



Assinado
Digitalmente

REPÚBLICA FEDERATIVA DO BRASIL
MINISTÉRIO DA ECONOMIA
INSTITUTO NACIONAL DA PROPRIEDADE INDUSTRIAL

CARTA PATENTE Nº PI 0810104-3

O INSTITUTO NACIONAL DA PROPRIEDADE INDUSTRIAL concede a presente PATENTE DE INVENÇÃO, que outorga ao seu titular a propriedade da invenção caracterizada neste título, em todo o território nacional, garantindo os direitos dela decorrentes, previstos na legislação em vigor.

(21) Número do Depósito: PI 0810104-3

(22) Data do Depósito: 26/03/2008

(43) Data da Publicação do Pedido: 16/10/2008

(51) Classificação Internacional: G01V 3/30.

(30) Prioridade Unionista: US 11/696,583 de 04/04/2007.

(54) Título: APARELHO CONFIGURADO PARA AVALIAR UMA FORMAÇÃO TERRESTRE E MÉTODO DE OPERAÇÃO DO APARELHO PARA AVALIAR UMA FORMAÇÃO TERRESTRE

(73) Titular: BAKER HUGHES INCORPORATED, Sociedade Norte-Americana. Endereço: 2929 Allen Parkway, Suite 2100, Houston, TX 77019, ESTADOS UNIDOS DA AMÉRICA(US)

(72) Inventor: STANISLAV W. FORGANG; RANDY GOLD; LUIS M. PELEGRI.

Prazo de Validade: 10 (dez) anos contados a partir de 08/01/2019, observadas as condições legais

Expedida em: 08/01/2019

Assinado digitalmente por:
Liane Elizabeth Caldeira Lage
Diretora de Patentes, Programas de Computador e Topografias de Circuitos Integrados

Relatório Descritivo da Patente de Invenção para "**APARELHO CONFIGURADO PARA AVALIAR UMA FORMAÇÃO TERRESTRE E MÉTODO DE OPERAÇÃO DO APARELHO PARA AVALIAR UMA FORMAÇÃO TERRESTRE**".

5 Antecedentes da Invenção

Campo da Invenção

A presente invenção refere-se geralmente ao campo de instrumentos de perfil de resistividade de poço por indução eletromagnética, em que as antenas de indução são orientadas transversalmente com respeito ao eixo geométrico longitudinal do instrumento. Mais especificamente, a invenção está relacionada com um aparelho para perfil de resistividade de poço por indução eletromagnética transversal operando no domínio de frequência e/ou de tempo com erros reduzidos introduzidos nos dados de perfil adquiridos.

15 Descrição da Técnica Relacionada

Os instrumentos de perfil de resistividade de poço por indução eletromagnética são bem-conhecidos na técnica. Os instrumentos de perfil de resistividade de poço por indução eletromagnética são utilizados para determinar a condutividade elétrica, e seu oposto, a resistividade, de formações terrestres penetradas por um furo de sonda. A condutividade da formação tem sido determinada baseada nos resultados da medição do campo magnético de correntes de Foucault que o instrumento induz na formação adjacente ao furo de sonda. A condutividade elétrica é utilizada, entre outras razões, para deduzir o conteúdo de fluido da formação terrestre. Tipicamente, menor condutividade (maior resistividade) está associada com formações terrestres possuindo hidrocarboneto. Os princípios físicos do perfil por indução eletromagnética de poço são bem descritos, por exemplo, em J. H. Moran e K. S. Kunz, Basic Theory of Induction Logging and Application to Study of Two-Coil Sondes, Geophysics, Vol. 27, Nº 6, part 1, págs. 829 até 858, Society of Exploration Geophysicists, December 1962. Vários melhoramentos e modificações para os instrumentos de resistividade por indução eletromagnética descritos na referência de Moran e Kunz, supra, foram projeta

dos, alguns dos quais são descritos, por exemplo, na Patente US 4.837.517 expedida para Barber, na Patente US 5.157.605 expedida para Chandler et al. e na Patente US 5.600.246 expedida para Fanini et al..

5 A ferramenta convencional de perfil de resistividade de poço por indução geofísica é uma sonda adequada para introdução no furo de sonda e ela compreende uma seção de sensor contendo um equipamento transmissor e um receptor e outros, principalmente elétrico, para medir dados para deduzir os parâmetros físicos que caracterizam a formação. A seção de sensor, ou mandril, compreende transmissores e receptores de indução po-
10 sicionados ao longo do eixo geométrico do instrumento, dispostos na ordem de acordo com o instrumento particular ou especificações da ferramenta e orientados paralelos ao eixo geométrico do furo de sonda. O equipamento elétrico gera uma tensão elétrica a ser adicionalmente aplicada para uma bobina de indução do transmissor, sinais de condição provenientes das bo-
15 binas de indução receptoras, processa a informação adquirida, armazena ou por meio de telemetria envia os dados para a superfície terrestre através de um cabo elétrico de perfilagem utilizado para abaixar a ferramenta dentro do furo de sonda.

20 As técnicas convencionais de perfil por indução de poço empregam bobinas enroladas em um mandril de isolamento. Uma ou mais bobinas transmissoras são energizadas por uma corrente alternada. O campo magnético oscilante produzido por esta disposição resulta na indução de correntes nas formações que são quase proporcionais à condutividade das formações. Estas correntes, por sua vez, contribuem para a tensão elétrica induzi-
25 da em uma ou mais bobinas receptoras. Por selecionar somente o componente da tensão elétrica que está em fase com a corrente do transmissor, um sinal é obtido, o qual é aproximadamente proporcional à condutividade da formação. No aparelho convencional de perfil por indução, a bobina transmissora e a bobina receptora básicas possuem eixos geométricos que
30 estão alinhados com o eixo geométrico longitudinal do dispositivo de perfil do poço. (Por simplicidade de explicação, será assumido que o eixo geométrico do furo de sonda está alinhado com o eixo geométrico do dispositivo de per-

fil, e que ambos estão na direção vertical. Além disso, bobinas únicas serão subsequentemente referidas sem considerar as bobinas de focalização ou similar). Esta disposição tende a induzir circuitos secundários de corrente na formação que são concêntricos com as bobinas de transmissão e de recepção verticalmente orientadas. As medições de condutividade resultantes são indicativas da condutividade (ou resistividade) horizontal das formações envolventes. Entretanto, existem várias formações encontradas no perfil de poço que possuem uma condutividade que é anisotrópica. A anisotropia resulta da maneira na qual os leitos da formação foram depositados pela natureza. Por exemplo, "anisotropia uniaxial" é caracterizada por uma diferença entre a condutividade horizontal, em um plano paralelo ao plano de formação do leito, e a condutividade vertical, em uma direção perpendicular ao plano de formação do leito. Quando não existe inclinação de formação do leito, a resistividade horizontal pode ser considerada como estando no plano perpendicular ao furo de sonda, e a resistividade vertical na direção paralela ao furo de sonda. Os dispositivos convencionais de perfil por indução, os quais tendem a ser sensíveis somente para a condutividade horizontal das formações, não proporcionam uma média da condutividade vertical ou da anisotropia. Têm sido desenvolvidas técnicas para determinar a anisotropia da formação. Vide, por exemplo, a Patente US 4.302.722.

