) para receber o sinal de onda eletromagnética transmitido através da formação; e

circuitos eletrônicos (54, 56, 62, 430, 1230) operativamente acoplados ao pelo menos um receptor de bobina (20, 22, 520, 522, 620, 622, 820, 822, 920, 922, 1220) para processar o sinal recebido para determinar uma resistividade da formação próximo à broca de perfuração instrumentada (10, 510, 550, 570, 610, 810, 910, 1200).

2. Sistema de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pelo fato de um plano da pelo menos uma primeira antena de ondas eletromagnéticas (515, 565, 585) ser inclinado a um primeiro ângulo predeterminado (ξ_T) em relação a um eixo longitudinal da broca de perfuração instrumentada (510, 550, 570).

3. Sistema de acordo com reivindicação 2, caracterizado pelo fato do primeiro ângulo predeterminado (ξ_T) ficar na faixa de 0° a 90° .

4. Sistema de acordo com reivindicação 1, caracterizado pelo fato de compreender uma segunda antena eletromagnética (572) inclinada e uma terceira antena de ondas eletromagnéticas inclinada (571) co-localizadas em uma mesma localização longitudinal entre a primeira antena eletromagnética (585) e a broca de perfuração instrumentada (550) onde um plano da segunda antena de ondas eletromagnéticas (572) é inclinado por um segundo ângulo predeterminado (ξ_R) em relação ao eixo longitudinal da broca de perfuração instrumentada (550) e um plano da terceira antena de ondas eletromagnéticas (571) ser inclinado por um terceiro ângulo predeterminado (α) em relação ao plano da segunda antena de ondas eletromagnéticas (572).

5. Sistema de acordo com a reivindicação 4, caracterizado pelo fato do segundo ângulo predeterminado (ξ_R) ficar na faixa de 0° a 45° e o terceiro ângulo predeterminado (α) ficar na faixa de 0° a 90° .

6. Sistema de acordo com a reivindicação 4, caracterizado pelo fato que pelo menos uma da segunda antena de ondas eletromagnéticas (572) e terceira antena de ondas eletromagnéticas (571) compreende um transceptor para transmitir e receber uma onda eletromagnética.

7. Sistema de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pelo fato do pelo menos um receptor de bobina compreender dois receptores de bobina (20, 22, 520, 522) espaçados sobre a broca de perfuração instrumentada (10, 510).

8. Sistema de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pelo fato do pelo menos um receptor de bobina compreender uma pluralidade de receptores de bobina (1220) montados em localizações angulares ao redor da broca de perfuração instrumentada (1200) para detectar uma resistividade radial da formação na broca de perfuração instrumentada (1200).

9. Sistema de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pelo

fato de pelo menos um do pelo menos um receptor de bobina (20, 1220) ser localizado em uma passagem de diâmetro reduzido entre duas lâminas calibradoras (9, 1209) próximas na broca de perfuração instrumentada (1200).

10. Sistema de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pelo fato do pelo menos um receptor de bobina (620, 1220) ser localizado em uma lâmina calibradora próxima (609a, 1209) na broca de perfuração instrumentada (610, 1200).

11. Sistema de acordo com a reivindicação 1, caracterizado pelo fato dos circuitos eletrônicos (1230) serem localizados em pelo menos uma seção de haste (1218) da broca de perfuração instrumentada (1200) e um sub de broca (1216) acoplado entre a broca de perfuração instrumentada (1200) e o sistema de fundo de furo.

12. Método para determinar uma resistividade próxima a uma broca de uma formação circundando um furo de sondagem caracterizado pelo fato de compreender:

empregar um sistema de fundo de furo tendo uma broca de perfuração instrumentada (10, 510, 550, 570, 610, 810, 910, 1200) acoplada a uma extremidade de fundo deste em um furo de sondagem circundado pela formação;

dispor pelo menos uma antena de ondas eletromagnéticas (15, 515, 517, 565, 571, 572, 585, 615, 915) no sistema de fundo de furo, a pelo menos uma antena de ondas eletromagnéticas (15, 515, 517, 565, 571, 572, 585, 615, 915) sendo espaçada longitudinalmente da broca de perfuração instrumentada (10, 510, 550, 570, 610, 810, 910, 1200);

transmitir pelo menos um sinal de onda eletromagnética para a formação usando a pelo menos uma primeira antena de ondas eletromagnéticas (10, 510, 550, 570, 610, 810, 910, 1200);

detectar o sinal de onda eletromagnética em pelo menos um receptor de bobina (20, 22, 520, 522, 620, 622, 820, 822, 920, 922, 1220)

compreendendo uma bobina (302) enrolada em torno de um centro magnético (301) localizado em uma superfície externa da broca de perfuração instrumentada (10, 510, 550, 570, 610, 810, 910, 1200); e

processar os sinais recebidos do pelo menos um receptor de bobina (20, 22, 520, 522, 620, 622, 820, 822, 920, 922, 1220) para determinar uma resistividade da formação próximo à broca de perfuração instrumentada.

13. Método de acordo com a reivindicação 12, caracterizado adicionalmente pelo fato de compreender inclinar um plano da pelo menos uma primeira antena de ondas eletromagnéticas (515, 565, 585) a um primeiro ângulo predeterminado (ξ_T) em relação a um eixo longitudinal da broca de perfuração instrumentada (510, 550, 570).

