



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

**(11) PI 0417227-2 B1**

**(22) Data do Depósito:** 23/11/2004

**(45) Data de Concessão:** 05/01/2016  
**(RPI 2348)**



---

**(54) Título:** MÉTODO PARA A PERFILAGEM DE UMA FORMAÇÃO TERRESTRE E APARELHO PARA DETERMINAR UM PARÂMETRO DE INTERESSE DE UMA FORMAÇÃO TERRESTRE

**(51) Int.Cl.:** G01V 3/28

**(30) Prioridade Unionista:** 03/12/2003 US 60/526,457, 22/11/2004 US 10/994,830

**(73) Titular(es):** BAKER HUGHES INCORPORATED

**(72) Inventor(es):** LIMING YU, BERTHOLD KRIEGSHAUSER

Relatório Descritivo da Patente de Invenção para **"MÉTODO PARA A PERFILAGEM DE UMA FORMAÇÃO TERRESTRE E APARELHO PARA DETERMINAR UM PARÂMETRO DE INTERESSE DE UMA FORMAÇÃO TERRESTRE"**.

5 Antecedentes da Invenção

Campo da Invenção

A presente invenção refere-se geralmente ao campo de perfila-  
gem de campo elétrica de poços de petróleo. Mais especificamente, a pre-  
sente invenção é um método para obter uma medição de um parâmetro de  
10 uma formação utilizando um componente real de um sinal eletricamente in-  
duzido em uma formação.

Descrição da Técnica Relativa

É importante para a indústria de petróleo e gás conhecer a natu-  
reza e as características das várias formações de subsuperfícies penetradas  
15 por um furo de poço porque a mera criação de um furo de poço (tipicamente  
por perfuração) usualmente não provê informações suficientes referentes à  
existência, localização em profundidade, quantidade, etc, de petróleo e gás  
aprisionados nas formações. Várias técnicas elétricas têm sido empregadas  
no passado para determinar estas informações sobre as formações. Uma tal  
20 técnica comumente utilizada é a perfilagem por indução. A perfilagem por  
indução mede a resistividade (ou o seu inverso, a condutividade) da forma-  
ção primeiramente induzindo correntes parasitas a fluir nas formações em  
resposta a um sinal de transmissor, e então medindo um sinal de componen-  
te de fase em um sinal de receptor gerado pela presença das correntes pa-  
25 rasitas. As variações na magnitude das correntes parasitas em resposta a  
variações na condutividade da formação são refletidas como variações no  
sinal de receptor. Assim, em geral, a magnitude do componente em fase (o  
componente que está em fase com o sinal de transmissor) é indicativa da  
condutividade da formação.

30 Os princípios físicos de perfilagem de poço de resistividade de  
indução eletromagnética estão descritos, por exemplo, em H.G. Doll, *Intro-  
duction to Induction Logging and Application to Logging of Wells Drilled with*

*Oil-Based Mud*, Journal of Petroleum Technology, vol. 1, p.148, Society of Petroleum Engineers, Richardson, Tex. (1949). Muitos aperfeiçoamentos e modificações dos instrumentos de resistividade de indução eletromagnética foram imaginados desde a publicação da referência de Doll, acima. Exemplos de tais modificações e aperfeiçoamentos podem ser encontrados, por exemplo, na Patente U.S. Número 4.837.517; Patente U.S. Número 5.157.605 emitida para Chandler *et al.*; e Patente U.S. Número 5.452.761 emitida para Beard *et al.*

A teoria básica dos instrumentos de perfilagem por indução para a avaliação de resistividade de formação está ensinada na Patente U.S. Número 3.147.429 para Moran e está aqui resumida. Mostrados na Figura 1 estão uma bobina de transmissor e uma bobina de receptor exemplares com uma distância  $L$  entre estas. O transmissor tem um produto  $A_t$  da área de seção transversal vezes o número de bobinas. O produto correspondente para a bobina de receptor é  $A_r$ . A constante de propagação  $k$  é dada por:

$$k = \sqrt{j\omega\sigma\mu} \quad (1)$$

onde  $j$  é a raiz quadrada de  $-1$ ,  $\omega$  é a frequência angular do sinal,  $\sigma$  é a condutividade da formação e  $\mu$  é a permeabilidade do meio. A Equação (1) pode ser reescrita como