Assim, em um furo de sonda vertical, em uma sequência sedimentar clástica, uma ferramenta convencional de perfil por indução com transmissores e receptores (bobinas de indução) orientados somente ao longo do eixo do furo de sonda responde à condutividade horizontal média que combina a condutividade tanto de areias como de xistos. Estas leituras médias normalmente são dominadas pela condutividade relativamente maior das camadas de xisto e exibem sensibilidade reduzida para as camadas de areia com menor condutividade onde as reservas de hidrocarbonetos são produzidas. Para endereçar estes problemas, registradores mudaram para utilizar as ferramentas de perfil por indução transversal possuindo transmissores e receptores magnéticos (bobinas de indução) orientados de forma transversal com respeito ao eixo geométrico longitudinal da ferramenta. Tais

instrumentos para perfil de poço por indução transversal foram descritos na publicação de Patente PCT WO 98/00733 de Beard et al., e na Patente US 5.452.761 para Beard et al.; na Patente US 5.999.883 para Gupta et al.; e na 5.781.436 para Forgang et al..

5 Uma dificuldade em interpretar os dados adquiridos por uma ferramenta de perfil por indução transversal está associada com a vulnerabilidade de sua resposta às condições do furo de sonda. Entre estas condições está a presença de um fluido condutivo do poço bem como efeitos de invasão de fluídos no furo de poço. Um método conhecido para reduzir estes
10 impactos não desejados sobre a resposta da ferramenta de perfil por indução transversal foi descrito em L. A Tabarovsky and M. I. Epov, Geometric and Frequency Focusing in Exploration of Anisotropic Seams, Nauka, USSR Academy of Science, Siberian Division, Novosibirsk, págs. 67 até 129 (1972) e de L. A Tabarovsky and M. I. Epov, Radial Characteristics Of Induction Focusing Probes With Transverse Detectors In An Anisotropic Medium, Soviet
15 Geology And Geophysics, 20 (1979), de págs. 81 até 90.

Existem algumas margens de hardware e limitações de software que causam impacto sobre o desempenho e os resultados da ferramenta convencional de perfil por indução transversal em erros aparecendo nos dados adquiridos. O problema geral de hardware tipicamente está associado a
20 um campo elétrico que não pode ser evitado que é irradiado pelo transmissor de indução da ferramenta simultaneamente com o campo magnético desejado, e isto acontece de acordo com as equações de Maxwell para o campo variando no tempo. O campo elétrico do transmissor interage com os módulos restantes da ferramenta de perfil por indução e com a formação; entretanto, esta interação não produz qualquer informação útil. Na verdade, devido à possibilidade sempre existente em relação a este campo se acoplado
25 diretamente dentro da parte do receptor da seção de sensor através de correntes dielétricas parasitas, isto introduz ruído. Quando ocorre este acoplamento, o campo elétrico desenvolve potenciais elétricos não-desejáveis na
30 entrada do condicionamento do sinal do receptor, principalmente através do receptor da bobina de indução, e esta tensão elétrica se torna um compo-

nente aditivo de ruído para o sinal de interesse, introduzindo um erro sistemático para as medições.

O problema poderia se tornar ainda mais sério se a ferramenta de perfil por indução operasse em poços contendo fluidos baseados em água. A lama baseada em água possui uma permissividade elétrica significativamente maior comparada com o fluido baseado em ar ou em óleo. Ao mesmo tempo, a impedância elétrica das correntes dielétricas mencionadas acima pode ser sempre considerada como acoplamento capacitivo entre a fonte – o transmissor de indução e o ponto de acoplamento. Esta circunstância aparentemente resultaria no fato de que o acoplamento capacitivo e os erros sistemáticos associados são dependentes do ambiente devido ao fato de que a impedância capacitiva será inversa à permissividade da lama do poço.

O método convencional em reduzir este acoplamento capacitivo no instrumento de perfil por indução se configura em utilizar blindagens elétricas (Faraday) especiais enroladas ao redor tanto da bobina de indução do transmissor como do receptor. Estas blindagens são eletricamente conectadas ao ponto comum terra analógico do transmissor para fixar seu próprio potencial elétrico e proporcionar retornos das correntes dielétrica de volta para sua fonte – transmissor ao invés de acoplamento com qualquer outro local na ferramenta. Entretanto, a eficácia da geometria e do desenho de blindagens Faraday se torna marginal e contraditória nas aplicações de alta frequência onde as ferramentas convencionais de indução transversal podem operar. Estas limitações ocorrem devido à atenuação que estas blindagens introduzem para o campo magnético conhecido na técnica como um "efeito de cobertura" da blindagem. As limitações do desenho da blindagem são inevitáveis e, portanto, a possibilidade de acoplamento através das correntes dielétricas permanece.

Exemplos do uso de blindagens ("gaiolas") de Faraday são revelados na US6630830 para Omeragic et al., e na US 6667620 para Homan et al.. Um problema com tais dispositivos da técnica anterior é o fato de que diferentes bobinas tanto para o transmissor como para o receptor estão em

posições espacialmente diferentes. Como resultado disto, os diferentes componentes do campo magnético amostram diferentes partes do terra e também podem possuir diferentes distâncias transmissor – receptor. Um segundo problema com um dispositivo tal como este na patente de Omeragic (o qual utiliza antenas inclinadas) é o uso de uma blindagem com fendas não-condutiva na qual as fendas são projetadas para serem ortogonais ao plano da bobina ao redor de todos os 360° da ferramenta. Em adição, a blindagem de Faraday que é disposta na blindagem não-condutiva possui uma geometria complexa. Um ou mais destes problemas são evitados na presente invenção.