14. Método de acordo com a reivindicação 12, caracterizado pelo fato de compreender uma segunda antena de ondas eletromagnéticas inclinada (572) e uma terceira antena de ondas eletromagnéticas inclinada (571) co-localizadas em uma mesma localização longitudinal entre a primeira antena eletromagnética (585) e a broca de perfuração instrumentada (550) onde a segunda antena de ondas eletromagnéticas inclinada (572) é inclinada por um segundo ângulo predeterminado (ξ_R) em relação ao eixo longitudinal da broca de perfuração instrumentada (550) e a terceira antena de ondas eletromagnéticas inclinada (571) ser inclinada por um terceiro ângulo predeterminado (α) em relação à segunda antena de ondas eletromagnéticas inclinada (572).

15. Método de acordo com a reivindicação 14, caracterizado adicionalmente pelo fato de compreender transmitir o pelo menos um sinal de onda eletromagnética para a formação usando pelo menos uma da segunda antena de ondas eletromagnéticas inclinada (572) e da terceira antena de ondas eletromagnéticas inclinada (571), e receber o pelo menos um sinal de onda eletromagnética em pelo menos um receptor de bobina (520, 522) disposto sobre a broca de perfuração instrumentada (550).

16. Método de acordo com a reivindicação 16, caracterizado adicionalmente pelo fato de compreender comutar pelo menos uma da segunda antena de ondas eletromagnéticas inclinada (572) e da terceira antena de ondas eletromagnéticas inclinada (571) entre um modo de recepção e um modo de transmissão.

17. Método de acordo com a reivindicação 12, caracterizado pelo fato do processamento dos sinais recebidos do pelo menos um receptor de bobina (20, 22, 520, 522, 620, 622, 820, 822, 920, 922, 1220) para determinar uma resistividade da formação próxima à broca de perfuração instrumentada (10, 510, 550, 570, 610, 810, 910, 1200) compreender determinar a diferença de fase do sinal transmitido e do sinal recebido e a relação de amplitude do sinal transmitido e do sinal recebido e relacionar a diferença de fase e a relação de amplitude a uma resistividade de formação.

18. Método de acordo com a reivindicação 12, caracterizado adicionalmente pelo fato de compreender receber o pelo menos um sinal de onda eletromagnética em cada um dos pelo menos dois receptores de bobina espaçados rotacionalmente (1220), relacionando cada um dos sinais recebidos a um azimute da broca de perfuração instrumentada (1200), e gerando uma imagem azimutal da formação próxima à broca de perfuração instrumentada (10, 510, 550, 570, 610, 810, 910, 1200) com base nos sinais recebidos.

19. Broca de perfuração instrumentada (10, 510, 550, 570, 610, 810, 910, 1200) compreendendo:

uma haste de broca (5, 1218) com pelo menos uma lâmina calibradora (9, 809a, 809b, 909, 1209) acoplada à mesma;

pelo menos uma antena de ondas eletromagnéticas (15, 515, 517, 565, 571, 572, 585, 615, 915) disposta sobre a broca de perfuração instrumentada (10, 510, 550, 570, 610, 810, 910, 1200) para transmitir um sinal de onda eletromagnética para uma formação circundando a broca de perfuração instrumentada (10, 510, 550, 570, 610, 810, 910, 1200);

caracterizada pelo fato de compreender:

pelo menos um receptor de bobina (20, 22, 520, 522, 620, 622, 820, 822, 920, 922, 1220) compreendendo uma bobina (302) enrolada em torno de um centro magnético (301), o pelo menos um receptor de bobina (20, 22, 520, 522, 620, 622, 820, 822, 920, 922, 1220) localizado em uma superfície externa da broca de perfuração instrumentada (10, 510, 550, 570, 610, 810, 910, 1200) e longitudinalmente espaçado da pelo menos uma primeira antena de ondas eletromagnéticas (15, 515, 517, 565, 571, 572, 585, 615, 915) para receber o sinal de onda eletromagnética transmitido; e

circuitos eletrônicos (54, 56, 62, 430, 1230) operacionalmente acoplados à pelo menos uma antena de ondas eletromagnéticas (15, 515, 517, 565, 571, 572, 585, 615, 915) e ao pelo menos um receptor de bobina (20, 22, 520, 522, 620, 622, 820, 822, 920, 922, 1220) para processar o sinal recebido para determinar uma resistividade da formação próximo à broca de perfuração instrumentada (10, 510, 550, 570, 610, 810, 910, 1200).

20. Broca de perfuração instrumentada (10, 510, 550, 570, 610, 810, 910, 1200) de acordo com a reivindicação 19, caracterizado adicionalmente pelo fato de compreender um sub de broca (16, 416, 516, 560, 1216) acoplado à haste de broca (5, 1218).

21. Broca de perfuração instrumentada (10, 510, 550, 570, 610, 810, 910, 1200) de acordo com a reivindicação 20, caracterizado pelo fato dos circuitos eletrônicos (54, 56, 62, 430, 1230) serem localizados em pelo menos um de sub de broca (16, 416, 516, 560, 1216) e haste de broca (16, 416, 516, 560, 1216).