$$\gamma = \frac{1+j}{\delta} \quad (2)$$

onde  $\delta$  denota a "profundidade de crosta" do meio e é dada por

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\sigma\mu}} \quad (3)$$

Quando uma corrente  $I$  é passada através do transmissor, as correntes parasitas são induzidas na formação a qual por sua vez induz um campo magnético e correntes parasitas no receptor. A voltagem de receptor total  $V$  é dada pela expressão:

$$V = -j\omega I \frac{\mu A_T A_R}{2\pi L^3} \left[ \begin{array}{l} 1 - \frac{(j\gamma L)^2}{2} - \frac{(j\gamma L)^3}{3} - \dots \\ \frac{(j\gamma L)^4}{8} - \frac{(j\gamma L)^5}{30} - \dots \end{array} \right] \quad (4).$$

A separação em partes real e imaginária dá as partes real e imaginária  $V_r$  e  $V_x$  (componentes em fase e de quadratura) como

$$V_r = \frac{\sigma\omega^2\mu^2 A_T A_R}{4\pi L} \left[ 1 - \frac{2}{3} \left( \frac{L}{\delta} \right) + \frac{2}{15} \left( \frac{L}{\delta} \right)^2 - \dots \right] \quad (5)$$

e

$$V_x = \frac{\sigma\omega\mu I A_T A_R}{4\pi L} \left[ -1 + \frac{2}{3} \left( \frac{L}{\delta} \right)^3 - \frac{1}{2} \left( \frac{L}{\delta} \right)^4 + \frac{2}{15} \left( \frac{L}{\delta} \right)^5 \right] \quad (6)$$

5 Deve ser ressaltado que o componente de quadratura da voltagem é equivalente ao componente real do campo magnético.

Um instrumento de medição de resistividade elétrica típico é um instrumento de perfilagem de poço militar por indução eletromagnética tal como descrito na Patente U.S. Número 5.452.761 emitida para Beard *et al.* O instrumento de perfilagem por indução descrito na patente 761 de Beard  
10 inclui várias bobinas de receptor espaçadas em várias distâncias axiais de uma bobina de transmissor. Uma corrente alternada é passada através da bobina de transmissor a qual induz campos eletromagnéticos alternados nas formações terrestres. As voltagens, ou as medições, são induzidas nas bobinas de receptor como um resultado do fenômeno de indução eletromagnética relativo aos campos eletromagnéticos alternados. Um registro contínuo das voltagens forma curvas, as quais são também referidas como registros de indução. Os instrumentos de indução que são compreendidos de múltiplos conjuntos de bobinas de receptor são referidos como instrumentos de indução de rede múltipla. Cada conjunto de bobinas de receptor juntamente  
15 com o transmissor é denominado uma sub-rede. Uma ferramenta de indução de rede múltipla consiste em numerosas sub-redes e adquire as medições com todas as sub-redes.  
20

As voltagens induzidas nas bobinas de receptor axialmente mais

distantes são o resultado do fenômeno de indução eletromagnética ocorrendo em um maior volume circundando o instrumento, e as voltagens induzidas nas bobinas de receptor axialmente mais próximas são o resultado dos fenômenos de indução ocorrendo mais próximo do instrumento. Portanto, diferentes bobinas de receptor vêm um limite de camada de formação com diferentes contribuições de camada adjacente, ou efeitos de camada adjacente. As bobinas de receptor mais espaçadas vêm o limite de camada de formação a uma distância maior do furo de poço do que o fazem as bobinas de receptor menos espaçadas. Como um resultado, os registros de bobinas de receptor mais espaçadas têm maiores efeitos de camada adjacente do que os registros de bobinas de receptor menos espaçadas. Os registros de todas as bobinas de receptor formam um certo padrão.

