



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

(11) PI 1100151-8 B1



(22) Data do Depósito: 22/02/2011

(45) Data de Concessão: 10/11/2020

(54) Título: MÉTODO PARA DETERMINAR UMA PROPRIEDADE DE FORMAÇÃO DE UMA FORMAÇÃO SUBTERRÂNEA

(51) Int.Cl.: G01N 22/02; H01Q 21/06.

(30) Prioridade Unionista: 18/02/2011 US 13/030,780; 23/02/2010 US 61/307,327.

(73) Titular(es): PRAD RESEARCH AND DEVELOPMENT LIMITED.

(72) Inventor(es): JEAN SEYDOUX; DZEVAT OMERAGIC; DEAN M. HOMAN.

(57) Resumo: MÉTODO PARA DETERMINAR UMA PROPRIEDADE DE FORMAÇÃO DE UMA FORMAÇÃO SUBTERRÂNEA, SISTEMA PARA DETERMINAR UMA PROPRIEDADE DE FORMAÇÃO DE UMA FORMAÇÃO SUBTERRÂNEA, E SISTEMA. A presente invenção está relacionada a um método para determinar uma propriedade de formação de uma formação subterrânea. Uma ferramenta de perfilagem de fundo de poço possuindo duas ou mais antenas, pelo menos, duas das antenas com um elemento transversalmente sensível e um elemento axialmente sensível é fornecida. As medições azimutalmente sensíveis são obtidas utilizando as antenas da ferramenta de perfilagem no interior do poços. As medições são ajustadas a uma série de Fourier possuindo coeficientes de Fourier que incluem os ganhos de canal, se houver. Um componente DC, um primeiro componente harmônico, e um segundo componente harmônico são determinados a partir da série de Fourier, um tipo de medição é determinada utilizando o componente DC, o primeiro componente harmônico, e/ou o segundo componente harmônico, e a propriedade de formação da formação subterrânea é determinada através do determinado tipo de medida.

MÉTODO PARA DETERMINAR UMA PROPRIEDADE DE FORMAÇÃO DE UMA FORMAÇÃO SUBTERRÂNEA

Fundamentos

Campo Técnico

5 A presente invenção está relacionada de modo geral com a perfilagem das formações subterrâneas em torno de um poço usando uma ferramenta de perfilagem no interior do poço, e particularmente a fazer medições direcionais para o estabelecimento do poço e avaliação da formação.

10 Técnica Relacionada

Ferramentas de perfilagem têm sido muito utilizadas em poços para fazer, por exemplo, medidas de avaliação da formação para inferir propriedades das formações em torno do furo e dos fluidos nas formações. Instrumentos comuns de
15 perfilagem incluem ferramentas eletromagnéticas, ferramentas nucleares e ferramentas de ressonância magnética nuclear (RMN), embora diferentes tipos de ferramentas sejam também usadas.

As primeiras ferramentas de perfilagem eram
20 baixadas ao interior do poço em um cabo de aço, após o poço ter sido perfurado. Versões modernas de tais ferramentas cabeadas ainda são usadas extensivamente. No entanto, a necessidade de informações durante a perfuração do poço deu

origem a ferramentas de medição durante perfuração (measurement-while-drilling - MWD) e ferramentas de perfilagem durante a perfuração (logging-while-drilling - LWD). As ferramentas MWD normalmente fornecem informações de perfuração de parâmetros como peso sobre a broca, o torque, temperatura, pressão, direção e inclinação. As ferramentas LWD normalmente fornecem as medidas de avaliação da formação, tais como resistividade, porosidade e distribuição de RMN. As ferramentas de MWD e LWD muitas vezes têm componentes que são comuns às ferramentas cabeadas (por exemplo, antenas de transmissão e recepção), mas as ferramentas de MWD e LWD devem ser construídas, não só para serem resistentes, mas também para operar no ambiente hostil da perfuração.

Em um modo de produzir medições eletromagnéticas LWD profundas, antenas triaxiais conduzidas em um 'sub' transmissor são usadas em conjunto com um receptor direcional (conduzido em um 'sub' receptor). O ângulo azimutal relativo entre os 'sub' contendo os transmissores e os 'sub' contendo o receptor geralmente não pode ser controlado quando os dois submarinos são construídos. Assim, o deslocamento azimutal entre as antenas do transmissor e receptor não é normalmente conhecido. Além disso, devido a limitações técnicas, as antenas triaxiais não são co-posicionadas. Essa é a concepção atual de

ferramentas utilizadas no ambiente LWD para fazer profundas direcionais eletromagnéticas profundas para o estabelecimento do poço e aplicações 1 eletromagnética medidas para o estabelecimento do poço e aplicações 5 eletromagnéticas antecipadas.

Sumário da Invenção

A presente invenção está relacionada a um tem para determinar uma propriedade de formação de uma formação subterrânea. Uma ferramenta de perfilagem de fundo de poço 10 tendo duas ou mais antenas, pelo menos, duas das antenas com um elemento transversal sensível e um elemento axial sensível é fornecido. Medições azimutalmente sensíveis são obtidas utilizando as antenas da ferramenta de perfilagem no interior do poço. As medições são montadas em uma série 15 de Fourier com coeficientes de Fourier, que incluem os ganhos do canal, se houver. Um componente DC, um primeiro componente harmônico, e um segundo componente harmônico são determinados a partir da série de Fourier, um tipo de medição é determinada utilizando o componente em DC, o 20 primeiro componente harmônico, e/ou segundo componente harmônico, e as propriedades de formação da formação subterrânea se determinam pelo tipo de medição determinada.

Outros aspectos e vantagens se tornarão evidentes a partir da descrição e das reivindicações apresentadas 25 adiante.

Breve Descrição das Figuras

A Figura 1 ilustra um sistema representativo em um local de poço.

A Figura 2 mostra uma ferramenta de perfilagem eletromagnética da técnica já existente.

A Figura 3 mostra esquematicamente antenas de uma ferramenta de medição de resistividade representativa possuindo antenas co-posicionadas com duas antenas do tipo bobina de sela e uma antena do tipo bobina axial, de acordo com a presente invenção.

A Figura 4 mostra esquematicamente um esboço de blindagem para uma co-posicionada antena do tipo bobina axial e do tipo bobina transversa dual, de acordo com a presente invenção.

A Figura 5 é uma representação de dipolo magnético de uma modalidade representativa de um único transmissor, receptor único, grupo de duas antenas, de acordo com a presente invenção.

A Figura 6 é uma representação de dipolo magnético de uma modalidade alternativa representativa de um único transmissor, receptor único, grupo de duas antenas, de acordo com a presente invenção.

A Figura 7 é uma representação de dipolo magnético de uma modalidade alternativa representativa de um único transmissor, receptor único, grupo de duas antenas, de acordo com a presente invenção.

A Figura 8 é uma representação de dipolo magnético de uma modalidade alternativa representativa de um único transmissor, receptor único, grupo de duas antenas com antenas inclinadas, de acordo com a presente invenção.

5 A Figura 9 é um diagrama de bobinas axiais e transversas ligadas em série, de acordo com a presente invenção. Um relé disjuntor duplo, de dupla posição, permite a troca da direção do momento magnético da bobina combinada azimutalmente em 180 graus.

10 A Figura 10 é uma representação de dipolo magnético de uma modalidade alternativa representativa de um único transmissor, receptor único, grupo de duas antenas com antenas inclinadas, de acordo com a presente invenção.

 A Figura 11 é uma representação de dipolo magnético
15 de uma modalidade alternativa representativa de um único transmissor, dois receptores, grupo de três antenas, de acordo com a presente invenção.

 A Figura 12 é uma representação de dipolo magnético de uma modalidade alternativa representativa de um único
20 transmissor, dois receptores, grupo de três antenas, de acordo com a presente invenção.

 A Figura 13 é uma representação de dipolo magnético de uma modalidade alternativa representativa de um transmissor dual, receptor dual, grupo de quatro antenas,
25 de acordo com a presente invenção.

A Figura 14 é uma representação de dipolo magnético de uma modalidade alternativa representativa de um transmissor dual, receptor dual, grupo de quatro antenas com bobinas ligadas em série, de acordo com a presente
5 invenção.

A Figura 15 é uma disposição esquemática para uma configuração de grupo de quatro antenas, de acordo com a presente invenção.

A Figura 16 mostra uma montagem representativa da
10 extremidade inferior da coluna de perfuração, de acordo com a presente invenção.

A Figura 17 orientações do momento magnético da antena inclinada correspondente à montagem da extremidade inferior da coluna de perfuração da Figura 16.

15 A Figura 18 mostra uma montagem representativa da extremidade inferior da coluna de perfuração, de acordo com a presente invenção.

A Figura 19 mostra uma montagem alternativa da extremidade inferior da coluna de perfuração, de acordo com
20 a presente invenção.

A Figura 20 mostra orientações do momento magnético da antena correspondente à montagem da extremidade inferior da coluna de perfuração da Figura 19.

A Figura 21 mostra uma aplicação representativa de
25 um dispositivo de medição em um colar próximo da broca com

um grupo de quatro antenas (para a compensação do poço), de acordo com a presente invenção.

A Figura 22 mostra uma implementação alternativa de um sistema raso de bobina sela/axial com uma combinação das
5 medições de avaliação da propagação na formação e múltiplos sistemas triaxiais de duas antenas com diferentes profundidades de investigação para mergulhos mais profundos e medições da anisotropia na avaliação da formação, de acordo com a presente invenção.

10 A Figura 23 mostra a configuração de antena usada para fins de simulação, de acordo com a presente invenção.

A Figura 24 é um conjunto de marcações que mostra a atenuação e o deslocamento de fase para uma medição da propagação transversa compensada no poço perfurado com uma
15 distância R1-R2 1 ft e um espaçamento TX de 3 ft (mergulho (Dip) = 0), de acordo com a presente invenção.

A Figura 25 é um conjunto de gráficos que mostra a medição da anisotropia harmônica (duas bobinas), com espaçamento 2,5 m (Dip = 0), de acordo com a presente
20 invenção.