22. Broca de perfuração instrumentada (10, 510, 550, 570, 610, 810, 910, 1200) de acordo com reivindicação 19, caracterizado pelo fato do pelo menos um receptor de bobina (20, 22, 520, 522, 620, 622, 820, 822, 920, 922, 1220) ser localizado sobre pelo menos um de: pelo menos uma lâmina calibradora (9, 809a, 809b, 909, 1209), e uma parte de diâmetro

reduzido da haste de broca (5, 1218).

23. Broca de perfuração instrumentada (10, 510, 550, 570, 610, 810, 910, 1200) de acordo com reivindicação 19, caracterizado pelo fato de pelo menos um receptor de bobina compreender uma pluralidade de receptores de bobina (1220) disposta em localizações angulares ao redor da broca de perfuração instrumentada (1200).

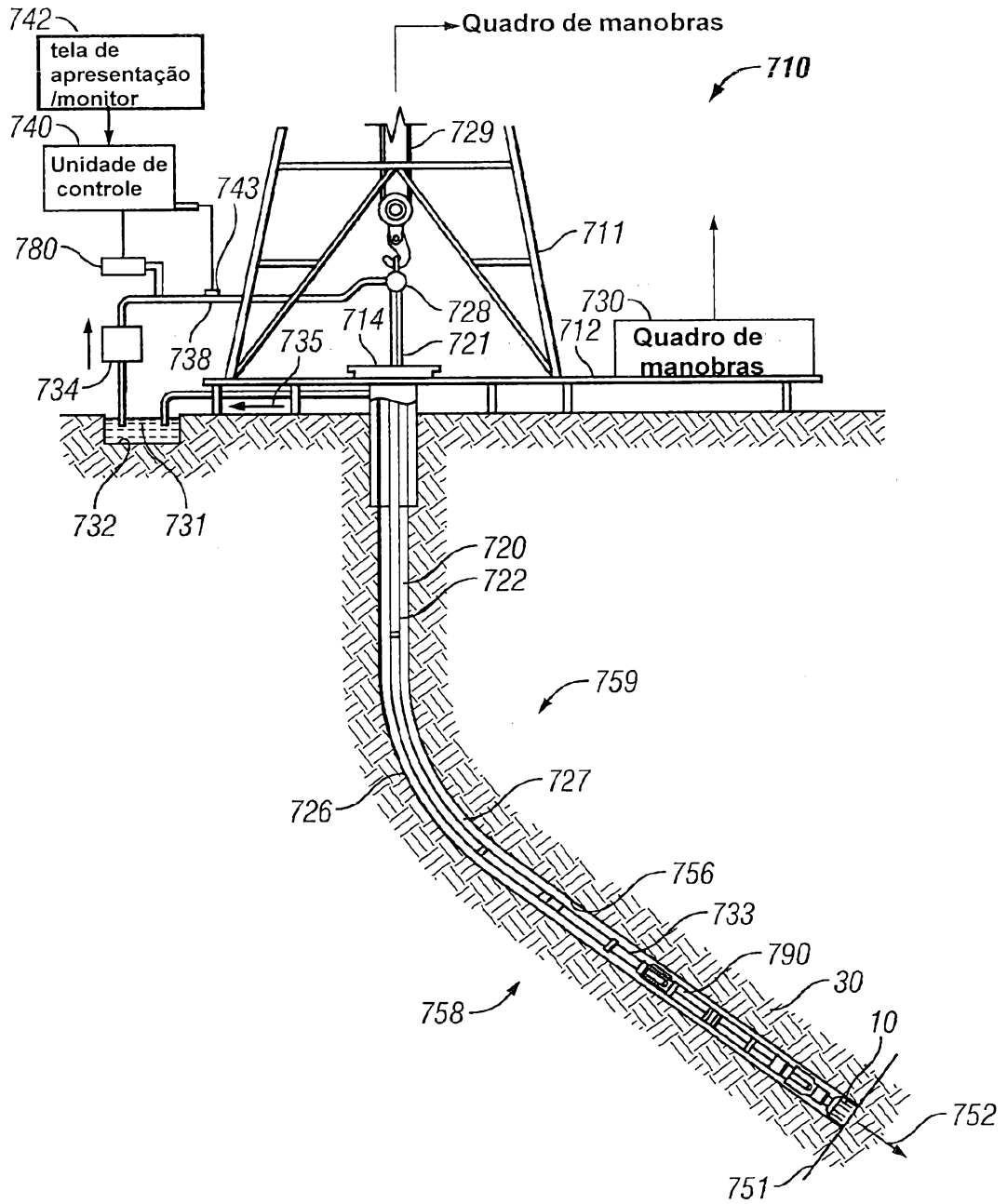


FIG. 1