Um instrumento de indução recentemente desenvolvido compreende três redes de transmissor/receptor mutuamente ortogonais. Uma tal configuração torna possível determinar tanto a resistividade horizontal quanto a vertical para uma formação anisotrópica em furos de poço verticais, desviados, e horizontais. Uma descrição da ferramenta pode ser encontrada na Patente U.S. Número 6.147.496 para Strack *et al.* Os transmissores induzem as correntes em três direções espaciais mutuamente perpendiculares e os receptores medem os campos magnéticos correspondentes ( $H_{xx}$ ,  $H_{yy}$ , e  $H_{zz}$ ). Nesta nomenclatura das respostas de campo, o primeiro índice indica a direção do transmissor, o segundo índice denota a direção do receptor. Como um exemplo,  $H_{zz}$  é o campo magnético induzido por uma bobina de transmissor de direção  $z$  e medido por um receptor direcionado  $z$ . A direção  $z$  é paralela ao furo de poço. Incluído em Strack está um ensinamento de como as medições feitas em duas frequências podem ser combinadas para fornecer a resistividade da formação terrestre afastando do furo de poço enquanto evitando os efeitos de uma possível invasão de fluidos de furo de poço na formação. Outros métodos para o processamento de dados de indução de múltiplos componentes utilizam um método de focalização de frequência no qual as medições são feitas em diversas frequências. Exemplos de tais métodos estão dados na Patente U.S. Número 6.574.562 de Tabarovsky *et al.*

O componente imaginário do campo magnético é comumente utilizado nos métodos de processamento por inversão acima identificados. Isto corresponde à parte real da voltagem acima notada na Equação (5). O componente real de uma medição de campo magnético de frequência única tem propriedades similares ao componente imaginário de uma medição de campo magnético de frequência dupla (ou de múltiplas frequências). Até o momento, a indústria não utilizou o componente real de campo magnético de dados de perfilagem por indução no processamento de dados. A presente invenção está direcionada para a utilização do componente real do campo magnético para a determinação de resistividade de formação anisotrópica.

#### Sumário da Invenção

A presente invenção é um método e aparelho para a perfilagem de uma formação terrestre que inclui uma pluralidade de camadas que têm uma resistividade horizontal e uma resistividade vertical, pelo menos uma das camadas tendo uma resistividade horizontal diferente da resistividade vertical.

Uma ferramenta de perfilagem é transportada para dentro de um furo de poço dentro da formação terrestre. A ferramenta de perfilagem tem primeiro e segundo eixos geométricos de transmissor inclinados um em relação ao outro. Os primeiro e segundo transmissores enviam sinais eletromagnéticos a pelo menos uma frequência para dentro da formação terrestre. Os sinais que resultam da interação dos sinais transmitidos com a formação terrestre são recebidos por receptores adequados, os sinais recebidos tendo uma fase substancialmente a mesma que a fase dos ditos sinais transmitidos. Um processador é utilizado para processar os sinais recebidos para determinar a resistividade horizontal e vertical da pelo menos uma camada.

Um dos dois transmissores pode ter um eixo geométrico substancialmente paralelo a um eixo geométrico da ferramenta de perfilagem e o outro transmissor pode ter um eixo geométrico substancialmente ortogonal ao primeiro eixo geométrico. Alternativamente, os eixos geométricos dos dois transmissores podem estar inclinados em outros ângulos do que  $0^\circ$  e  $90^\circ$  em relação ao eixo geométrico da ferramenta: no último caso o proces-

sador executa uma rotação de coordenadas dos sinais recebidos.

O processamento inclui definir um modelo terrestre em camadas da formação terrestre. Os sinais recebidos são invertidos utilizando o modelo definido. A inversão pode incluir primeiro determinar a resistividade horizontal utilizando um subconjunto dos sinais recebidos. A resistividade vertical é então determinada utilizando outro subconjunto dos sinais recebidos e a resistividade horizontal derivada. A invenção pode ser praticada ou com medições a uma única frequência ou com medições a uma pluralidade de frequências.

O processador pode estar localizado em um local de superfície ou em um local de fundo de poço. Os transmissores e os receptores podem ser transportados sobre um cabo ou sobre um conjunto de fundo de poço para as aplicações de medição enquanto perfurando.