A Figura 26 mostra uma configuração de indução por antena dual, de acordo com a presente invenção.

A Figura 27 mostra uma disposição eletrônica representativa para o dispositivo de medição do tipo
25 indução da Figura 26.

A Figura 28 mostra uma representativa ferramenta de resistividade tensora do tipo LWD, de acordo com a presente invenção.

A Figura 29 mostra uma representativa resposta de
5 ferramenta para uma formação no azimute zero versus mergulho e anisotropia, de acordo com a presente invenção.

Descrição Detalhada

Algumas modalidades serão agora descritas com referência às Figuras. Elementos semelhantes nas diversas
10 Figuras serão referidos com números iguais por questões de consistência. Na descrição apresentada adiante, vários detalhes são apresentados para fornecer uma compreensão das várias modalidades e/ou características. Todavia, será compreendido por aqueles usualmente versados na técnica que
15 algumas modalidades podem ser praticadas sem muitos desses detalhes e que numerosas variações ou modificações da modalidades descritas são possíveis. Como usado aqui, os termos "acima" e "abaixo", "para cima" e "para baixo", "superior" e "inferior", "ascendente" e "descendente", e
20 outros termos similares que indicam as posições relativas acima ou abaixo de um determinado ponto ou elemento são usados nesta descrição para descrever mais claramente certas modalidades. No entanto, quando aplicado a equipamentos e métodos para o uso em poços que são
25 desviados ou horizontal, tais termos podem se referir da

esquerda para a direita, da direita para a esquerda, ou relação em diagonal, conforme apropriado.

A figura 1 ilustra um sistema situado no local do poço em que várias modalidades podem ser empregadas. O local do poço também pode ser em terra ou no mar. Neste sistema representativo, um poço perfurado 11 é formado nas formações subterrâneas mediante perfuração rotativa em um modo que é bem conhecido. Algumas modalidades também pode usar perfuração direcional, como será descrito a seguir.

A coluna de perfuração 12 é suspensa no poço 11 e tem uma montagem da extremidade inferior da coluna de perfuração 100, que inclui uma broca 105 na sua extremidade inferior. O sistema de superfície inclui plataforma e inclui a superfície da plataforma e torre de montagem 10 posicionado sobre os 11 furos de sondagem, o conjunto 10, incluindo uma mesa rotativa 16, 'kelly' 17, gancho 18 e cabeça giratória ('swivel') 19. A coluna de perfuração 12 é girada pela mesa rotativa 16, energizado por meio não é mostrado, que empenna a 'kelly' 17 anos na extremidade superior da coluna de perfuração. A coluna de perfuração 12 é suspensa por um gancho 18, ligado a um bloco viajante, também conhecido como 'catarina' (também não mostrado), através do 'kelly' 17 e uma cabeça giratória 19 que permite a rotação da coluna de perfuração relativamente ao gancho. Como é bem conhecido, um sistema de acionamento de topo

(conhecido pela denominação 'top drive') pode ser alternativamente utilizado.

No exemplo desta modalidade, o sistema ainda inclui a superfície do fluido de perfuração ou lama 26 armazenados em um poço 27 formado no local do poço. Uma bomba 29 fornece o fluido de perfuração 26 para o interior da coluna de perfuração 12 através de uma porta no 'swivel' 19, fazendo com que o fluido de perfuração flua para baixo através da coluna de perfuração 12 como indicado pela seta direcional 8. O fluido de perfuração deixa a coluna de perfuração 12 através de portas na broca de perfuração 105, e em seguida recircula para cima através da região anular entre o lado externo da coluna de perfuração e as paredes do poço perfurado, como indicado pelas setas direcionais 9. Nesse modo bem conhecido, o fluido de perfuração lubrifica a broca de perfuração 105 e leva as lamas que são formadas, até a superfície de modo que elas são retornadas à cava 27 para recirculação.

A montagem da extremidade inferior da coluna de perfuração 100 da modalidade ilustrada inclui um módulo de perfuração do tipo 'LWD' 120, um módulo de perfuração do tipo 'MWD' 130, um sistema roto-direcionável e motor, e uma broca de perfuração 105.

O módulo 'LWD' 120 fica alojado em um tipo especial de colar de perfuração, como é conhecido na arte, e pode conter um ou uma pluralidade de tipos de ferramentas de

perfilagem conhecidas. Será também entendido que mais que um módulo do tipo LWD e/ou MWD pode ser empregado, por exemplo, como representado em 120A. (Referências, ao longo da descrição, a um módulo na posição 120 podem
5 alternativamente significar um módulo na posição 120A também). O módulo 'LWD' inclui capacidades de medição, processamento e armazenamento de informações, bem como para a comunicação com o equipamento de superfície. Na presente modalidade, o módulo do tipo LWD inclui um dispositivo de
10 medição de resistividade.

O módulo MWD 130 também está alojado em um tipo especial de colar de broca, como é conhecido na arte, e pode conter um ou mais dispositivos para medição das características da coluna de perfuração e a broca. A
15 ferramenta MWD ainda inclui um dispositivo (não mostrado) para gerar energia elétrica para o sistema de fundo de poço. Isso pode normalmente incluir um gerador de turbina de lama alimentado pelo fluxo do fluido de perfuração, sendo entendido que outros sistemas de alimentação e/ou de
20 baterias podem ser empregados. Na presente modalidade, o módulo MWD inclui um ou mais dos seguintes tipos de dispositivos de medição: um dispositivo de medição do peso sobre a broca, um dispositivo de medição do torque, um dispositivo de medição da vibração, um dispositivo de
25 medição dos choques, um dispositivo de medição do

encravamento/deslizamento um dispositivo de aferição do direcionamento, e um dispositivo de aferição da inclinação.

Um exemplo de uma ferramenta que pode ser a ferramenta LWD 120, ou pode ser parte de um conjunto de ferramentas 120A LWD, é mostrado na Figura 2. Como visto na figura 2, as antenas transmissoras superior e inferior, T1 e T2, tem antenas receptoras superior e inferior, R1 e R2, entre elas. As antenas são formadas nos recessos em um colar de perfuração modificado e montadas em um material isolante. O deslocamento de fase da energia eletromagnética entre os receptores fornece uma indicação da resistividade da formação, a uma profundidade relativamente superficial de investigação, e a atenuação da energia eletromagnética entre os receptores fornece uma indicação da resistividade da formação, a uma profundidade relativamente profunda de investigação. A Patente U.S. No. 4.899.112 pode ser referida para obter mais detalhes. Na operação, os sinais representativos de fase são acoplados a um processador, uma saída do qual é acoplável a um circuito de telemetria.

As recentes ferramentas de perfilagem eletromagnética utilizam uma ou mais antenas inclinadas ou transversas, com ou sem antenas axiais. A antena inclinada é um dipolo, cujo momento não é nem paralelo nem perpendicular ao eixo longitudinal da ferramenta. Uma antena transversa é uma cujo momento dipolo é substancialmente perpendicular ao eixo longitudinal da

ferramenta, e uma antena axial é uma cujo momento é substancialmente paralelo ao eixo longitudinal da ferramenta. Uma antena de triaxial é aquela em que três antenas (ou seja, bobinas de antena) são preparadas para
5 serem independentes entre si. Ou seja, o momento dipolo de qualquer uma das antenas não reside no plano formado pelos momentos dipolo das duas outras antenas. Três antenas ortogonais, com uma antena axial e as outras duas transversas, é um exemplo de uma antena triaxial. Duas
10 antenas são ditas terem ângulos iguais se seus vetores de momento dipolo interceptam o eixo longitudinal da ferramenta no mesmo ângulo. Por exemplo, duas antenas inclinadas possuem o mesmo ângulo de inclinação se seus vetores de momento dipolo, possuindo sua caudas
15 conceitualmente fixadas em um ponto do eixo longitudinal da ferramenta, se situam sobre a superfície de um cone circular reto centrado no eixo longitudinal da ferramenta e tendo o seu vértice naquele ponto de referência. As antenas transversas evidentemente possuem ângulos iguais de 90
20 graus, e isso é verdade, independentemente da sua orientação azimutal em relação à ferramenta.

Um projeto da antena possível inclui antenas axial e transversal. As antenas são enroladas ao longo do eixo axial da ferramenta de perfilagem e produzem um padrão de
25 radiação que é equivalente a um dipolo ao longo do eixo da ferramenta (direção z). As antenas transversas são de

escopo bobina de sela, por exemplo, como mostrado na Figura 3. As antenas transversas geram um padrão de radiação que é equivalente a um dipolo que é perpendicular ao eixo da ferramenta (x ou y direção). O projeto da bobina de sela das antenas transversas pode ser feito mediante enrolamento de fios sobre a superfície cilíndrica da ferramenta de medição, como mostrado no desenho e podem incluir ou uma bobina enrolada ou duas bobinas enroladas em lados opostos da superfície da ferramenta.

As antenas transversas pode ser feitas usando cabos individuais ou o trajeto dos fios pode ser feito em um circuito impresso flexível utilizando a tecnologia de circuito impresso com traços em cobre, prata, ou outro material condutor. Os circuitos impressos podem ser enrolados ao redor da superfície da ferramenta/recesso da antena na posição desejada, tal como descrito na Patente norte americana U.S. No. 6690170, a revelação da qual é aqui incorporada por referência. Múltiplas bobinas de sela podem ser feitas utilizando essa tecnologia nos mesmos circuitos impressos ou em diferentes circuitos impressos para diferentes orientações (por exemplo, x, y ou em qualquer outra direção). As bobinas de sela podem ser também unidas por fusão na forma de um plástico térmico ou embutidas em camadas introduzidas em ranhuras cortadas mecanicamente.