Sumário da Invenção

Uma concretização da invenção é um aparelho para avaliar uma formação terrestre. O aparelho inclui uma ferramenta de perfil transportada em um furo de sonda. O aparelho inclui uma ferramenta de perfil configurada para ser transportada para dentro de um furo de sonda na formação terrestre. Uma ferramenta de perfil inclui uma primeira bobina definindo uma primeira antena magnética bipolar e uma segunda bobina definindo uma segunda antena magnética bipolar substancialmente ortogonal à primeira antena magnética bipolar. O aparelho também inclui um conjunto de circuitos configurado para trocar a segunda bobina entre um modo de circuito aberto e um modo ativo. As primeira e a segunda bobinas podem ser antenas transmissoras. O aparelho pode adicionalmente incluir as terceira e a quarta bobinas compreendendo as antenas receptoras. O aparelho também pode incluir uma terceira bobina definindo uma terceira antena magnética bipolar substancialmente ortogonal à primeira antena magnética bipolar e à segunda antena magnética bipolar. Quando a primeira bobina está em um modo ativo e uma segunda bobina ETA em um modo de circuito aberto, o aparelho pode adicionalmente incluir uma bobina receptora configurada para produzir um sinal indicativo de um rendimento da formação terrestre resultante da ativação da primeira bobina, e um processador configurado para determinar a propriedade da formação terrestre utilizando o sinal. A propriedade da formação terrestre pode ser uma resistividade horizontal, uma resistividade ver-

tical, um ângulo de inclinação e/ou uma distância até um limite do leito na formação terrestre. O aparelho pode adicionalmente incluir um dispositivo de transporte configurado para transportar a ferramenta de perfil para dentro do furo de sonda; o dispositivo de transporte pode ser um cabo elétrico de perfila-
5 gagem, um tubular de perfuração, ou seu arame. Uma espessura da primeira bobina e/ou da segunda bobina pode ser menor do que uma profundidade de penetração de uma onda eletromagnética e do que a frequência de operação da ferramenta de perfil.

Um passo da primeira bobina e/ou da segunda bobina pode ser selecionado
10 para reduzir uma atenuação do campo magnético produzido pela primeira bobina e por uma segunda bobina.

Outra concretização da invenção é um método para avaliar uma formação terrestre. Uma ferramenta de perfil é transportada para dentro de um furo de sonda na formação terrestre. Uma primeira bobina na ferramenta
15 de perfil é largamente ativada utilizando uma segunda bobina na ferramenta de perfil para eletricamente isolar um campo elétrico resultante a partir da ativação da primeira bobina. Um sinal indicativo de uma propriedade da formação terrestre é produzido pela ativação. A propriedade da formação terrestre é estimada a partir do sinal. O isolamento elétrico pode ser feito pela
20 abertura do circuito da segunda bobina. A primeira bobina e a segunda bobina podem ser substancialmente ortogonais uma à outra e possuírem substancialmente o mesmo centro. O método pode adicionalmente incluir ativar a segunda bobina, produzindo um sinal adicional indicativo da propriedade da formação terrestre resultante da ativação da segunda bobina, e utilizar o si-
25 nal adicional para estimar a propriedade. O método pode adicionalmente incluir utilizar uma terceira bobina para adicionalmente isolar o campo elétrico. A propriedade da formação terrestre pode ser uma resistividade horizontal, uma resistividade vertical, um ângulo de inclinação e/ou uma distância até um limite do leito na formação terrestre. O método pode adicionalmente
30 incluir transportar a ferramenta de perfil para dentro do furo de sonda utilizando um cabo elétrico de perfilação, um tubular de perfuração ou um arame.

Outra concretização da invenção é um aparelho para avaliar uma formação terrestre. O aparelho inclui uma ferramenta de perfil configurada para ser transportada em um furo de sonda. Uma primeira bobina transmissora na ferramenta de perfil define uma primeira antena magnética bipolar, a primeira bobina transmissora configurada para operar em uma primeira frequência. Uma segunda bobina transmissora na ferramenta de perfil define uma segunda antena magnética bipolar substancialmente ortogonal à primeira antena magnética bipolar. A segunda bobina transmissora está configurada para operar em uma segunda frequência diferente da primeira frequência. Uma bobina receptora na ferramenta de perfil está configurada para produzir uma saída indicativa de um rendimento da formação terrestre quando da ativação de pelo menos uma das bobinas transmissoras. A primeira bobina transmissora e uma segunda bobina transmissora podem ser acopladas com uma fonte de corrente possuindo uma alta impedância de saída. O aparelho pode adicionalmente incluir um dispositivo de transporte selecionado dentre um cabo elétrico de perfilagem, tubulação em espiral ou tubular de perfuração.

Outra concretização da invenção é um método para avaliar uma formação terrestre. Uma ferramenta de perfil é transportada para dentro de um furo de sonda na formação terrestre. Uma primeira bobina transmissora na ferramenta de perfil que define uma primeira antena magnética bipolar é ativada em uma primeira frequência. Uma segunda bobina transmissora na ferramenta de perfil, a qual define uma segunda antena magnética bipolar substancialmente ortogonal à primeira antena magnética bipolar é ativada em uma segunda frequência diferente da primeira sequência. Uma bobina receptora é utilizada para produzir uma saída indicativa da propriedade da formação terrestre quando da ativação de pelo menos uma das bobinas transmissoras.

Breve Descrição dos Desenhos

A invenção é mais bem entendida por referência às figuras acompanhantes, onde números iguais referem-se a componentes iguais e nas quais:

a figura 1 apresenta um instrumento por indução disposto em um furo de poço penetrando formações terrestres;

a figura 2 (Técnica Anterior) apresenta a disposição das bobinas receptoras e transmissoras na ferramenta de perfil por indução com múltiplos componentes comercializada sob o nome 3DEX[®];

a figura 3a apresenta uma disposição na qual a bobina do componente vertical protege uma bobina transversal;

a figura 3b apresenta a relação entre os condutores da bobina vertical que eletricamente protege a bobina transversal;

as figuras 4a e 4b ilustram uma disposição de troca na qual qualquer uma das bobinas pode ser trocada entre os modos ativo e aberto;

a figura 5 apresenta a habilidade da presente invenção em fazer medidas com múltiplos componentes através das mesmas distâncias do transmissor – receptor; e

a figura 6 é um fluxograma ilustrando uma maneira na qual o aparelho da presente invenção pode ser utilizado.

Descrição Detalhada da Invenção

Referindo-se agora à figura 1, um instrumento de perfil de poço por indução eletromagnética 10 é apresentado disposto em um furo de poço 2 perfurado através de formações terrestres. As formações terrestres são apresentadas geralmente por 4. O instrumento 10 pode ser abaixado dentro do furo de poço e retirado do furo de poço 2 por meio de um cabo elétrico de perfilagem blindado 6 ou transporte similar conhecido na técnica. O instrumento 10 pode ser montado a partir de três subseções: uma unidade auxiliar de componentes eletrônicos 14 disposta em uma extremidade do instrumento 10; uma unidade de mandril de bobina 8 conectada com a unidade auxiliar de componentes eletrônicos 14; e uma unidade de componentes eletrônicos de receptor / processamento de sinal / telemetria 12 conectada com a outra extremidade da unidade de mandril de suporte de bobina 8, esta unidade 12 tipicamente estando conectada com o cabo 6.

A unidade de mandril de suporte de bobina 8 inclui as bobinas transmissoras e receptoras de indução, como serão adicionalmente explica-

das, para induzir campos eletromagnéticos na formação terrestre 4 e para receber sinais de tensão elétrica induzidos pelas correntes de Foucault fluindo nas formações terrestres 4 como resultado dos campos eletromagnéticos induzidos nas mesmas.