#### Breve Descrição dos Desenhos

A presente invenção será melhor compreendida com referência às Figuras acompanhantes nas quais os números iguais referem-se a elementos iguais e nas quais:

Figura 1 (técnica anterior) mostra a geometria de bobinas para uma ferramenta de perfilagem por indução da técnica anterior;

Figura 2 (técnica anterior) é uma ilustração que mostra uma ferramenta de perfilagem por indução desdobrada dentro de um furo de poço para medir a condutividade da formação adjacente;

Figura 3 mostra um modelo de formação de resistividade e diversas respostas de perfilagem ao modelo;

Figura 4 mostra os valores de resistividade verdadeiros e obtidos para o modelo da Figura 3;

Figura 5 mostra as respostas de perfilagem obtidas de uma formação de campo de baixa resistividade;

Figura 6 mostra os valores de resistividade obtidos para a formação de campo de baixa resistividade da Figura 5;

Figura 7 mostra as respostas de perfilagem obtidas de uma formação de campo de alta resistividade;

Figura 8 mostra os valores de resistividade obtidos para a formação de campo de alta resistividade da Figura 7; e

Figura 9 (técnica anterior) mostra uma disposição de bobinas de transmissor e de receptor para fazer medições de múltiplos componentes.

#### 5 Descrição Detalhada da Invenção

Referindo agora à Figura 2, uma ferramenta de perfilagem por indução 20 adequada para utilização com a presente invenção está mostrada posicionada dentro de um furo de poço 22 que penetra as formações terrestres 54. A ferramenta 20 a qual está suspensa dentro do furo de poço 22 por meio de um cabo 24, inclui uma sonda de furo de poço 34 e uma seção de circuito eletrônico 32. A ferramenta 20 é baixada para dentro do furo de poço 22 por meio de um cabo 24, o qual passa sobre uma roldana 31 localizada na superfície do furo de poço 22. O cabo 24 está tipicamente enrolado por sobre um tambor 30. O cabo 24 inclui condutores elétricos isolados para transmitir os sinais elétricos. A seção de circuito eletrônico 32 da ferramenta 20 recebe os sinais da seção de sonda 34 para executar várias funções analógicas e digitais, como será posteriormente descrito.

A sonda 34 de preferência inclui uma pluralidade de bobinas 40, 52. A bobina 46 é uma bobina de transmissor para transmitir um sinal oscilante para a formação geológica 54 circundante adjacente. De preferência, um sinal de onda quadrada é suprido para a bobina 46. No entanto, é contemplado que qualquer um de vários sinais de voltagem oscilante que tem componentes de múltiplas frequências pode ser utilizado. Ainda, é desejável que, na ocasião, um sinal de frequência única, tal como um sinal senoidal, seja utilizado. O sinal de voltagem oscilante aplicado na bobina 46 gera uma corrente na bobina 46 a qual por sua vez gera um campo eletromagnético na formação circundante 54. O campo eletromagnético, por sua vez, induz correntes parasitas, as quais fluem coaxialmente em relação ao furo de poço 22. As magnitudes das correntes parasitas estão relacionadas com a condutividade da formação circundante 54. As bobinas remanescentes 40, 42, 44, 47, 48, 50 e 52 são bobinas de receptor nas quais os sinais são induzidos pelos campos elétricos causados pelas correntes parasitas produzidas na

5 formação. Conforme a ferramenta 20 é levantada dentro do furo de poço 22, a condutividade da formação circundante 54 pode ser determinada dos sinais recebidos de modo que um leito ou camada 55 que tem uma condutividade que é indicativa da possibilidade de conter hidrocarbonetos possa ser localizado.

10 A seção de circuito eletrônico 32 inclui um circuito conversor 60, um circuito empilhador 62, uma memória de acesso randômico (RAM) 63, e um circuito de telemetria 61. O circuito conversor 60 compreende uma pluralidade de pré-amplificadores, filtros, e conversores de analógico para digital (A/D) para receber os sinais das bobinas de receptor 40-52 e transformá-los em sinais digitalizados para processamento adicional pelo circuito empilhador 62. Os sinais de voltagem analógicos providos pelas bobinas de receptor 40-52 são digitalmente amostrados de acordo com uma taxa de amostragem predeterminada no período definido pela frequência fundamental do sinal de transmissor, a qual em uma modalidade típica é de aproximadamente 15 10 kHz.