Em algumas aplicações, pode-se desejar circundar as antenas com uma blindagem que forneça proteção mecânica, permitindo a radiação eletromagnética a ser transmitida ou recebido com atenuação mínima. A blindagem pode ser um cilindro metálico com aberturas de corte, de modo a ficar perpendicular ao fio (ou traços de circuito impresso) para prever a desejada transparência eletromagnética. Este projeto é mostrado na Figura para uma implementação triaxial, onde triaxial se refere a uma antena axial (direcionada z) e duas antenas transversas (x, y). Note-se que as antenas não precisam estar dispostas. Alternativamente, a blindagem pode ser um cilindro não condutor incorporado com seções metálicas embutidas.

Em algumas aplicações, se pode querer usar as antenas transversal e axial em série (ou seja, excitá-las ao mesmo tempo). Nestes casos, a quantidade de energia elétrica que entra nas diferentes antenas e as fases relativas podem ser variadas para sintetizar os padrões de antenas das direções desejadas. Por exemplo, excitação e fase iguais de duas antenas ortogonais gera um padrão antena equivalente àquele de uma antena inclinada a 45 graus. Outras orientações angulares podem ser conseguidas com um conjunto antena bi-axial se cada antena estiver alimentada com uma diferente porcentagem da corrente total.

O escopo da bobina de sela não se limita às orientações X e Y. Na verdade, um projeto com mais de

quatro bobinas de sela pode ser construído, cada bobina de sela ficando azimutalmente distribuída em torno da circunferência do colar (membro ferramenta estrutural). Nesse caso, a blindagem que corresponderia a um padrão de fendas parecendo estrelas distribuídas de forma semelhante às bobinas. Para o caso de seis bobinas uniformemente distribuídas (ou seja, a cada 60 graus), seriam geradas três antenas transversas distribuídas de forma separadas azimutalmente a 120 graus. De forma similar, com oito bobinas distribuídas uniformemente (isto é, a cada 45 graus), seriam produzidas quatro antenas transversas, duas das quais poderiam estar alinhadas ao longo dos eixos enquanto que as outras duas ficariam alinhadas entre os eixos.

Uma configuração representativa de grupo de duas antenas é mostrada na Figura 5 com T1X e R1X como bobinas de sela transversas e T1Z e R1Z como bobinas axiais padrões. Cada um do grupo antena transmissora ou grupo antena receptora é um grupo XZ. Todavia, é evidente que o grupo pode ser um grupo YZ ou XY. Mantendo o mesmo ângulo entre as antenas, as bobinas irão fornecer a medição padrão de acoplamento ZZ enquanto que as bobinas transversas irão fornecer a medição transversa (XX). As co-posicionadas antenas transmissoras e receptoras podem ser também ligadas em série para se tornarem uma única antena inclinada (T1XZ e R1XZ).

Para uma ferramenta do tipo LWD rotativa em um ambiente de perfuração, as medições de tensão em função da orientação da ferramenta (face da ferramenta) dos pares únicos transmissor-receptor podem ser expressas como

5 funções dos acoplamentos básicos como a seguir. Nota, o componente transversal de tensão DC nas funções dos acoplamentos básicos como se segue. Nota, o componente transversal de tensão em DC é diretamente proporcional a

$$(XX + YY) / 2.$$

$$\begin{aligned}
 V(T_i^Z, R_j^Z) &= GT_{ij}^Z \cdot GR_j^Z \cdot ZZ_{ij} = V(T_i^Z, R_j^Z)^0 \\
 V(T_i^X, R_j^X) &= GT_{ij}^X \cdot GR_j^X \cdot \left(\frac{XX_{ij} + YY_{ij}}{2} + \frac{XX_{ij} - YY_{ij}}{2} \cdot \cos 2\varphi + \frac{XY_{ij} + YX_{ij}}{2} \sin 2\varphi \right) = V(T_i^X, R_j^X)^0 + V(T_i^X, R_j^X)^2 \cdot \cos(2\varphi + \varphi_0) \\
 V(T_i^Z, R_j^X) &= GT_{ij}^Z \cdot GR_j^X \cdot (\cos \varphi \cdot ZX_{ij} + \sin \varphi \cdot ZY_{ij}) = V(T_i^Z, R_j^X)^1 \cdot \cos(\varphi + \varphi_0) \\
 10 \quad V(T_i^X, R_j^Z) &= GT_{ij}^X \cdot GR_j^Z \cdot (\cos \varphi \cdot XZ_{ij} + \sin \varphi \cdot YZ_{ij}) = V(T_i^X, R_j^Z)^1 \cdot \cos(\varphi + \varphi_0)
 \end{aligned}$$

Onde GT_{ij}^{XZ} e GR_{ij}^{XZ} são os ganhos complexos do canal para o transmissor e receptor,

φ é a orientação da ferramenta,

φ_0 é o ângulo direcional, e

15 $V(T_i^{Z,X}, R_j^{Z,X})^{0,1,2}$ é o primeiro componente harmônico e segundo componente harmônico, em DC do ajuste.

Essas fórmulas expressam a relação entre os acoplamentos básicos e as medições da tensão do par único (amplitude e fase). As fórmulas também contêm os ganhos de canal que incluem ganhos eletrônicos e das áreas efetivas

20 de antena. Quando os ganhos de cada canal são conhecidos (medidos ou estimados), todos os acoplamentos básicos podem

ser solucionados para tal. Tendo solucionado para os acoplamentos básicos, as relações dos acoplamentos básicos como descrito na tabela abaixo podem ser medidos. Isto é, as relações dos acoplamentos básicos com melhorada 5 sensibilidade relativamente às características específicas da formação tais como anisotropia ou mergulho, podem ser calculadas. As relações da Tabela 1 são mostradas com a sua dependência de ganho.

Tabela 1

Tipo de medição	Definição	Geração
Direção Simetrizada	$\frac{ZZ - ZX}{ZZ + ZX} \cdot \frac{ZZ + XZ}{ZZ - XZ}$	$\frac{V(T_i^Z, R_j^Z)^0 - V(T_i^Z, R_j^X)^1 \cdot GR_j^Z / GR_j^X}{V(T_i^Z, R_j^Z)^0 + V(T_i^Z, R_j^X)^1 \cdot GR_j^Z / GR_j^X} \cdot \frac{V(T_i^Z, R_j^Z)^0 + V(T_i^X, R_j^Z)^1 \cdot GT_i^Z / GT_i^X}{V(T_i^Z, R_j^Z)^0 - V(T_i^X, R_j^Z)^1 \cdot GT_i^Z / GT_i^X}$
	$\frac{ZZ - ZX}{ZZ + ZX} \cdot \frac{ZZ - XZ}{ZZ + XZ}$	$\frac{V(T_i^Z, R_j^Z)^0 - V(T_i^Z, R_j^X)^1 \cdot GR_j^Z / GR_j^X}{V(T_i^Z, R_j^Z)^0 + V(T_i^Z, R_j^X)^1 \cdot GR_j^Z / GR_j^X} \cdot \frac{V(T_i^Z, R_j^Z)^0 - V(T_i^X, R_j^Z)^1 \cdot GT_i^Z / GT_i^X}{V(T_i^Z, R_j^Z)^0 + V(T_i^X, R_j^Z)^1 \cdot GT_i^Z / GT_i^X}$
	$\frac{2ZZ}{XX + YY}$	$\frac{V(T_i^Z, R_j^Z)^0 \cdot GT_i^X \cdot GR_j^X}{V(T_i^X, R_j^X)^0 \cdot GT_i^Z \cdot GR_j^Z}$
	$\frac{XX}{YY}$	$\frac{V(T_i^X, R_j^X)^0 + V(T_i^X, R_j^X)^2}{V(T_i^X, R_j^X)^0 - V(T_i^X, R_j^X)^2}$
Resistividade Harmônica		
Anisotropia de resistividade		

10

Para os tipos de medição acima, somente o canal de anisotropia de resistividade não exige medições da relação de ganho entre as antenas transversas e axiais. Todos os

outros tipos de medição requerem medições do transmissor e receptor. Para medir essas relações, uma terceira antena de 'loop' de teste único inclinada a 45 graus pode ser acrescentada à antena dual. Para medir a relação receptora, cada canal é processado usando esse 'loop' de teste como um "mini" transmissor. Para a relação de transmissão, esse 'loop' de teste atua como um "mini" receptor. Esse procedimento de 'loop' de teste pode ser realizado ou ao mesmo tempo das medições da voltagem de sinal ou como um procedimento de calibração antes da modalidade de ferramenta tipo LWD ser usada no interior do poço.

Alternativamente, um sinal de calibração que caracteriza ambos os canais receptores, mas não as variações da direção do momento (geometria) devido à antena, pode ser usado. Essas variações precisam ser medidas e precisam ser desprezíveis com respeito às especificações da medição. A corrente passante através das antenas TX podem ser medidas usando um circuito eletrônico comum, mas novamente, a variação da antena precisa ser caracterizada.

Uma terceira opção é usar um 'loop' de teste externo inclinado como um padrão que pode ser usado para excitar uma resposta da ferramenta e pode ser também modelado. A relação da resposta medida calculada relativamente ao 'loop' de teste inclinado pode ser usado novamente como uma correção de ganho. Ver, por exemplo, a

Patente norte americana U.S. No. 7414391, a divulgação da qual é aqui incorporada por referência.

Uma outra modalidade representativa de uma configuração de grupo de duas antenas é mostrada na Figura 5 6 com T1X, T1Y, R1X e R1Y como bobinas sela transversas e T1Z e R1Z como bobinas axiais padrões. Mantendo o mesmo ângulo entre as antenas, as bobinas axiais fornecerão a medição padrão de acoplamento ZZ, enquanto que as bobinas transversas fornecerão as medições transversas (XX) e (YY). 10 Nessa modalidade, os acoplamentos básicos podem ser medidos diretamente, sem a necessidade quanto a restrição da ferramenta. Um tal sistema é capaz de fornecer medições enquanto é deslizado para seu posicionamento. A capacidade de proporcionar tais medições durante seu deslizamento ao 15 seu posicionamento é importante quando motores de deslocamento positivo são usados. Nessa modalidade, o ganho dos canais individuais é preferivelmente medido ou avaliado através de calibração usando uma combinação de técnicas padrões tais como 'loops' de teste, caracterização de 20 temperaturas, e calibrações dos canais eletrônicos.