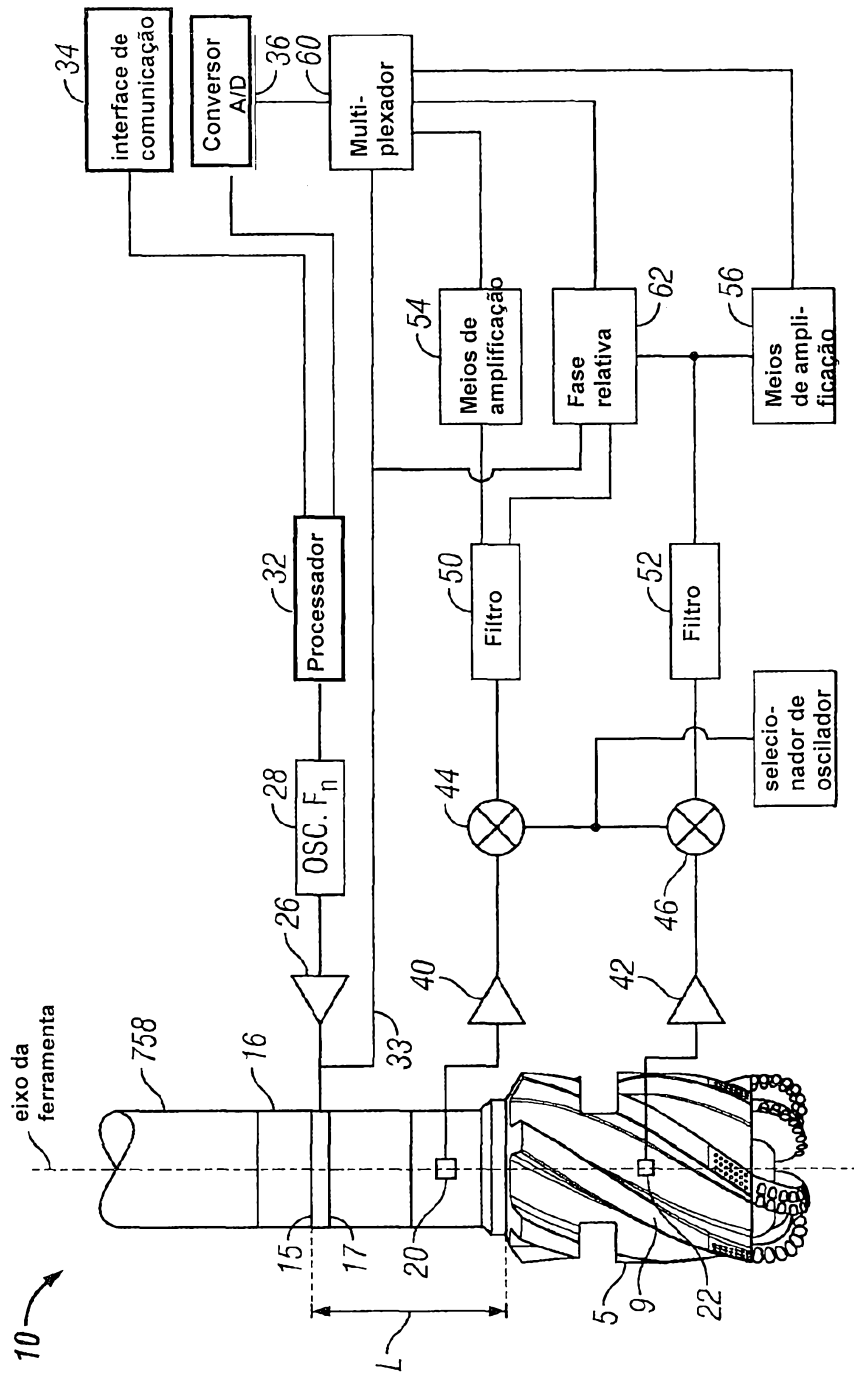


FIG. 2

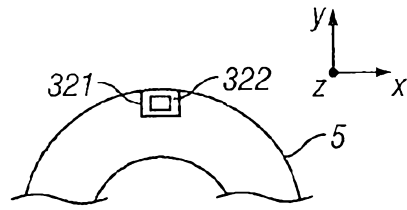


FIG. 3A

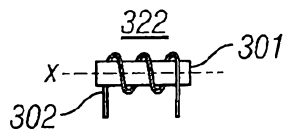


FIG. 3B



FIG. 3C

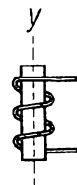


FIG. 3D

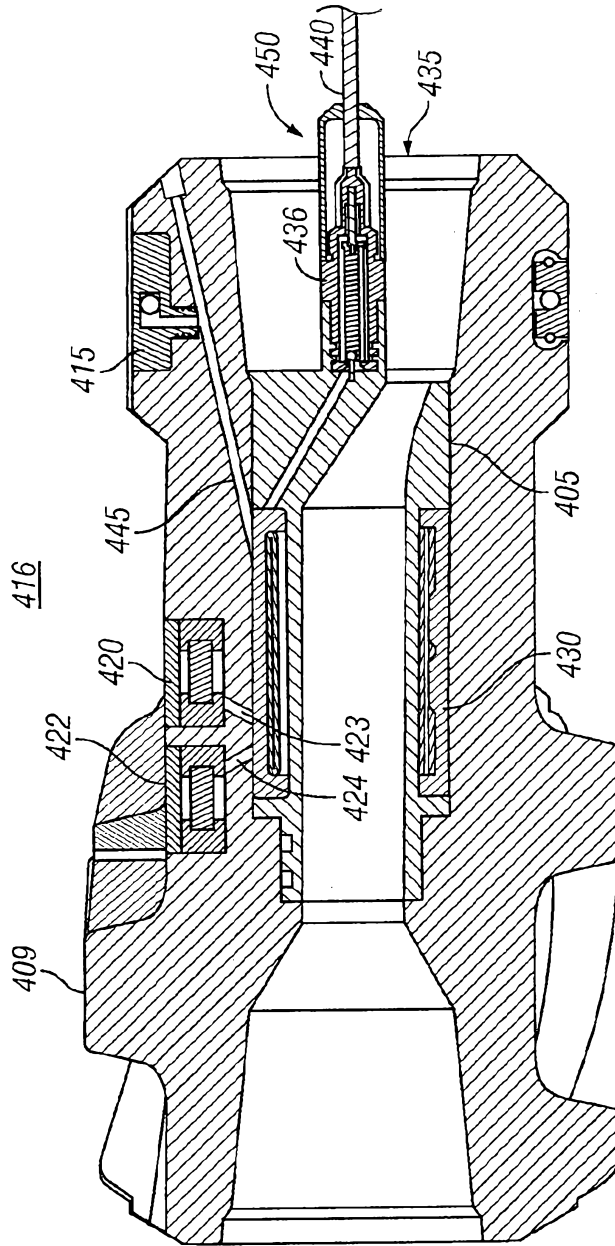


FIG. 4