20 A amostragem é repetida ao longo de um grande número de ciclos de sinal de voltagem de transmissor de preferência pelo menos 1.024 ciclos para aperfeiçoar a razão de sinal para ruído dos sinais recebidos. Para reduzir a quantidade de dados que devem ser armazenados ou transmitidos, as amostras digitais correspondentes tomadas em cada um dos ciclos de transmissor são somadas. As amostras de sinal digital somadas que correspondem a cada uma da pluralidade de bobinas de receptor formam amostras de sinal empilhadas correspondentes, as quais são armazenadas na RAM 25 63. Os sinais empilhados que correspondem à pluralidade de bobinas de receptor 40-52 podem então ser recuperados da RAM 63 e podem ser transmitidos pelo circuito de telemetria 61 através do cabo 24 para um processador 64 o qual faz parte do equipamento de superfície 26, onde as análises dos sinais empilhados pode ser executada. Alternativamente, o processamento de pelo menos parte dos dados poderia ser executado no fundo de poço utilizando um processador em um local adequado (não mostrado) e os resultados do processamento enviados por telemetria pelo poço acima.

Em uma modalidade alternativa, um processador que tem uma capacidade de processamento de sinal digital suficiente poderia fazer parte da seção de circuito eletrônico 32. Assim, é contemplado que a transformada de Fourier discreta requerida poderia ser executada no fundo de poço, o que  
 5 adicionalmente reduziria a quantidade de dados a serem transmitidos para a superfície.

O sinal  $zz$  medido em um furo de poço perfurado perpendicular a uma formação responde somente à resistividade horizontal da formação terrestre. Isto é devido ao fato de que as correntes induzidas por um transmissor de componente  $z$ - estão em um plano paralelo ao acamamento e não  
 10 são afetadas pela resistividade vertical de uma formação anisotrópica. Um transmissor de componente  $x$ - ou  $y$ - em um furo de poço perfurado perpendicular a uma formação, por outro lado, induz correntes que fluem tanto na direção vertical quanto na horizontal (e também em ângulos intermediários).  
 15 Com isto os sinais  $xx$  e  $yy$  respondem tanto às resistividades verticais quanto horizontais. Os procedimentos de inversão comumente utilizados baseiam-se no sinal  $ZZ$  para a determinação da resistividade horizontal, e esta resistividade horizontal determinada é utilizada para obter a resistividade vertical dos sinais  $xx$  e/ou  $yy$ . Conseqüentemente, os valores invertidos de resistividades verticais são menos precisos do que os valores invertidos de resistividades horizontais.  
 20

Antes de discutir as Figuras restantes, notou-se a convenção utilizada para as faixas nas Figuras 3-8:

O termo "único" representa o componente imaginário do campo magnético obtido para uma medição de frequência única;  
 25

o termo "duplo" representa o componente imaginário do campo magnético obtido para uma medição de frequência dupla; e

o termo "real" representa o componente real do campo magnético obtido para uma medição de frequência única.

30 Referindo-se agora à Figura 3, o modelo está mostrado na primeira faixa e apresenta uma formação anisotrópica que tem resistividades horizontais e verticais. 201 e 203 mostram as resistividades horizontais e

verticais utilizadas em um modelo. Um poço vertical foi utilizado para o modelo, de modo que as respostas XX e YY são idênticas, 204 e 205 na faixa 2 mostram as respostas XX para as frequências de 20,8 kHz e 41,7 kHz respectivamente. A faixa 3 mostra duas respostas de frequência dupla para o modelo de resistividade da faixa 1. 207 é a resposta de frequência dupla para as frequências de 20,8 kHz e 41,7 kHz respectivamente, enquanto 208 mostra a resposta de frequência dupla para as frequências de 41,7 kHz e 83,3 kHz respectivamente. Finalmente a faixa H mostra as respostas reais 209 e 210 para as frequências de 20,8 kHz e 41,7 kHz respectivamente. A escala no topo das faixas 3 e 4 é para uma faixa de valores de  $\pm 0,004$  Wb/m<sup>2</sup>. Pode ser visto que o componente real (209 e 210) geralmente tem valores de sinal maiores do que as medições de frequência dupla (207 e 208).