Um grupo emissor-receptor único não está limitado a uma configuração de antena XZ. Uma configuração tal como aquela mostrada na Figura 7 também pode ser usada. Esta modalidade inclui uma configuração de transmissor único, 25 receptor único com bobinas transmissoras X,Z, bobinas receptoras transversas X,Y, e uma bobina receptora Z. À

direita, o grupo transmissor é mostrado orientado azimutalmente com respeito ao grupo receptor através de um ângulo de alinhamento α . No caso de cada grupo antena residente em colares LWD separados (modular), um grupo pode ser orientado (azimutalmente) diferentemente com respeito ao outro grupo determinado por um ângulo de alinhamento. Nesse caso específico a dependência da voltagem complexa medida com respeito aos acoplamentos básicos são como a seguir.

$$\begin{aligned}
 V(T_i^Z, R_j^Z) &= GT_i^Z \cdot GR_j^Z \cdot ZZ_{ij} = V(T_i^Z, R_j^Z)^0 \\
 V(T_i^X, R_j^X) &= GT_i^X \cdot GR_j^X \cdot \left(\cos \alpha \cdot \frac{XX_{ij} + YY_{ij}}{2} - \sin \alpha \cdot \frac{XY_{ij} + YX_{ij}}{2} + \frac{XX_{ij} - YY_{ij}}{2} \cdot \cos 2\varphi + \frac{XY_{ij} + YX_{ij}}{2} \sin 2\varphi \right) = V(T_i^X, R_j^X)^0 + V(T_i^X, R_j^X)^2 \cdot \cos(2\varphi + \varphi_0) \\
 V(T_i^Z, R_j^X) &= GT_i^Z \cdot GR_j^X \cdot (\cos \varphi \cdot ZX_{ij} + \sin \varphi \cdot ZY_{ij}) = V(T_i^Z, R_j^X)^1 \cdot \cos(\varphi + \varphi_0) \\
 V(T_i^X, R_j^Z) &= GT_i^X \cdot GR_j^Z \cdot (\cos \varphi \cdot XZ_{ij} + \sin \varphi \cdot YZ_{ij}) = V(T_i^X, R_j^Z)^1 \cdot \cos(\varphi + \varphi_0)
 \end{aligned}$$

onde GT_{ij}^{XZ} e GR_{ij}^{XZ} são os ganhos complexos de canal para transmissor e receptor,

φ é a orientação da ferramenta, φ_0 é o ângulo direcional, e

$V(T_i^{ZX}, R_j^{ZX})^{012}$ é o primeiro componente harmônico, e segundo componente harmônico em DC do ajuste.

Nesse caso, a rotação da ferramenta pode ser usada para extrair o ângulo de alinhamento. Se não houver rotação, o ângulo de alinhamento deverá ser medido.

As antenas dual transmissora e receptora podem ser também usadas em série e atuar como uma antena inclinada em qualquer direção, como mostrado na Figura 8. Um único grupo

transmissor e receptor pode ter suas antenas combinadas (hardware ou software) em série para produzir qualquer direção desejada. A combinação pode também se estender a um sistema de 3 bobinas (XYZ), onde YZ ou XY também podem ser combinadas em série. Uma implementação de hardware para uma 5 antena inclinada de 45 graus pode exigir que ambos os momentos magnéticos X e Z sejam da mesma amplitude momentos magnéticos ser de mesma amplitude (isto é, a relação do número de voltas entre as antenas deve ser determinada para 10 conseguir uma orientação desejada). Também, as antenas receptoras dual podem ser ligadas em série reversa para produzir um momento inclinado com rotação azimutal de 180 graus, como representado por $R1XZ_{down}$ (ver Figuras 8 e 9). As voltagens recebidas podem ser expressas como a seguir 15 para antenas inclinadas em série.

$$V(T_i^{XZ}, R_j^{XZ}) = GT_i^{XZ} \cdot GR_j^{XZ} \cdot \left(ZZ_{\psi} + \frac{XX_{\psi} + YY_{\psi}}{2} + \cos \phi \cdot (ZX_{\psi} + XZ_{\psi}) + \sin \phi \cdot (ZY_{\psi} + YZ_{\psi}) + \frac{XX_{\psi} - YY_{\psi}}{2} \cdot \cos 2\phi + \frac{XY_{\psi} + YX_{\psi}}{2} \sin 2\phi \right)$$

$$V(T_i^{XZ}, R_j^{XZ_{down}}) = GT_i^{XZ} \cdot GR_j^{XZ} \cdot \left(ZZ_{\psi} - \frac{XX_{\psi} + YY_{\psi}}{2} + \cos \phi \cdot (ZX_{\psi} - XZ_{\psi}) + \sin \phi \cdot (ZY_{\psi} + YZ_{\psi}) - \frac{XX_{\psi} - YY_{\psi}}{2} \cdot \cos 2\phi - \frac{XY_{\psi} + YX_{\psi}}{2} \sin 2\phi \right)$$

onde GT_i^{XZ} , é o ganho complexo de canal e ϕ é a orientação da ferramenta.

Com essa combinação de par de antena, todos os 20 acoplamentos são disponíveis (rotação é exigida) e não irão requerer qualquer calibração. As fórmulas para a geração da medição são mostradas na Tabela 2. Como uma nota, os ganhos de canal para TX e RCV não inclui qualquer variação

possível relacionada com a direção do momento magnético da antena devido à temperatura e pressão. Uma caracterização é necessária para validar esse efeito, mas esses efeitos são esperados serem desprezíveis.

5

Tabela 2

Tipo de medição	Definição	Geração
Direção	$\frac{ZZ - ZX}{ZZ + ZX} \cdot \frac{ZZ + XZ}{ZZ - XZ}$	$\frac{V(T_i^{XZ}, R_j^{XZ})^0 + V(T_i^{XZ}, R_j^{XZ_{down}}) - \left(V(T_i^{XZ}, R_j^{XZ})^1 + V(T_i^{XZ}, R_j^{XZ_{down}})^1 \right)}{V(T_i^{XZ}, R_j^{XZ})^0 + V(T_i^{XZ}, R_j^{XZ_{down}}) + \left(V(T_i^{XZ}, R_j^{XZ})^1 + V(T_i^{XZ}, R_j^{XZ_{down}})^1 \right)}$
Simetrizada		$\frac{V(T_i^{XZ}, R_j^{XZ})^0 + V(T_i^{XZ}, R_j^{XZ_{down}}) + \left(V(T_i^{XZ}, R_j^{XZ})^1 - V(T_i^{XZ}, R_j^{XZ_{down}})^1 \right)}{V(T_i^{XZ}, R_j^{XZ})^0 + V(T_i^{XZ}, R_j^{XZ_{down}}) - \left(V(T_i^{XZ}, R_j^{XZ})^1 - V(T_i^{XZ}, R_j^{XZ_{down}})^1 \right)}$
Direcional	$\frac{ZZ - ZX}{ZZ + ZX} \cdot \frac{ZZ - XZ}{ZZ + XZ}$	$\frac{V(T_i^{XZ}, R_j^{XZ})^0 + V(T_i^{XZ}, R_j^{XZ_{down}}) - \left(V(T_i^{XZ}, R_j^{XZ})^1 + V(T_i^{XZ}, R_j^{XZ_{down}})^1 \right)}{V(T_i^{XZ}, R_j^{XZ})^0 + V(T_i^{XZ}, R_j^{XZ_{down}}) + \left(V(T_i^{XZ}, R_j^{XZ})^1 + V(T_i^{XZ}, R_j^{XZ_{down}})^1 \right)}$
Anti-Simetrizada	$\frac{2ZZ}{XX + YY}$	$\frac{V(T_i^{XZ}, R_j^{XZ})^0 + V(T_i^{XZ}, R_j^{XZ_{down}})^0}{V(T_i^{XZ}, R_j^{XZ})^0 - V(T_i^{XZ}, R_j^{XZ_{down}})^0}$
	$\frac{XX}{YY}$	$\frac{V(T_i^{XZ}, R_j^{XZ})^0 - V(T_i^{XZ}, R_j^{XZ_{down}})^0 + V(T_i^{XZ}, R_j^{XZ})^2}{V(T_i^{XZ}, R_j^{XZ})^0 - V(T_i^{XZ}, R_j^{XZ_{down}})^0 - V(T_i^{XZ}, R_j^{XZ})^2}$
Resistividade Harmônica		
Anisotropia de resistividade		

Embora possuir uma combinação das bobinas em série implementada em hardware seja desejável por questões de simplicidade dos dispositivos eletrônicos, (menor quantidade de canais necessária e ausência de calibração), as medições do par de bobina pode ser também conseguida

10

individualmente e uma combinação realizada como parte de um algoritmo ou procedimento de software.