5 A unidade auxiliar de componentes eletrônicos 14 pode incluir um gerador de sinal e amplificadores de potência (não-apresentados) fazendo com que as correntes alternadas com frequências selecionadas fluam através das bobinas transmissoras na unidade de mandril de suporte de bobina 8.

10 A unidade de componentes eletrônicos de receptor / processamento de sinal / telemetria 12 pode incluir os circuitos receptores (não-apresentados) para detectar tensões elétricas induzidas nas bobinas receptoras na unidade de mandril de suporte de bobina 8, e circuitos para processar estas tensões elétricas recebidas (não apresentadas) em sinais representativos das condutividades das várias camadas, apresentadas como 4A
15 até 4F das formações terrestres 4. Como uma questão de conveniência, a unidade de componentes eletrônicos de receptor / processamento de sinal / telemetria 12 pode incluir a telemetria de sinal para transmitir os sinais relacionados com a condutividade para a superfície da terra ao longo do cabo 6
20 para processamento adicional, ou alternativamente pode armazenar os sinais relacionados com a condutividade em um dispositivo de gravação apropriado (não apresentado) para processamento após o instrumento 10 ser retirado do furo de poço 2.

Referindo-se à figura 2, a configuração das bobinas transmissoras e receptoras no instrumento de perfil por indução 3DEXplorer® da Baker
25 Hughes é apresentada. Três transmissores ortogonais 101, 103 e 105 que são referidos como os transmissores Tx, Tz e Ty são apresentados (o eixo geométrico z é o eixo geométrico longitudinal da ferramenta). Correspondendo aos transmissores 101, 103 e 105 estão os receptores associados
30 107, 109 e 111, referidos como os receptores Rx, Rz e Ry, para medir os campos magnéticos correspondentes. Em um modo de operação da ferramenta, os componentes Hxx, Hyy, Hzz, Hxy e Hxz são medidos, apesar de

que outros componentes também podem ser utilizados.

Os princípios básicos da presente invenção são ilustrados com referência às figuras 3a, 3b e às figuras 4a e 4b. Na figura 3a é apresentado um mandril com uma bobina -z 121 e uma bobina transversal 123. A bobina transversal poderia ser a bobina -z ou a bobina -y de uma ferramenta de perfil com múltiplos componentes. A discussão neste documento é igualmente válida se as bobinas forem bobinas transmissoras ou bobinas receptoras. Para o caso onde as bobinas são transmissoras, quando a bobina -x é ativada, ela irá atuar como um bipolar magnético transversal com um fluxo magnético transversal ao eixo geométrico da ferramenta.

Na figura, pode ser visto que a bobina -z completamente envolve a bobina -x. Também pode ser visto que os condutores do enrolamento da bobina -z são substancialmente paralelos ao vetor de fluxo magnético produzido pela bobina -x. Assim, se a bobina 121 tiver seu circuito aberto, ela pode atuar como uma blindagem de Faraday que separaria o campo elétrico do transmissor -x dos receptores na ferramenta (não-apresentados). Para adicionalmente atuar como uma blindagem, um lado da bobina -z deve ser conectado com o eletrodo "comum" dos componentes eletrônicos conectados com a bobina -x. Esta disposição permite que a corrente dielétrica aparecendo devido ao campo elétrico induzido do componente X complete um circuito de corrente e retorne para sua fonte de origem. Como pode ser visto, a disposição apresentada na figura 3a possui as bobinas transmissoras -z e -x substancialmente na mesma posição espacial. Em uma concretização da invenção, uma bobina -y (não apresentada para simplificar a ilustração) também é utilizada para proporcionar a habilidade de gerar campos magnéticos em três direções.

A blindagem do campo elétrico por uma bobina colocada junta também é eficaz se a bobina estiver no modo de circuito aberto e estiver dentro da bobina que está ativada. Isto intuitivamente deriva a partir da equação de Maxwell

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (1)$$

Podemos considerar os condutores paralelos ao campo magné-

tico como proporcionando uma condução delimitadora onde o campo elétrico é zero. Em tal caso, faz pouca diferença se o campo elétrico for forçado para zero em uma superfície dentro de uma bobina ou fora de uma bobina. Isto é esquematicamente ilustrado na figura 3b, onde a seta 133 apresenta a direção do campo magnético resultante do fluxo de corrente através da bobina 133 (somente uma volta da bobina é apresentada). O condutor da bobina 133 é substancialmente paralelo ao campo magnético e assim, atuam como uma blindagem Faraday quando a bobina 133 está com o circuito aberto.

Voltando-se agora para as figuras 4a e 4b, uma disposição de troca utilizada com a presente invenção é discutida. Representado na figura 4a está uma bobina transmissora (ou receptora) 205 conectada com os componentes eletrônicos do transmissor (ou receptor) 201 através de uma disposição de troca 203. Na situação apresentada na figura 4a, a bobina pode ser dita como estando ativa. Na posição de troca 203' apresentada na figura 4b, a bobina está com o circuito aberto e assim pode atuar como uma blindagem de Faraday como discutido acima em relação a qualquer outra bobina da ferramenta de perfil.

Para sintetizar, cada uma das três bobinas transmissoras pode estar ativa ou aberta. É possível ter mais do que uma bobina ativa ao mesmo tempo, posto que elas estão sendo operadas em frequências diferentes. Isto é igualmente verdadeiro para as bobinas receptoras. A operação com várias frequências é viável se as bobinas transmissoras forem energizadas pelas fontes de corrente, isto é, por dispositivos com alta impedância de saída.

Também deve ser observado que se o transmissor estiver ativado por uma fonte de corrente, o receptor estará acoplado com um amplificador de alta impedância, e um lado das bobinas de antena correspondentes e dos componentes eletrônicos estão na referência comum do instrumento, então a necessidade da disposição de troca desaparece.

A troca entre os diferentes modos pode ser realizada por um conjunto adequado de circuitos. Tal conjunto de circuitos é conhecido na técnica e não é adicionalmente discutido. Para os propósitos da presente

invenção, o termo "conjunto de circuitos" é pretendido para incluir um processador ou outro computador digital.

Os versados na técnica e tendo o benefício da presente descrição reconheceriam que o espaçamento entre os dedos e uma blindagem de Faraday deve ser suficientemente grande e a espessura dos dedos suficientemente pequena para reduzir a atenuação do campo magnético útil. A atenuação poderia ocorrer devido à cobertura física do campo magnético e às correntes dielétricas induzidas nos dedos. Para minimizar o efeito das correntes dielétricas, a espessura dos dedos deve ser muito menor do que a profundidade de penetração na faixa de frequências de interesse. As mesmas considerações se aplicam para o desenho de bobinas mutuamente ortogonais com respeito a sua geometria de enrolamento, espessura e passo.