A Figura 4 mostra os resultados de inversão para os dados sintéticos livres de ruído em um poço vertical da Figura 3. Um método para a inversão de dados de múltiplos componentes adequado para utilização na presente invenção está descrito na Patente U.S. Número 6.591.194 para Yu *et al.* que tem o mesmo cessionário que a presente invenção e cujo conteúdo está totalmente incorporado por referência. O método de Yu é também aplicável a furos de poço desviados.

Como descrito em Yu, as medições feitas por uma ferramenta de perfilagem de múltiplos componentes em um furo de poço estão invertidas para obter as resistividades horizontais e verticais em uma formação atravessada pelo furo de poço. O modelo inclui camadas de espessuras iguais, cada camada tendo uma resistividade horizontal e uma resistividade vertical. Para um furo de poço vertical, a inversão é feita primeiramente obtendo iterativamente as resistividades horizontais da camada utilizando o componente  $H_{zz}$  dos dados em que nas etapas sucessivas da interação, a resistividade horizontal para cada camada é multiplicada por uma razão de uma saída  $H_{zz}$  do modelo para o  $H_{zz}$  medido. O modelo de resistividade vertical é determinado igual às resistividades horizontais derivadas e o processo iterativo é repetido utilizando a razão da saída  $H_{xx}$  do modelo para o  $H_{xx}$  medido. Um

processo similar é utilizado para os furos de poço com uma inclinação conhecida. Para um tal furo de poço inclinado, os dois componentes horizontais  $H_{xx}$  e  $H_{yy}$  são somados para fornecer uma medição horizontal  $H_{xxyy}$  que é independente da rotação da ferramenta. A primeira etapa utiliza uma razão da saída  $H_{zz}$  do modelo para os dados de  $H_{zz}$  medidos para obter uma resistividade aparente, e, na segunda etapa, a razão da saída  $H_{xxyy}$  do modelo e os dados de  $H_{xxyy}$  medidos são utilizados juntamente com uma relação conhecida entre a resistividade aparente e as resistividades horizontais e verticais em um modo interativo. Nenhum Jacobiano ou gradiente é necessário no método, de modo que os tempos computacionais são pequenos em relação aos métodos de gradiente da técnica anterior. Deve ser notado que resultados similares podem ser obtidos pela utilização de outras inclinações dos eixos geométricos de transmissor e receptor para os eixos geométricos de furo de poço desde que estes possam ser girados em componentes principais (direções x-, y- e z-) por uma rotação de coordenadas. Apesar de Yu discutir a inversão de dados de frequência dupla, não existe aqui nenhum ensinamento da inversão do componente real de dados. Deve também ser notado que outros métodos do que aqueles descritos por Yu poderiam também ser utilizados para a inversão de dados de múltiplos componentes. Um exemplo de um tal método está descrito na Patente U.S. Número 6.643.589 para Zhang *et al.*

A faixa 1 301 mostra três curvas que são muito similares. Uma é a anisotropia verdadeira do modelo, uma segunda curva mostra o resultado de inversão da saída de modelo de frequência dupla da Figura 3, enquanto que a terceira curva mostra os resultados da inversão da saída de modelo de componente real da Figura 3. A faixa 2 303 da Figura 4 mostra uma comparação da resistividade horizontal verdadeira e os resultados da inversão da saída de modelo de frequência única. O fato de que existe pouca diferença entre as curvas na faixa 2 demonstra a precisão da técnica de inversão. Finalmente, a faixa 3 mostra uma comparação da resistividade vertical verdadeira com os resultados da inversão da saída de modelo de frequência dupla e a inversão do componente real da saída de modelo. As diferenças

das três curvas da faixa 3 são um pouco maiores do que na faixa 2, mas estão ainda dentro de limites aceitáveis. As diferenças um pouco maiores são uma indicação de que a inversão de resistividade vertical não é tão precisa quanto a inversão para a resistividade horizontal. As razões para a precisão um pouco mais baixa foram acima notadas.