Da mesma forma, no caso de uma configuração XYZ e com diferentes combinações de XZ e YZ em série e um ângulo de alinhamento α , as fórmulas seguintes envolvendo combinações de $R1XZ_{up}$ e $R1XZ_{down}$ podem ser usadas para obter o acoplamento ZZ pela adição de ambas as medições (termo DC) e para obter os termos $(XX+YY)/2$ e $(XY-YX)/2$ consubstanciados por $\cos\alpha$ e $\sin\alpha$ a partir das medições usando o termo DC se duas outras medições são usadas (por exemplo, $R1XY_{left}$ e $R1XY_{right}$), permitindo a resolução para ângulo α , ZZ, $(XX+YY)/2$ e $(XY-YX)/2$ a partir de quatro equações.

$$V_{RXZup} = \frac{ZZ}{2} \frac{(XY+YX)}{2} \cos\alpha + \frac{(XY-YX)}{2} \sin\alpha \cos\alpha \cos\alpha + \frac{(XY+YX)}{2} \cos\alpha + \frac{(XY-YX)}{2} \sin\alpha \cos\alpha$$

$$V_{RXZdown} = \frac{ZZ}{2} \frac{(XY+YX)}{2} \cos\alpha - \frac{(XY-YX)}{2} \sin\alpha \cos\alpha \cos\alpha - \frac{(XY+YX)}{2} \cos\alpha - \frac{(XY-YX)}{2} \sin\alpha \cos\alpha$$

Uma configuração de grupo de três antenas é mostrado na Figura 11 com T1X, R1X e R2X como bobinas de sela transversas e T1Z, R1Z e R2Z como bobinas axiais padrões. Cada um do grupo de antenas transmissoras ou grupo de antenas receptoras é um XZ. Todavia, é evidente que o grupo pode ser, alternativamente, um YZ ou XY. Mantendo o mesmo ângulo entre as antenas, as bobinas axiais irão fornecer a medição de propagação ZZ padrão, enquanto que as

bobinas transversas irão fornecer a medição da propagação transversa (XX). Com essa configuração, as medições de atenuação transversa e de deslocamento de fase podem ser geradas de acordo com as fórmulas abaixo, onde a fórmula transversa usa os termos DC ($\bar{V}$) mas sem a característica compensada ao furo de poço (discutida adiante). Uma fórmula similar pode ser também gerada com base em (XX-YY)/2. Note que, neste caso, os ganhos do canal receptor precisam ser conhecidos.

$$ATT_{ZZ} \text{ and } PS_{ZZ} = \frac{GR_1^Z \cdot V(T_1^Z, R_1^Z)}{GR_2^Z \cdot V(T_1^Z, R_2^Z)}, \text{ e}$$

$$ATT_{XX} \text{ and } PS_{XX} = \frac{GR_1^X \cdot V(T_1^X, R_1^X)^0}{GR_2^X \cdot V(T_1^X, R_2^X)^0}, \text{ onde } ^0 \text{ representa o termo DC.}$$

Uma configuração de grupo de três antenas é mostrado na Figura 12 com T1X, T1Y, R1X, R1Y e R2X, R2Y como bobinas de sela transversas e T1Z, R1Z e R2Z como bobinas axiais padrões. Mantendo o mesmo ângulo entre as antenas, as bobinas axiais irão fornecer as medições de acoplamento ZZ padrões, enquanto que as bobinas transversas irão fornecer as medições transversas (XX) e (YY). Nessa configuração, considerando as medições calibradas, o acoplamento básico completo ZT1R1 ZT1R2 pode ser medido e uma relação generalizada ZT1R1/ ZT1R2 pode ser construída. Esta relação generalizada também pode ser calculada com o sistema antena XZ (explicado acima) quando a rotação também

é utilizada. Diferentes combinações de bobinas em série (ZX, YZ, XY) podem ser usadas de forma semelhante ao descrito acima para gerar uma medida similar com a vantagem de serem calibradas.

5 Uma configuração de antena dual representativa é mostrada na Figura 13 com T1X, R1X, R2X e T2X como bobinas de sela transversas e T1Z, R1Z, R2Z e T2Z como bobinas axiais padrões. Mantendo o mesmo ângulo entre as antenas, as bobinas axiais irão fornecer medição padrão da
10 propagação de acoplamento ZZ, enquanto as bobinas transversas proporcionarão a medição da propagação transversa (XX). As antenas receptoras co-posicionadas podem ser também ligadas em série para se tornarem uma antena inclinada única (R1XZ e R2XZ). A correspondente
15 combinação em série para o transmissor é possível mas pode exigir que um terceiro circuito de ajuste seja acrescentado.

A atenuação axial e transversa do furo de poço e as medições de deslocamento de fase podem ser geradas de
20 acordo com as fórmulas onde a fórmula transversa utiliza os termos DC $(\bar{V})$. Uma fórmula similar pode ser também gerada com base em $(XX-YY)/2$.

$$ATT_{ZZ} \text{ and } PS_{ZZ} = \frac{V(T_1^Z, R_1^Z)}{V(T_1^Z, R_2^Z)} \cdot \frac{V(T_2^Z, R_2^Z)}{V(T_2^Z, R_1^Z)}, \text{ e}$$

$$ATT_{xx} \text{ and } PS_{xx} = \frac{V(T_1^x, R_1^x)^0}{V(T_1^x, R_2^x)^0} \cdot \frac{V(T_2^z, R_2^z)^0}{V(T_2^x, R_1^x)^0}, \text{ onde } ^0 \text{ representa o termo DC.}$$

Essas medições fornecem medições da anisotropia da
 5 avaliação da formação calibrada padrão tanto em poços
 verticais e horizontais, mas não possuem qualquer
 direcionalidade. A medição axial compensada do poço permite
 a determinação da anisotropia da resistividade quando em
 poços de altos ângulos, mas não em poços quase verticais
 10 (onde o alto ângulo ou poço quase vertical se refere à
 orientação relativa da anisotropia e o eixo da ferramenta).

A configuração de grupo de quatro antenas pode ser
 também ligada em uma série em um modo similar como descrito
 acima. Em uma tal implementação, a mesma medição de
 15 compensação axial e transversa do poço pode ser construída,
 mas com apenas a metade dos canais, como mostrado na Tabela
 3.

Tabela 3

Tipo de medição	Definição	Geração
Propagação axial padrão	ATTzz,PSzz	BHCusing $ZZ_y = V(T_i^{xz}, R_j^{xz})^0 + V(T_i^{xz}, R_j^{xz_{down}})^0$
Propagação transversa padrão	ATTxx,PSxx	BHC using $\frac{XX_y + YY_y}{2} = V(T_i^{xz}, R_j^{xz})^0 - V(T_i^{xz}, R_j^{xz_{down}})^0$

O impacto da eletrônica para uma aplicação transversal e axial é mostrado na Figura 15. Os bolsos adicionais e placa TX não devem mudar significativamente o chassis do 'sub' TX. Note que a implementação da configuração de série axial transversa reduz pela metade o número de bolsos.

A montagem da extremidade inferior da coluna de perfuração (BHA) mostrada por exemplo, na Figura 16 é uma modalidade da configuração antena discutida acima. Nessa BHA, antenas inclinadas fornecem uma medição com um mergulho de investigação para detectar a resistividade e contorno usando o contraste de resistividade da formação em torno e à frente da broca. O sistema de antena permite um olhar ao redor e olhar em frente com a posição da bobina TX o mais próximo possível da broca. Antenas co-posicionadas sela/axial próximas da broca fornecem uma medição da resistividade direcional superficial. A Figura 17 mostra as

correspondentes orientações do momento magnético da antena. Os receptores inclinados podem ser co-posicionados, mas não exigidos serem co-posicionados. O sistema bobina sela/axial raso é mostrado imediatamente acima do transmissor inclinado. A Figura 18 mostra um exemplo de uma implementação em um colar próximo da broca com um grupo quatro antenas (para compensação do furo de poço). Note que a última antena é uma antena inclinada padrão.

A BHA mostrada na Figura 19 é uma modalidade alternativa da configuração de antena discutido acima. Nesta modalidade, antenas co-posicionadas sela/axial fornecem uma medição com uma profundidade da investigação para detectar a resistividade e contorno usando o contraste de resistividade da formação em torno e à frente da broca. Como antes, antenas co-posicionadas de sela/axial próximas da broca proporcionam uma resistividade direcional superficial FE. A correspondente orientação do momento magnético da antena co-posicionada de sela/axial são mostrados na Figura 20. O transmissor pode ser uma bobina inclinada ou um sistema de bobina co-posicionada sela/axial (acionado em série ou acionada individualmente). O sistema bobina sela/axial superficial é mostrado imediatamente acima do transmissor inclinado nesse sistema. A Figura 21 mostra um exemplo de uma aplicação em um colar próximo da broca com um grupo de quatro antenas (para a compensação do poço). Note que a última o último antena perto do bit é

também uma sela/sistema de antena axial co-localizados, em vez de uma antena inclinada (usada para medições de profundidade). Figura 22 mostra uma outra possível implementação de um selim raso/sistema de bobina axial com uma combinação de avaliação da formação de propagação 5 medições e múltiplos sistemas triaxiais de duas antenas com diferentes profundidades de investigação para aprofundar o mergulho e as medidas de formação de avaliação da anisotropia.

10 Uma medição da resistividade superficial próxima da broca melhora significativamente os resultados de uma inversão da visão para frente. Nessa inversão, pelo uso de uma condição de visão ao redor (isto é, pelo uso de medições mais superficiais), a visão para frente é 15 melhorada uma vez que a sensibilidade da medição é principalmente de visão ao redor com alguma visão para frente. A visão para frente permite a avaliação do perfil da resistividade (subida) e a detecção de um contato óleo-água (OWC). Um espaçamento maior (por exemplo, 30,5 m (100 20 ft)) combinado com uma resistividade superficial próximo da broca oferece a melhor sensibilidade para a subida e o OWC adiante da broca. A visão para frente também permite a detecção de uma camada delgada adiante da broca.

Um estudo foi conduzido usando a inversão 25 paramétrica com vistas ao efeito do conhecimento da anisotropia da formação (sensor de resistividade

superficial que mede anisotropia) versus o desconhecimento da anisotropia. O consenso geral é que o produto resposta com uma medição da resistividade superficial anisotrópica é qualitativamente melhor, mas não significativamente melhor.

5 Tipicamente, a anisotropia das camadas superiores é resolvida como a anisotropia global. Espera-se que em vez de usar uma anisotropia global, a inversão seja melhorada ao incluir as informações de anisotropia encontradas abaixo do ponto de medição do sensor de resistividade em uma
10 profundidade de medição anterior.