Os versados na técnica e tendo o benefício da presente descrição também poderiam reconhecer que as gaiolas de Faraday operam de forma apropriada somente se existir um caminho para de forma capacitiva induzir cargas a serem removidas como salientado acima. Se não existir tal remoção de carga, a gaiola meramente altera a autocapacitância da bobina. Em uma concretização da presente invenção, o caminho de retorno é proporcionado utilizando um tubo de alimentação direta. Como discutido em Fanini, um tubo de alimentação direta proporciona uma conexão entre invólucros que contém os módulos eletrônicos transmissores e receptores.

A disposição das bobinas dos receptores pode ser similar à disposição das bobinas transmissoras. Quando isto é feito, a disposição da bobina pode ser esquematicamente representada pela figura 5. Uma comparação da figura 5 com a figura 2 apresenta que com a disposição da figura 5, todos os nove componentes de campo H_{xx} , H_{xy} , H_{xz} , H_{yx} , H_{yy} , H_{yz} , H_{zx} , H_{zy} e H_{zz} podem ser medidos na mesma distância de transmissor – receptor amostrando substancialmente o mesmo intervalo de profundidade.

A operação típica da ferramenta de perfil é dada no fluxograma da figura 6. A primeira bobina transmissora é ativada 301 com as outras bobinas transmissoras no circuito aberto. Os sinais são recebidos em cada uma das bobinas receptoras 311 (enquanto mantendo a bobina que não está

recebendo no circuito aberto). Se o primeiro transmissor for, por exemplo, o transmissor $-x$, então este forneceria os sinais H_{xx} , H_{yy} e H_{xz} que são acumulados 315. É feita uma verificação para ver se todos os sinais do receptor foram adquiridos 313. Se sim, o próximo transmissor é ativado 317. Se todos os transmissores tiverem sido ativados, os sinais acumulados são processados 319. É para ser observado que isto é um processo contínuo à medida que a ferramenta de perfil está sendo transportada através do furo de sonda. Também deve ser observado que a blindagem dos receptores é menos importante para o desempenho da ferramenta comparada com a blindagem dos transmissores e a primeira pode ser opcional. O processamento subsequente 319 pode utilizar técnicas anteriores para determinar as propriedades de interesse da formação terrestre. Estas poderiam incluir (i) a determinação da resistividade horizontal e vertical da formação terrestre, (ii) a determinação da inclinação do furo de sonda em relação ao eixo geométrico de anisotropia, (iii) a distância até o limite do leito na formação terrestre. Vide, por exemplo, a US6493632 para Mollison et al., a US6618676 para Kriegshausen et al., a US6885947 para Xiao et al., e a US6900640 para Fanini et al., a US 6636045 para Tabarovsky et al., todas possuindo o mesmo cessionário do presente pedido e cujos conteúdos são incorporados neste documento por referência. Adicionalmente deve ser observado que utilizando os princípios de reciprocidade, as operações na figura 6 poderiam ser executadas com o transmissor e o receptor permutados em etapas diferentes. As propriedades determinadas podem ser emitidas para um meio adequado e podem ser adicionalmente utilizadas para operações como completação de poço e desenvolvimento de reservatório.

A operação do transmissor e dos receptores pode ser controlada por um ou mais processadores. Para aplicações de cabo elétrico de perfuração, o processador de furo de poço e/ou o processador de superfície, pode ser utilizado. Parte do processamento pode ser feito em uma localização remota longe do furo de poço. Implícito no controle e no processamento dos dados é o uso de um programa de computador implementado em um meio legível por máquina adequado que permite ao processador executar o con-

trole e o processamento. O meio legível por máquina pode incluir ROMs, EPROMs, EAROMs, Memórias Flash e discos Óticos.

5 Enquanto a descrição precedente é direcionada para as concretizações preferidas da invenção, várias modificações serão aparentes para os versados na técnica. É pretendido que todas as variações dentro do escopo das reivindicações anexas sejam abrangidas pela descrição precedente.

REIVINDICAÇÕES

1. Aparelho configurado para avaliar uma formação terrestre, o aparelho **caracterizado por** compreender:

uma primeira antena de indução;

5 uma segunda antena de indução que possui bobinas substancialmente ortogonais à bobina da primeira antena de indução e que circunda a primeira antena, e circuitos configurados para comutar a segunda antena entre (A) um modo de circuito aberto no qual um campo elétrico produzido pela primeira antena é desacoplado a partir de uma antena receptora, e (B)
10 um modo ativo;

em que um passo de pelo menos uma das (i) primeira antena de indução e (ii) segunda antena de indução é selecionado para reduzir a atenuação do campo magnético produzido pela outra das primeira antena de indução e segunda antena de indução.

15 2. Aparelho de acordo com a reivindicação 1, **caracterizado pelo fato de** que as primeira e segunda antenas de indução compreendem antenas transmissoras, o aparelho ainda compreendendo terceira e quarta antenas de indução que compreendem antenas receptoras.

20 3. Aparelho de acordo com a reivindicação 1, **caracterizado pelo fato de** que ainda compreende a terceira antena de indução dotada de bobinas substancialmente ortogonais a bobina das primeira e segunda antenas de indução.

25 4. Aparelho de acordo com a reivindicação 1, **caracterizado pelo fato de** que a primeira antena de indução está em um modo ativo, a segunda antena de indução está em um modo de circuito aberto, o aparelho ainda compreende:

(i) uma antena de indução receptora configurada para produzir um sinal indicativo da propriedade da formação terrestre o sinal indicativo resultando da ativação da primeira antena de indução; e

30 (ii) um processador configurado para determinar um valor da propriedade da formação terrestre usando o sinal.

5. Aparelho de acordo com a reivindicação 1, **caracterizado pe-**

lo fato de que a primeira antena de indução e a segunda antena de indução são dispostas em uma ferramenta de perfil, o aparelho ainda compreendendo um dispositivo de transporte configurado para transportar a ferramenta de perfil para o poço, o dispositivo de transporte selecionado a partir de (i) um
5 cabo elétrico de perfilagem, (ii) um tubular de perfuração, e (iii) um arame.

6. Aparelho, de acordo com a reivindicação 1, **caracterizado pelo fato de** que:

a primeira antena de indução é configurada para operar em uma primeira frequência;

10 a segunda antena de indução cerca a primeira antena e é configurada para operar em uma segunda frequência diferente da primeira frequência; e

a antena receptora é configurada para produzir uma saída indicativa da propriedade da formação terrestre na ativação de pelo menos uma
15 das antenas de indução.

7. Aparelho, de acordo com a reivindicação 6, **caracterizado pelo fato de** que a primeira antena de indução e a segunda antena são acopladas em uma fonte de corrente tendo uma alta impedância de saída.

8. Aparelho de acordo com a reivindicação 6, **caracterizado pelo**
20 **lo fato de** que a antena receptora é acoplada em um amplificador tendo uma alta impedância de entrada.