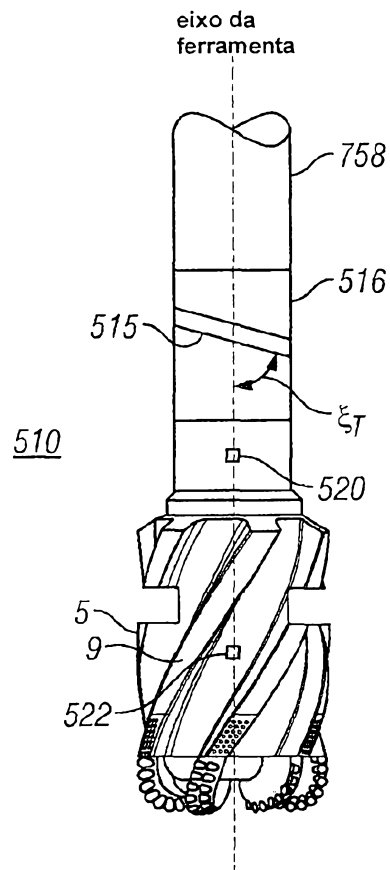


FIG. 5

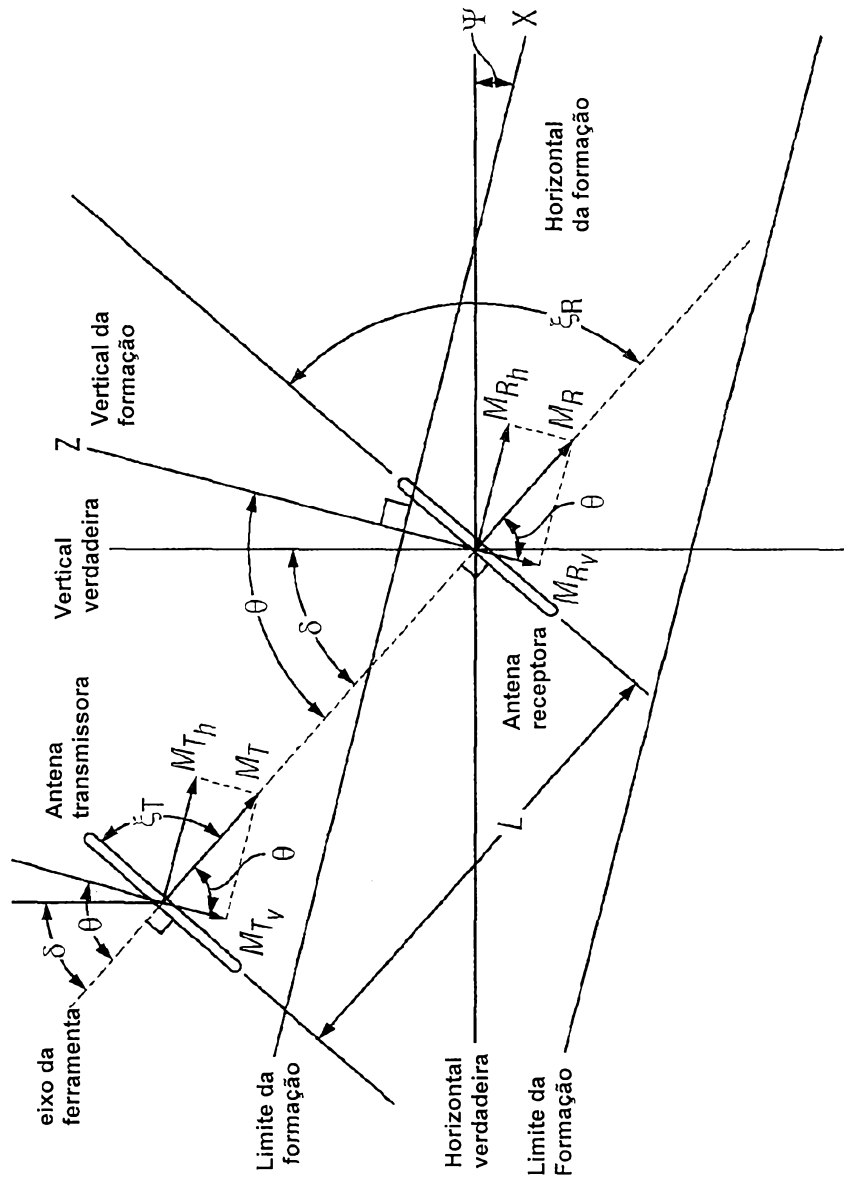


FIG. 6A

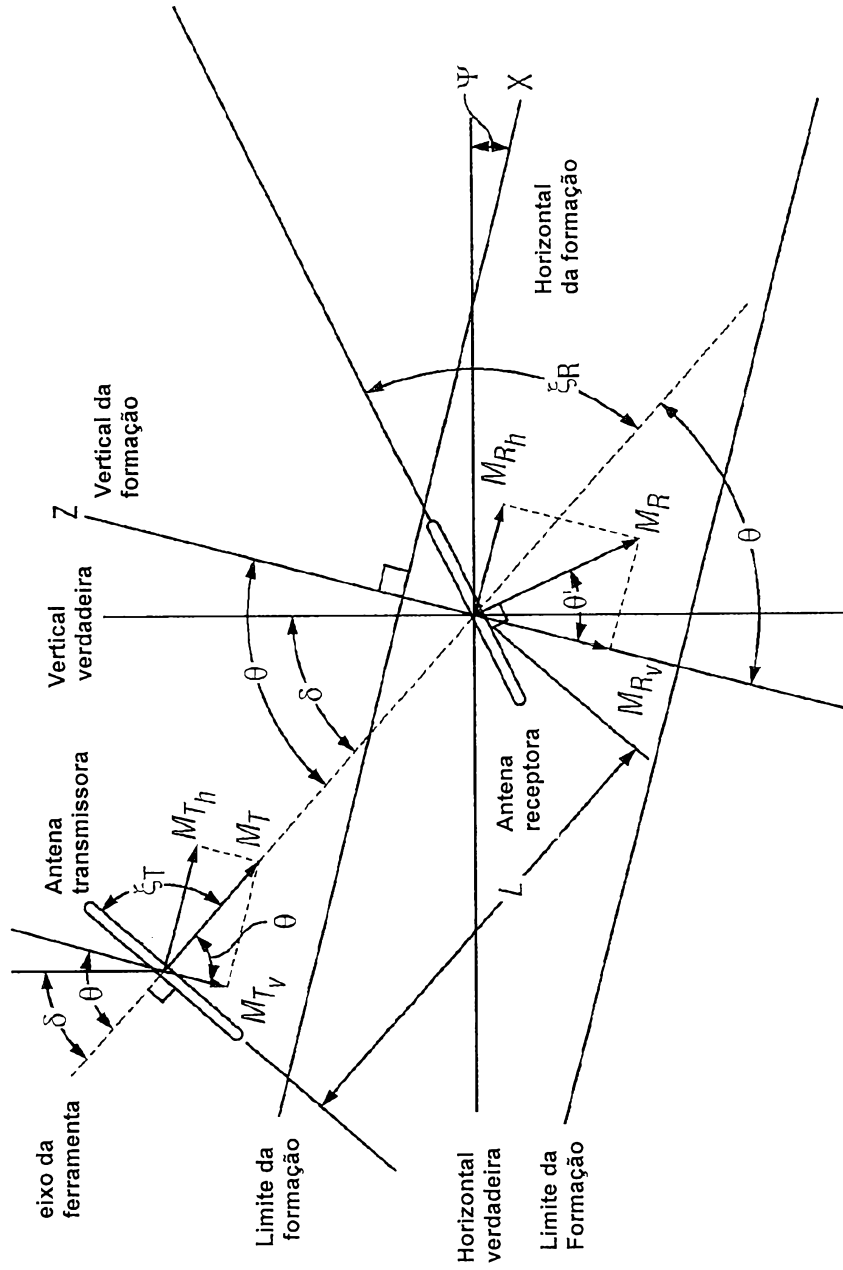


FIG. 6B

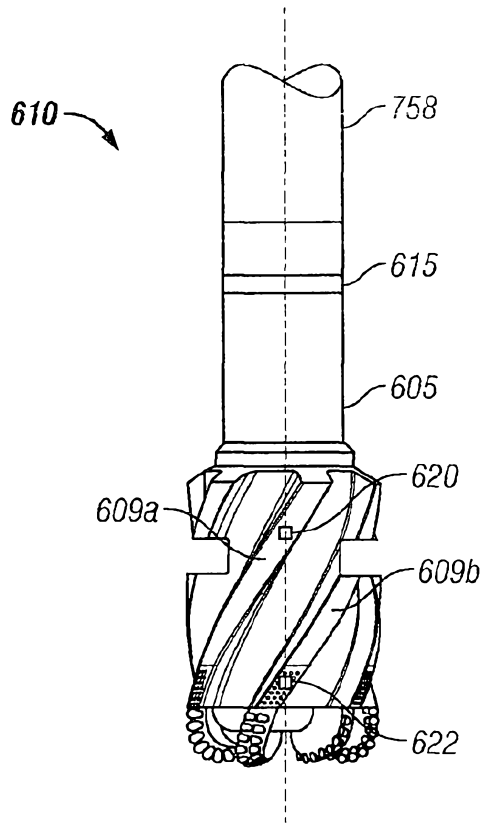


FIG. 7

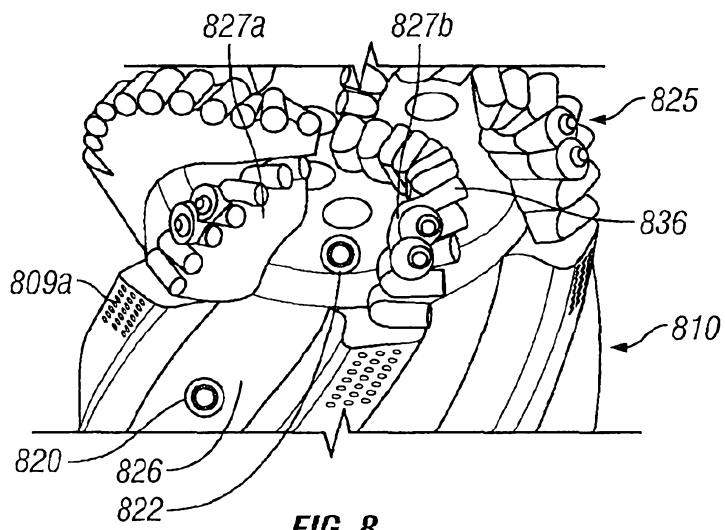


FIG. 8