Para propósitos de simulação, a configuração de antena mostrada na Figura 23 foi utilizada. Todas as medidas são apresentadas em relação a uma formação isotrópica. A sensibilidade para a resolução para as
15 propagações transversas e o canal de resistividade da anisotropia harmônica HRA, $P = Z/(XX + YY)/2$ são mostrados na Figura 24 e Figura 25, respectivamente, para uma situação de mergulho zero. As marcações HRA e HRP têm uma melhor resolução como uma função da anisotropia, mas a
20 precisão dessa medição é esperada ser menor que a medição da propagação padrão. Adicionalmente, a dependência com respeito à anisotropia e mergulho pode não ser necessariamente um valor simples, diferentemente das medições HRA e HRP. Em ambas as medições, a dispersão
25 global das diferentes curvas de mergulho como uma função da anisotropia permite que se diferencie e isole o efeito da

anisotropia e de mergulho. Em resistividades maiores, a dependência da anisotropia é especialmente fraca.

Uma configuração de indução de antena dual é mostrada na Figura 26 com T1X, R1X, R2X e T2X como bobinas de sela transversas e T1Z, R1Z, R2Z e T2Z como bobinas axiais padrões. Nesta implementação, as bobinas receptoras são ligadas em série, de modo a eliminar o acoplamento direto do transmissor e produz uma dependência quase linear com respeito à condutividade. Em uma modalidade, os sistemas eletrônicos para a implementação de indução triaxial necessitarão de uma placa transmissora de acionamento de corrente, uma placa receptora, e uma placa de calibração, como mostrado na Figura 27.

Podemos medir o tensor da condutividade aparente σ_{app}^k para o k-ésimo espaçamento e inverter um modelo terrestre de camada de mergulho 1D para R_h, R_v, dip_k, azi_k , ou espessura de leito. Isso é simbolicamente mostrado por:

$$\sigma_{app}^k = \begin{pmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz} \end{pmatrix} \rightarrow Inversion(R_h, R_v, dip, azi, h).$$

A calibração da ferramenta de resistividade triaxial ou tensor pode ser mostrado para o transmissor i-ésimo transmissor, o j-ésimo receptor, e o k-ésimo espaçamento funcionalmente como:

$$\sigma_{ijk}^{app} = g^{elec}(T_e) g_{ijk}^{TTL} (\sigma_{ijk}^{meas} - \sigma_{ijk}^{SEC}(T_a)).$$

onde σ_{ijk}^{app} é a condutividade aparente complexa calibrada e g_{ijk}^{TTL} é a correção de ganho definida para um 'loop' de teste inclinado de referência modelada e dado por:

$$g_{ij}^{TTL} = \frac{|\sigma_{ijk}^{TTLRef}|}{|\sigma_{ijk}^{TTLMeas}|}.$$

5

A correção de base $\sigma_{ijk}^{SEC}(T)$ é dada por:

$$\sigma_{ijk}^{SEC}(T) = \frac{\eta_{jk} V_{jk}^{SEC}}{K_{ijk} I_1}.$$

Uma modalidade de uma ferramenta de resistividade tensor LWD é mostrado na Figura 28. Uma típica resposta de 10 ferramenta para uma formação em azimuth zero versus mergulho e anisotropia é mostrado na Figura 29.

Para a completitude a fórmula de acoplamento básico como um função da rotação é mostrada adiante.

Rotação da matriz de acoplamento básico $M(\phi)$.

15

$$\begin{aligned} M(\phi) &= \begin{bmatrix} \cos\phi & \sin\phi & 0 \\ -\sin\phi & \cos\phi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} XX & XY & XZ \\ YX & YY & YZ \\ ZX & ZY & ZZ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\phi & -\sin\phi & 0 \\ \sin\phi & \cos\phi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \cos\phi & \sin\phi & 0 \\ -\sin\phi & \cos\phi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\phi \cdot XX + \sin\phi \cdot XY & -\sin\phi \cdot XX + \cos\phi \cdot XY & XZ \\ \cos\phi \cdot YX + \sin\phi \cdot YY & -\sin\phi \cdot YX + \cos\phi \cdot YY & YZ \\ \cos\phi \cdot ZX + \sin\phi \cdot ZY & -\sin\phi \cdot ZX + \cos\phi \cdot ZY & ZZ \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \cos^2\phi \cdot XX + \sin\phi \cdot \cos\phi \cdot XY + \sin\phi \cdot \cos\phi \cdot YX + \sin^2\phi \cdot YY & -\sin\phi \cdot \cos\phi \cdot XX + \cos^2\phi \cdot XY - \sin^2\phi \cdot YX + \sin\phi \cdot \cos\phi \cdot YY & \cos\phi \cdot XZ + \sin\phi \cdot YZ \\ -\sin\phi \cdot \cos\phi \cdot XX - \sin^2\phi \cdot XY + \cos^2\phi \cdot YX + \sin\phi \cdot \cos\phi \cdot YY & \sin^2\phi \cdot XX - \sin\phi \cdot \cos\phi \cdot XY - \sin\phi \cdot \cos\phi \cdot YX + \cos^2\phi \cdot YY & -\sin\phi \cdot XZ + \cos\phi \cdot YZ \\ \cos\phi \cdot ZX + \sin\phi \cdot ZY & -\sin\phi \cdot ZX + \cos\phi \cdot ZY & ZZ \end{bmatrix} \end{aligned}$$

com

$$\cos^2 \phi = \frac{1}{2} \cdot (1 + \cos 2\phi), \sin^2 \phi = \frac{1}{2} \cdot (1 - \cos 2\phi), \sin \phi \cdot \cos \phi = \frac{1}{2} \cdot \sin 2\phi$$

e a voltagem é dada por:

Voltagem entre par TX e RCV $V(\phi)$

5

$$V(\phi) = \vec{M}_R \cdot \begin{bmatrix} \frac{XX+YY}{2} + \frac{XX-YY}{2} \cdot \cos 2\phi + \frac{XY+YX}{2} \sin 2\phi & \frac{XY-YX}{2} + \frac{XY+YX}{2} \cdot \cos 2\phi - \frac{XX-YY}{2} \sin 2\phi & \cos \phi \cdot XZ + \sin \phi \cdot YZ \\ \frac{XY-YX}{2} + \frac{XY+YX}{2} \cdot \cos 2\phi - \frac{XX-YY}{2} \sin 2\phi & \frac{XX+YY}{2} - \frac{XX-YY}{2} \cdot \cos 2\phi + \frac{XY+YX}{2} \sin 2\phi & -\sin \phi \cdot XZ + \cos \phi \cdot YZ \\ \cos \phi \cdot ZX + \sin \phi \cdot ZY & -\sin \phi \cdot ZX + \cos \phi \cdot ZY & ZZ \end{bmatrix} \cdot \vec{M}_T^{\text{transpos}}$$

onde $\vec{M}_R$ e $\vec{M}_T$ são então momentos magnéticos para TX e RCV

Deve-se apreciar que, embora a invenção tenha sido descrita com respeito a um número limitado de modalidades, aqueles hábeis na arte, tendo benefícios dessa divulgação, 10 irão perceber que outras modalidades podem ser concebidas, que não se afastem do âmbito de aplicação da invenção, tal como indicado aqui. Assim, o escopo da invenção deve ser limitado somente pelas reivindicações em anexo.

- REIVINDICAÇÕES -

1. MÉTODO PARA DETERMINAR UMA PROPRIEDADE DE FORMAÇÃO DE UMA FORMAÇÃO SUBTERRÂNEA, caracterizado por compreender:

5 fornecer uma ferramenta de perfilagem ao longo da extensão do poço possuindo duas ou mais antenas, em que pelo menos uma das duas ou mais das antenas é uma antena multiaxial, compreendendo:

 um primeiro componente de antena transversa
10 disposto como um primeiro par de bobinas de sela diametralmente opostas possuindo um elemento transversalmente sensível que é sensível em uma direção transversa para um eixo longitudinal da ferramenta de perfilagem ao longo da extensão do poço, em que o primeiro
15 componente de antena possui um momento dipolo que é substancialmente perpendicular ao eixo longitudinal; e

 um componente de antena axial como uma bobina enrolada em torno de um corpo da ferramenta de perfilagem ao longo da extensão do poço e possuindo um
20 elemento axialmente sensível que é sensível na direção do eixo longitudinal, em que o componente de antena axial possui um momento dipolo que é substancialmente paralelo ao eixo longitudinal;

 obter medições azimutalmente sensíveis usando as
25 antenas da ferramenta de perfilagem ao longo da extensão do poço;

ajustar as medições a uma série de Fourier possuindo coeficientes de Fourier que incluem ganhos de canal;

determinar um componente DC, um primeiro
5 componente harmônico, e um segundo componente harmônico a partir das séries de Fourier;

determinar um tipo de medição usando o componente DC, o primeiro componente harmônico e/ou o segundo componente harmônico, o tipo de medição compreendendo
10 medições de componente cruzado simetrizadas, medições de componente cruzado anti-simetrizadas, medições de resistividade harmônica e/ou anisotropia de resistividade;
e

determinar a propriedade de formação da formação
15 subterrânea usando o determinado tipo de medição, em que o componente DC é diretamente proporcional a $(XX + YY)/2$, e em que X é representativo de um eixo transversal e Y é representativo de um eixo perpendicular ao eixo transversal, e em que XX e YY representam medições transversas
20 fornecidas pelo primeiro par de bobinas de sela.