9. Método de operação do aparelho descrito na reivindicação 1 para avaliar uma formação terrestre, o método **caracterizado pelo fato de** compreender:

25 ativar a primeira antena de indução no poço enquanto usa a segunda antena cercando a primeira antena de indução para isolar eletricamente um campo elétrico resultante da ativação da primeira antena de indução;

usar a antena receptora para produzir um sinal indicativo da propriedade da formação terrestre o sinal indicativo resultando da ativação; e
30 estimar a partir do sinal um valor da propriedade da formação terrestre.

10. Método, de acordo com a reivindicação 9, **caracterizado pelo fato de** ainda compreender:

(i) subsequente a ativar a primeira antena de indução, abrir o circuito da primeira antena de indução;

5 (ii) ativar a segunda antena de indução; e

(iii) produzir um sinal adicional indicativo da propriedade da formação terrestre a partir da ativação da segunda antena.

em que a estimacão é ainda baseada pelo menos em parte no sinal adicional.

10 11. Método, de acordo com a reivindicação 9, **caracterizado pelo fato de** ainda compreender usar uma terceira antena de indução para ainda isolar o campo elétrico.

12. Método, de acordo com a reivindicação 9, **caracterizado pelo fato de** que a propriedade da formação terrestre é selecionada (i) uma resistividade horizontal, (ii) uma resistividade vertical da formação terrestre,
15 (iii) um ângulo de inclinação, e (iv) uma distância entre um limite do leito na formação terrestre.

13. Método, de acordo com a reivindicação 9, **caracterizado pelo fato de** ainda compreender a disposicão da primeira antena de indução e
20 a segunda antena de indução em uma ferramenta de perfil e transportar a ferramenta de perfil para o poço em um dos (i) um cabo elétrico de perfilagem, (ii) um tubular de perfuracão, e (iii) um arame.

14. Método, de acordo com a reivindicação 9, **caracterizado pelo fato de** ainda compreender:

25 ativar, em uma primeira frequência, a primeira antena de indução;

fechar a segunda antena e ativar, em uma segunda frequência, a segunda antena de indução; e

30 usar a antena receptora para produzir uma saída indicativa da propriedade da formação terrestre.

15. Aparelho para avaliar uma formação terrestre, o aparelho **caracterizado pelo fato de** compreender:

uma primeira antena de indução;

uma segunda antena de indução tendo bobinas substancialmente ortogonais a bobina da primeira antena e cercado a primeira antena de indução e os circuitos configurados para comutar a segunda antena entre (A) um modo de circuito aberto no qual um campo elétrico produzido pela primeira antena é desacoplado a partir de uma antena receptora e (B) um modo ativo;

em que a espessura de pelo menos um (i) uma bobina da primeira antena de indução e (ii) uma bobina da segunda antena de indução é menor que uma profundidade de pele de uma onda eletromagnética em uma frequência de operação de outra da primeira antena de indução e da segunda antena de indução.

16. Aparelho, de acordo com a reivindicação 15, **caracterizado pelo fato de** que a primeira antena de indução está em um modo ativo a segunda antena de indução está em um modo de circuito aberto, o aparelho ainda compreendendo:

(i) uma antena de indução receptora configurada para produzir um sinal indicativo da propriedade da formação terrestre, o sinal resultando da ativação da primeira antena de indução; e

(ii) um processador configurado para determinar um valor da propriedade da formação terrestre usando o sinal.

17. Aparelho, de acordo com a reivindicação 15, **caracterizado pelo fato de** que a primeira antena de indução e a segunda antena de indução são dispostas em uma ferramenta de perfil, o aparelho ainda compreendendo um dispositivo de transporte configurado para transportar a ferramenta de perfil para o poço, o dispositivo de transporte selecionado a partir de (i) um cabo elétrico de perfilagem, (ii) um tubular de perfuração, e (iii) um arame.

18. Método de operação do aparelho descrito na reivindicação 15 para avaliar uma formação terrestre, o método **caracterizado pelo fato de** compreender:

ativar a primeira antena de indução no poço enquanto usa a se-

gunda antena cercando a primeira antena de indução para isolar eletricamente um campo elétrico resultante da ativação da primeira antena de indução;

5 usar a antena receptora para produzir um sinal indicativo da propriedade da formação terrestre, o sinal indicativo resultando da ativação; e
 estimar a partir do sinal um valor da propriedade da formação terrestre.

19. Método, de acordo com a reivindicação 18, **caracterizado pelo fato de** ainda compreender:

10 (i) subsequente a ativar a primeira antena de indução, abrir o circuito da primeira antena de indução;

 (ii) ativar a segunda antena de indução; e

 (iii) produzir um sinal adicional indicativo de uma propriedade da formação terrestre a partir da ativação da segunda antena.

15 em que a estimação é ainda baseada pelo menos em parte no sinal adicional.

20. Método, de acordo com a reivindicação 18, **caracterizado pelo fato de** que a propriedade da formação terrestre é selecionada (i) uma resistividade horizontal, (ii) uma resistividade vertical da formação terrestre,
20 (iii) um ângulo de inclinação, e (iv) uma distância entre um limite do leito na formação terrestre.