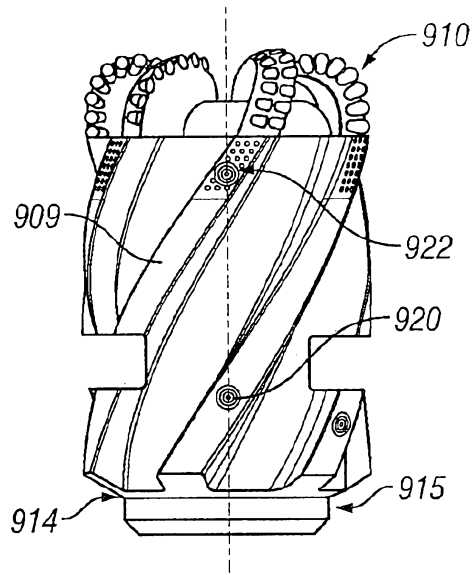


FIG. 9

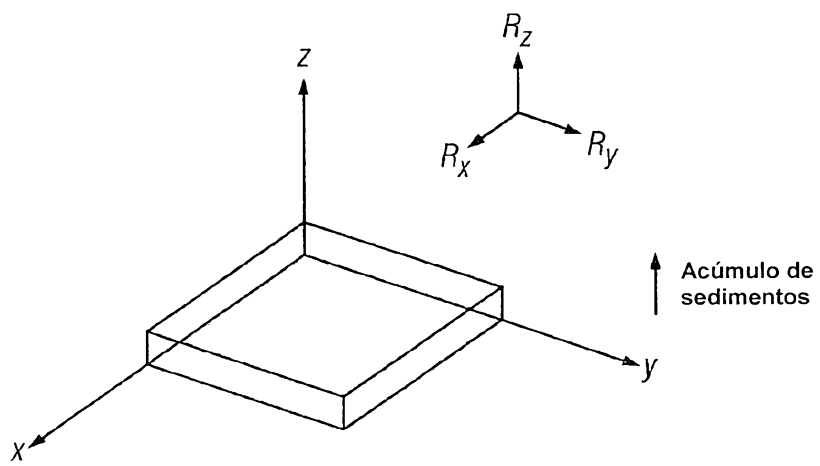


FIG. 10

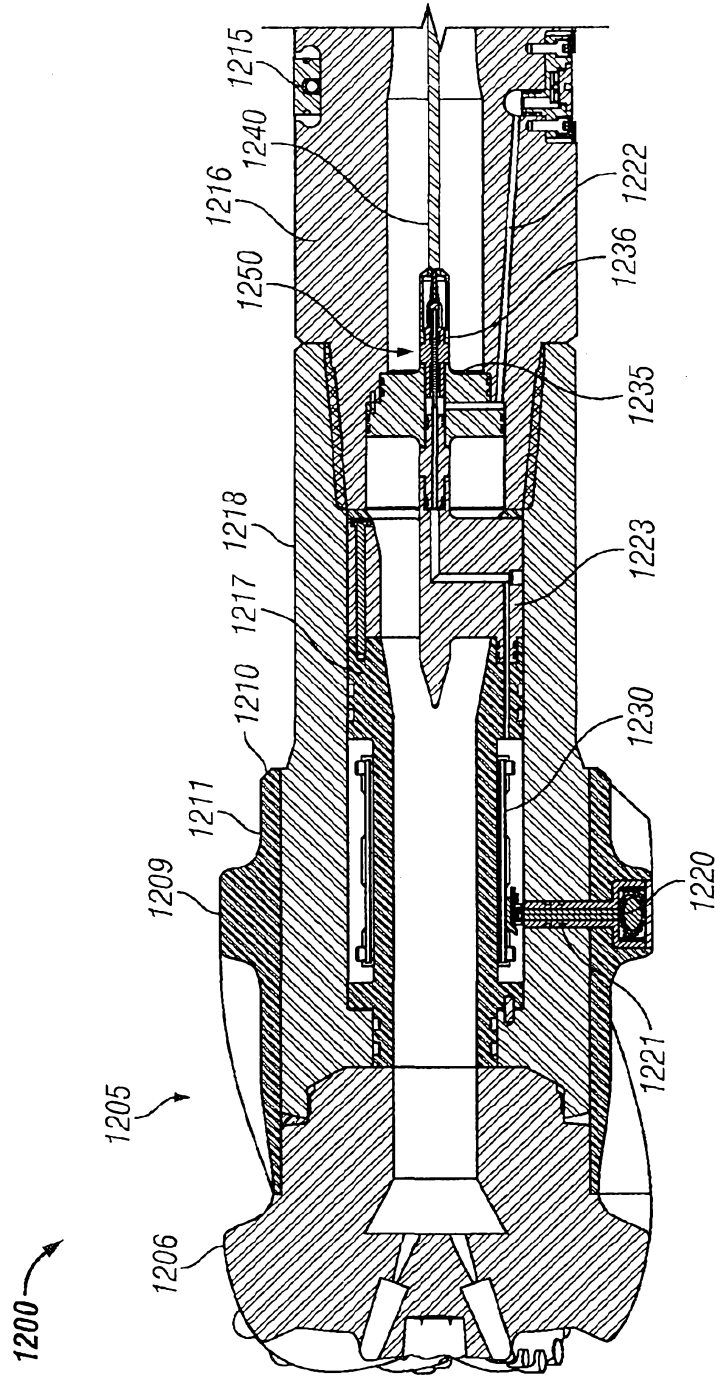


FIG. 11

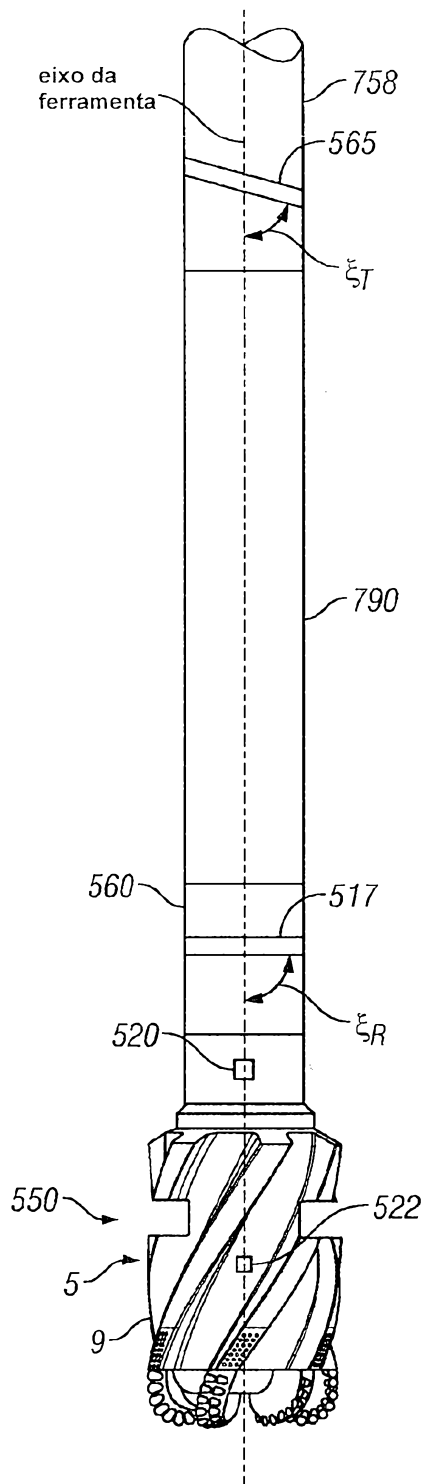


FIG. 12

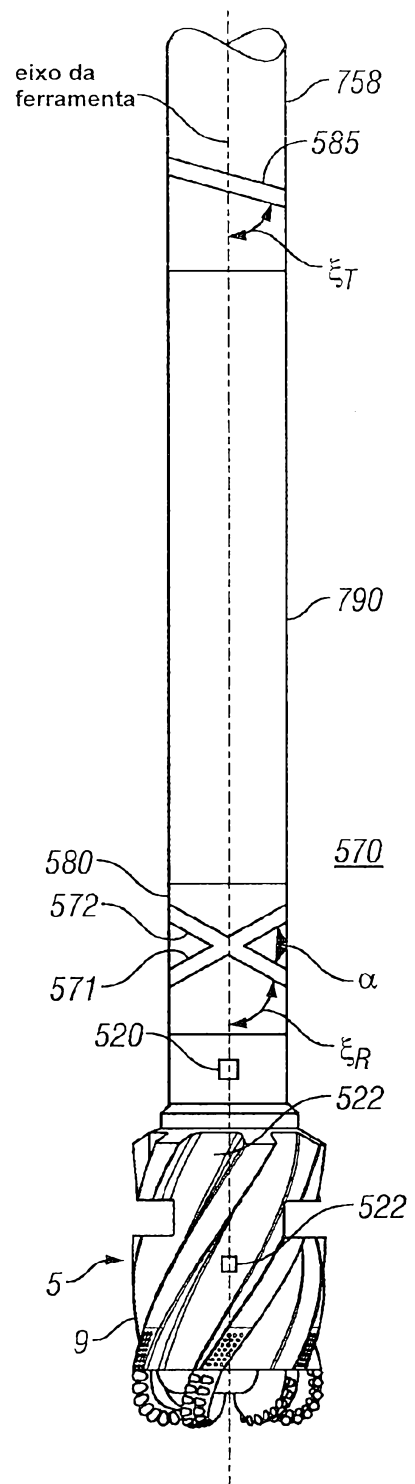


FIG. 13