2. Método, de acordo com a reivindicação 1, caracterizado por a obtenção de medições azimutalmente sensíveis compreender a transmissão e a recepção do sinal eletromagnético transmitido numa certa frequência, ou a
25 transmissão e a recepção de uma pluralidade de sinais eletromagnéticos, cada um dos sinais eletromagnéticos sendo

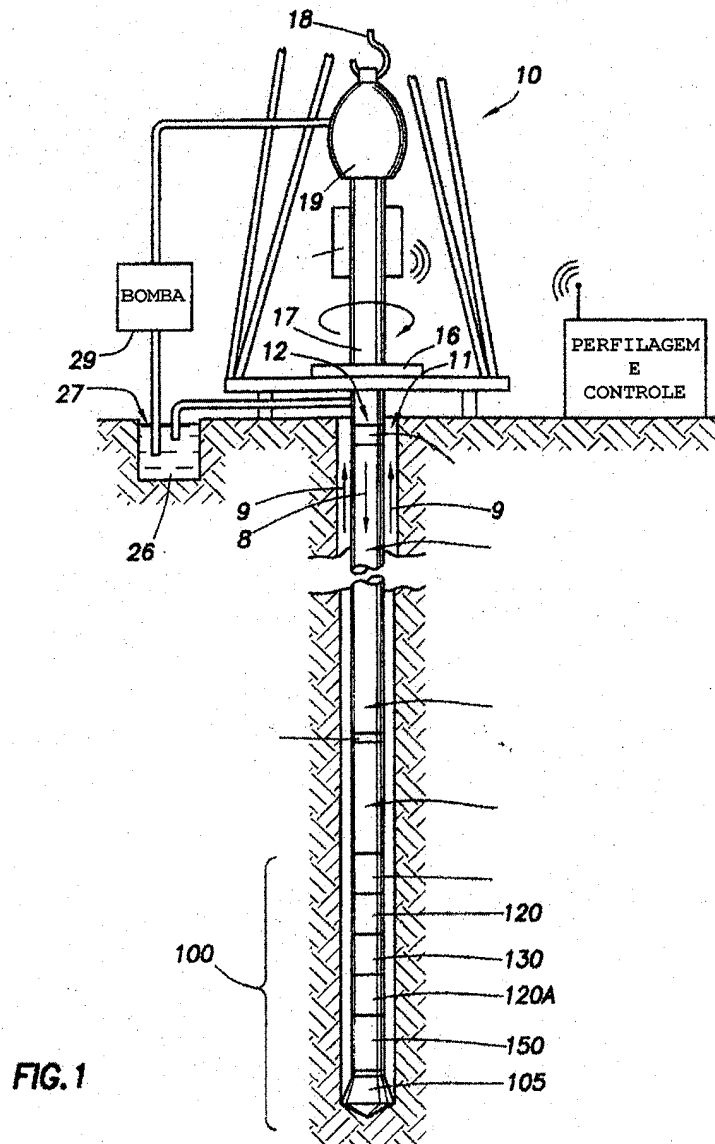
transmitidos em frequências diferentes.

3. Método, de acordo com a reivindicação 1 ou 2, caracterizado por as medições azimutalmente sensíveis serem obtidas enquanto a ferramenta de perfilagem ao longo da
5 extensão do poço está girando ou deslizando.

4. Método, de acordo com qualquer uma das reivindicações 1 a 3, caracterizado por o elemento transversalmente sensível de uma antena particular ser ligado em série com o elemento axialmente sensível da
10 antena particular e um relé disjuntor duplo, de dupla posição, para produzir uma bobina combinada, e o método adicionalmente compreendendo a comutação da direção do momento magnético da bobina combinada azimutalmente em 180 graus.

15 5. Método, de acordo com qualquer uma das reivindicações 1 a 4, caracterizado por as duas ou mais antenas compreenderem um grupo de quatro antenas simétrico, e o método adicionalmente compreender realizar a compensação do furo de poço sobre as medições.

20 6. Método, de acordo com a reivindicação 1, caracterizado por adicionalmente compreender usar a determinada propriedade de formação para estabelecimento do poço, avaliação da formação, e/ou operações de olhar em frente, olhar ao redor.



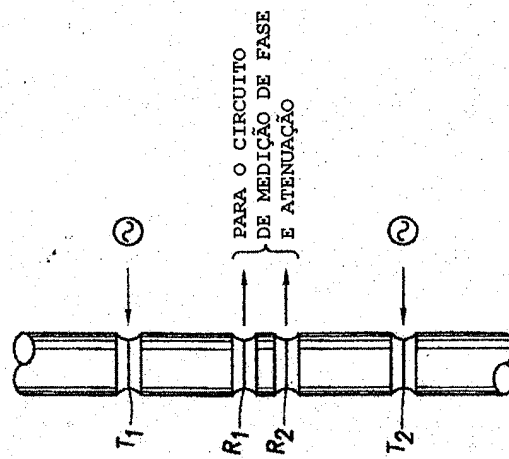


FIG. 2
(Técnica Anterior)