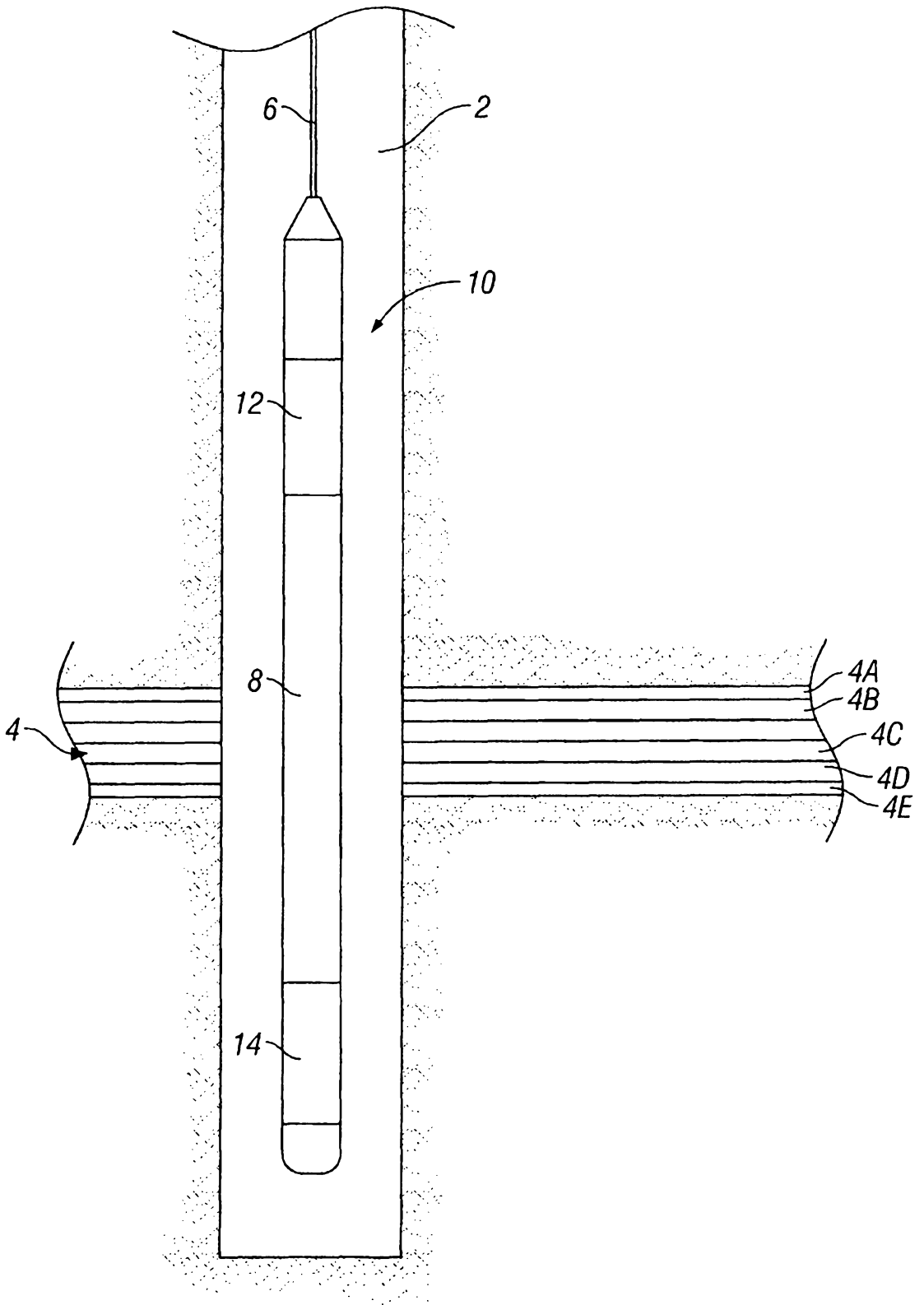


FIG. 1

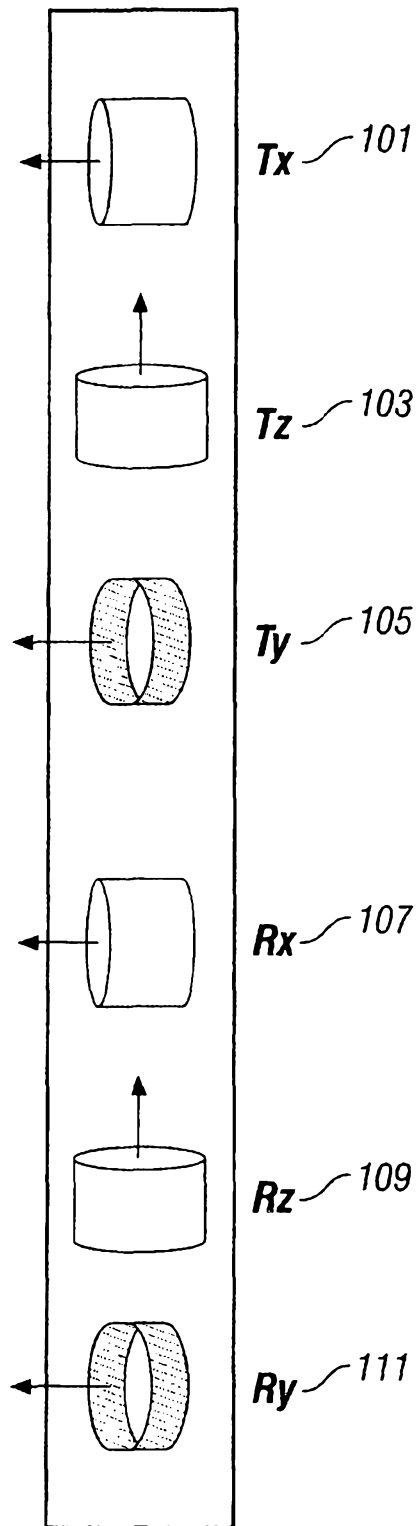


FIG. 2
(TÉCNICA ANTERIOR)