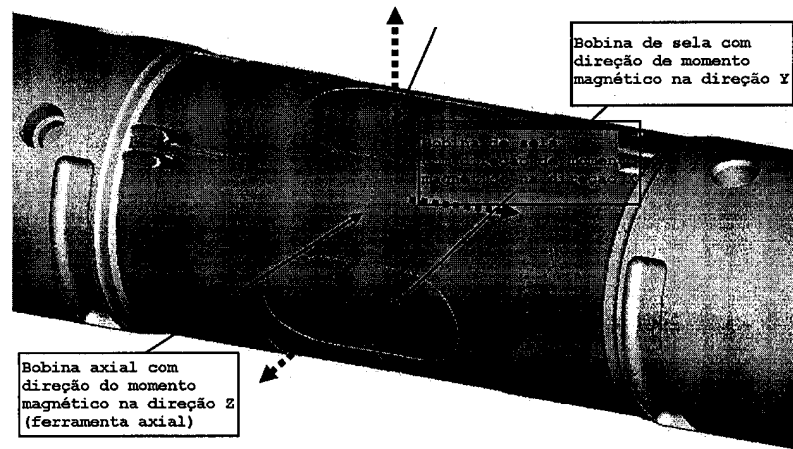


Fig. 3

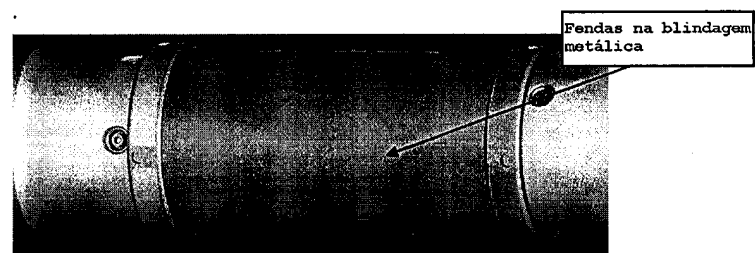


Fig. 4

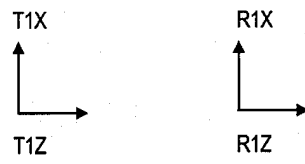


Fig. 5

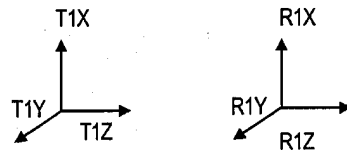


Fig. 6

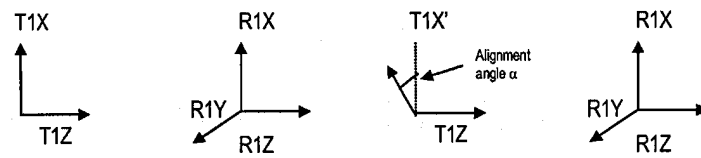


Fig. 7

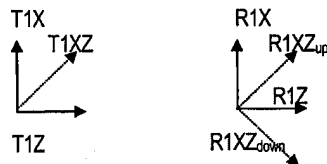


Fig. 8

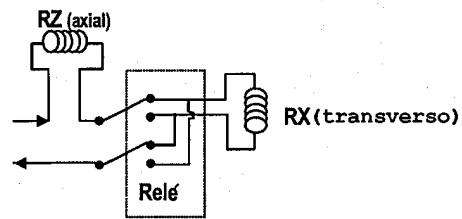


Fig. 9

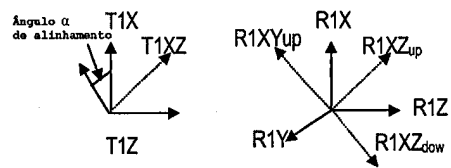


Fig. 10

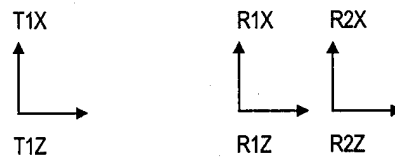


Fig. 11

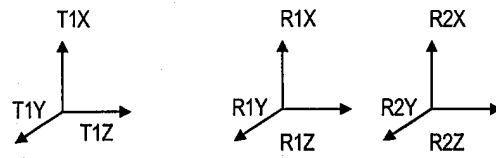


Fig. 12

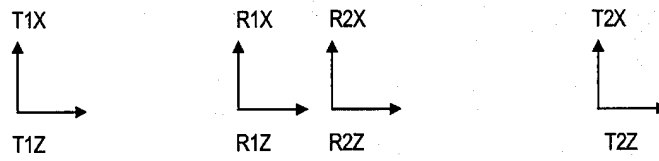


Fig. 13

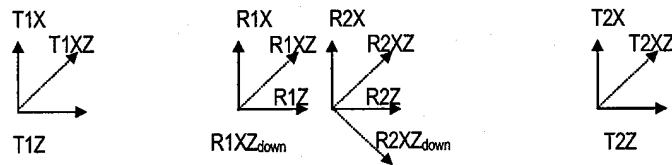


Fig. 14

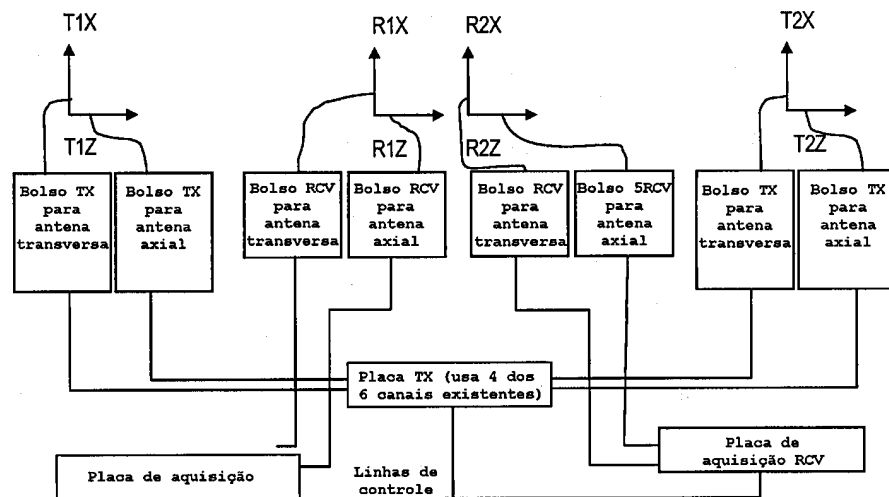


Fig. 15



Fig. 16

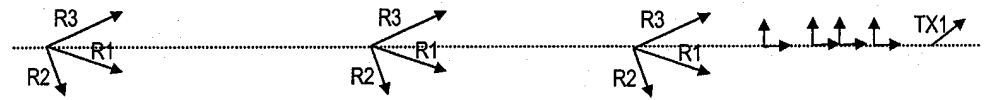


Fig. 17



Fig. 18



Fig. 19

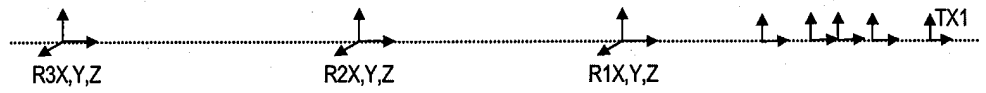


Fig. 20



Fig. 21

'sub' direcional de profundidade na broca

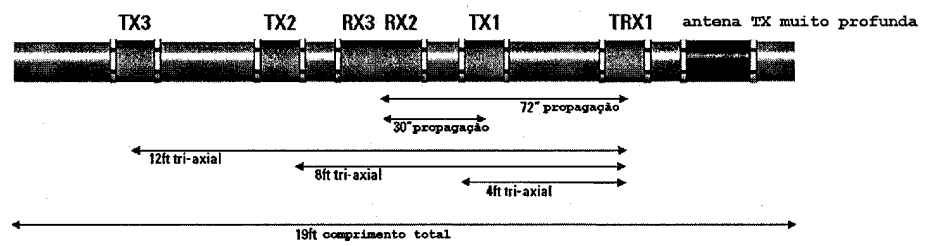


Fig. 22

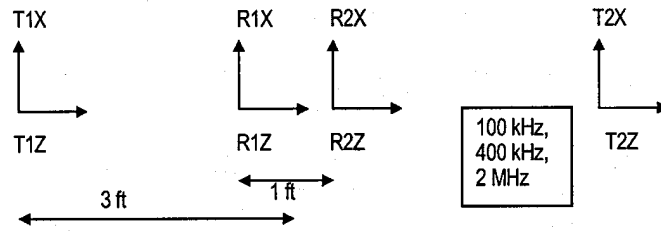


Fig 23

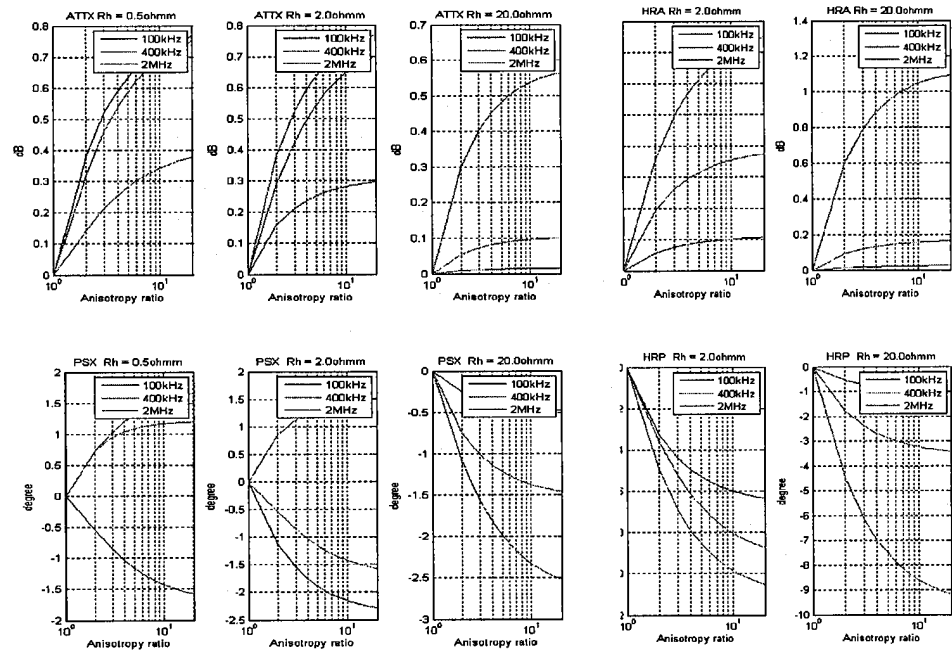


Fig 24

Fig 25

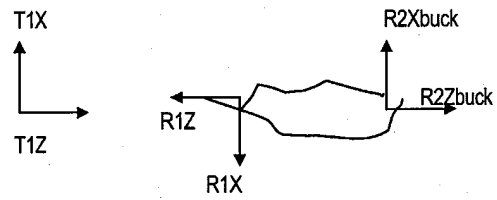


Fig 26

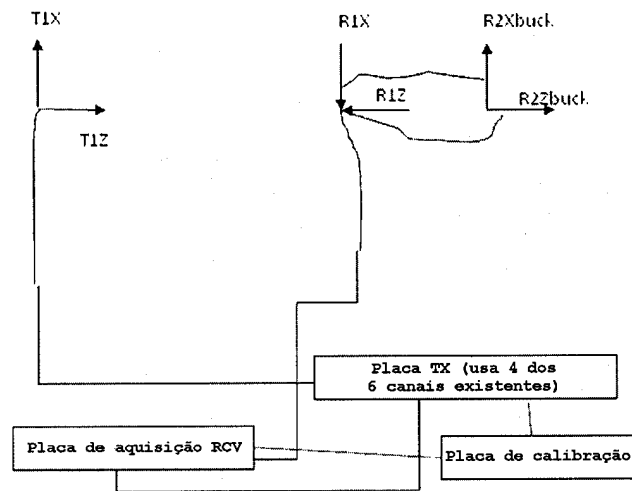


Fig 27

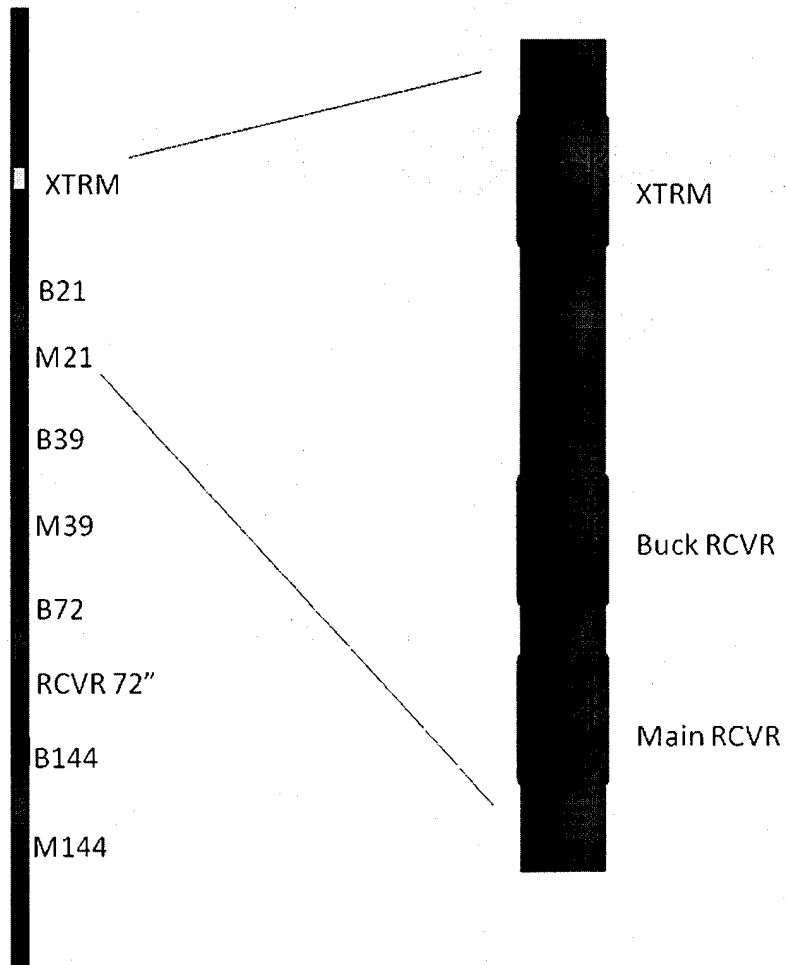


Fig 28

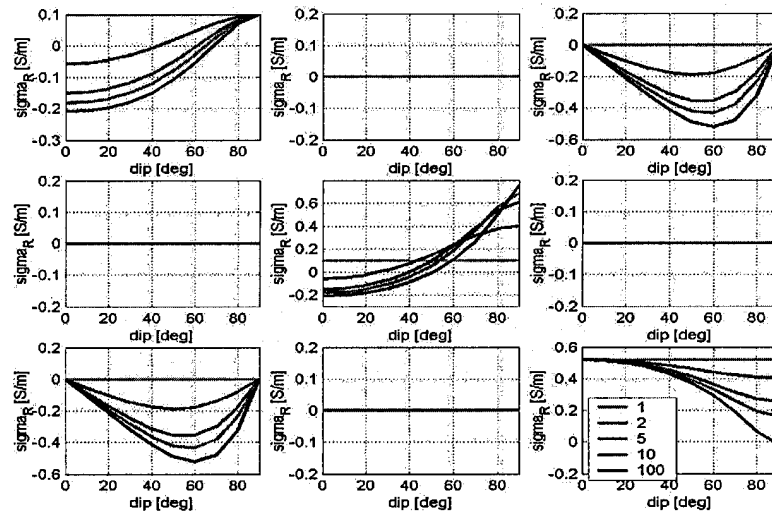


Fig 29