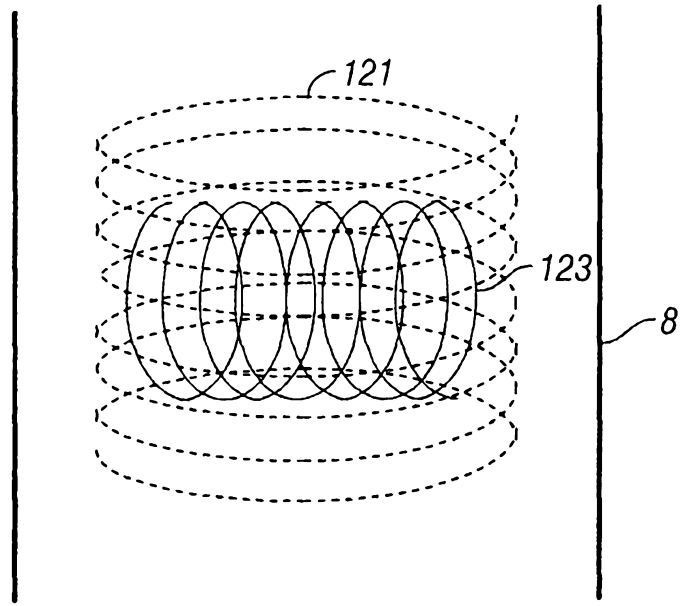


FIG. 3A

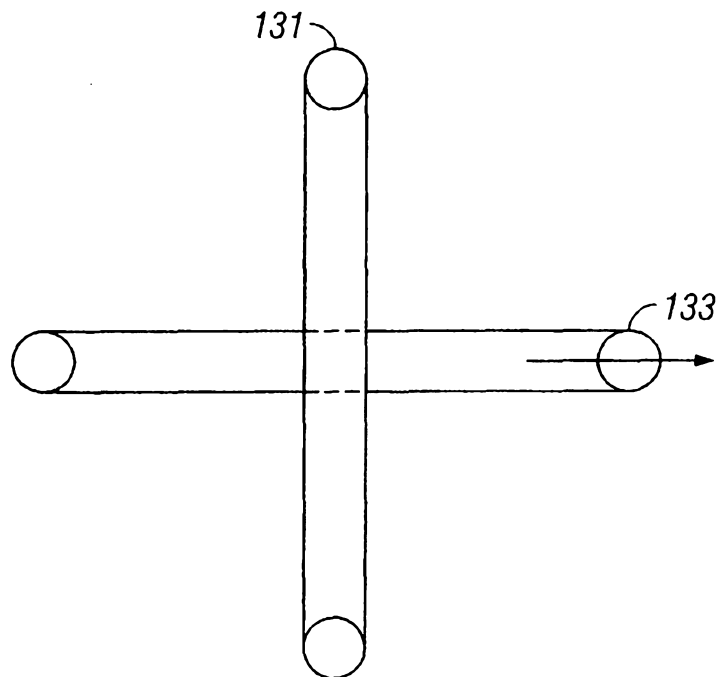


FIG. 3B

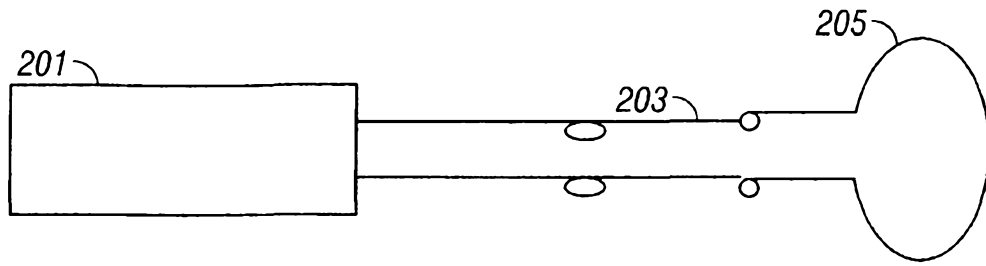


FIG. 4A

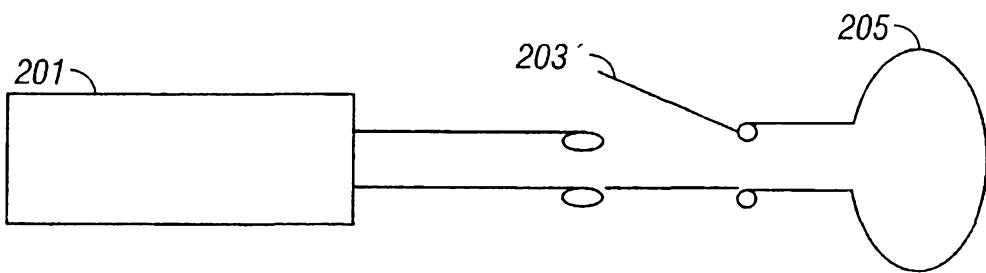


FIG. 4B

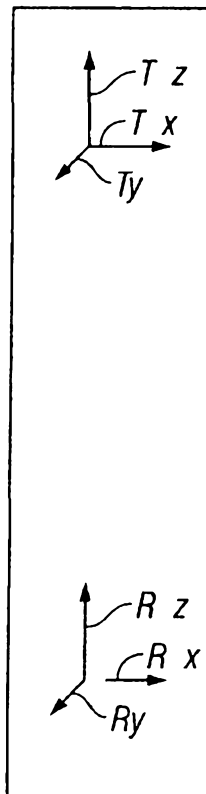


FIG. 5

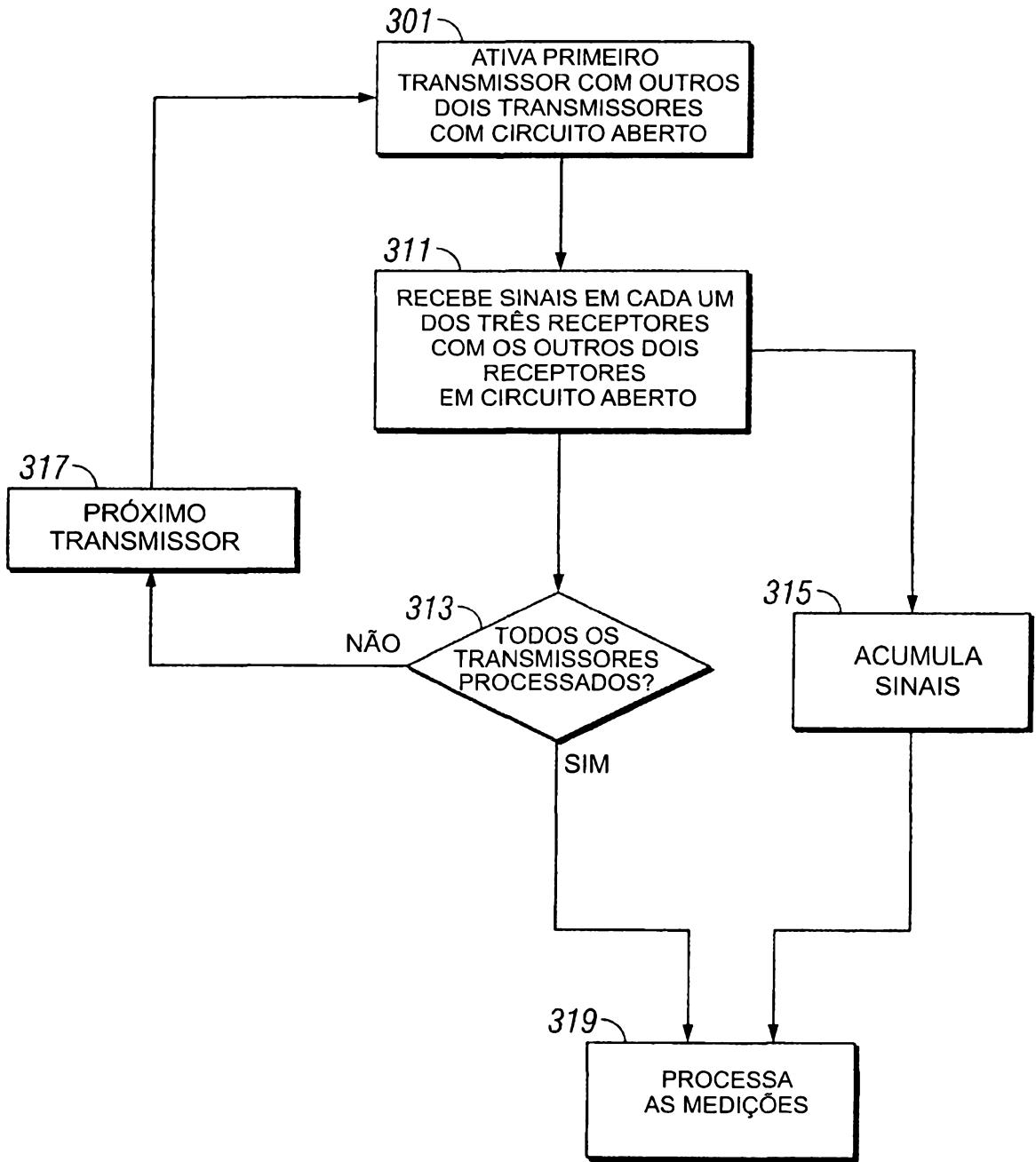


FIG. 6