Observando agora a Figura 5, dados de campo para uma formação que tem uma alta condutividade estão mostrados. 401, 402 e 403 são medições xx de frequência dupla para as frequências de (20,8 kHz, 41,7 kHz), (41,7 kHz, 83,3 kHz) e (83,3 kHz e 166 kHz) respectivamente. 405, 406 e 407 são as medições xx de componente real em 20,8 kHz e 41,7 kHz e 83,3 kHz respectivamente. A escala para as medições de frequência dupla é de  $\pm 0,002 \text{ Wb/m}^2$ , enquanto que a escala para as medições de componente real é de  $\pm 0,004 \text{ Wb/m}^2$ . A Figura 5 mostra que o componente real tem níveis de sinal mais altos do que as medições de frequências dupla nas formações condutoras. Isto deve ser esperado já que a medição de frequência dupla é uma diferença escalada entre duas medições de frequência única. Os resultados da inversão dos dados da Figura 5 estão mostrados na Figura 6.

A faixa 1 501 da Figura 6 mostra duas curvas de anisotropia interpretadas que são muito similares uma à outra. Uma curva é da inversão de dados de frequência dupla da Figura 5 enquanto que a outra curva é da inversão de dados de componente real da Figura 5. A faixa 2 503 da Figura 6 mostra a resistividade horizontal obtida pela inversão de dados de componente único enquanto que a faixa 3 505 mostra uma comparação de resistividade vertical invertida de dados de componente duplo e real. A concordância entre as resistividades invertidas é boa, demonstrando que nas formações condutoras, a inversão do componente real de medições por indução fornece resultados tão bons quanto aqueles obtidos pela inversão do componente imaginário de medições de frequência dupla.

A Figura 7 mostra um exemplo de campo de uma formação resistiva que tem uma resistividade horizontal maior do que  $5 \Omega\text{-m}$ . A faixa 1 mostra as medições de frequência dupla 601 em 20,3 kHz e 41,7 kHz. A fai-

xa 2 mostra as medições de frequência dupla 602 em 41,7 kHz e 83,3 kHz, enquanto que a faixa 3 mostra as medições de frequência dupla 603 em 83,3 kHz e 166 kHz. As faixas 4, 5 e 6 (curvas 604, 605 e 606) mostram as medições de componente real em 20,8 kHz, 41,7 kHz e 83,3 kHz respectivamente. As medições de frequência dupla mostram mais instabilidade de alta frequência do que os componentes reais. Compare, por exemplo, 602 e 605. Apesar dos valores de escala total para os componentes duplo e real correspondentes serem o mesmo, isto é, as faixas 1 e 4, as faixas 2 e 5, e as faixas 3 e 6, é notado que o componente real tem um nível de sinal um pouco mais alto. Esta maior amplitude está mais claramente vista na profundidade indicada por 611.

Observando agora a Figura 8, os resultados da inversão de dados da Figura 7 estão mostrados. A faixa 1 701 mostra uma comparação da anisotropia invertida de medições de frequência dupla e de componente real. A faixa 2 703 mostra uma comparação das resistividades horizontais invertidas. Pouca diferença é notada na faixa 2 entre as duas curvas. Finalmente, a faixa 3 705 mostra grandes diferenças entre as inversões de frequência real e dupla.

Uma possível explicação para as grandes excursões é a presença de um deslocamento nas medições. As medições de componente real são inerentemente mais susceptíveis a erros causados pelo acoplamento direto entre o transmissor e o receptor. Isto é comumente resolvido pela utilização de bobinas de compensação no hardware. Os efeitos do acoplamento direto entre o transmissor e o receptor são muito menores para o componente imaginário do sinal medido. Conseqüentemente, um deslocamento é mais provável de estar presente com a medição de componente real. O efeito do acoplamento direto precisa ser removido.

Assim, utilizando o método e aparelho acima descrito, é possível determinar os parâmetros de interesse de uma formação terrestre tais como as resistividades horizontais e verticais de uma ou mais camadas da formação terrestre.

Uma disposição adequada de bobinas de transmissor e de re-

ceptor para fazer as medições de múltiplos componentes está mostrada na Patente U.S. Número 6.618.676 para Kriegshauser *et al.* e mostrada na Figura 9. Aqui mostrada está a configuração de bobinas de transmissor e de receptor do instrumento de perfilagem por indução 3DEXplorer<sup>®</sup> da Baker Hughes. Três transmissores ortogonais 801, 803 e 805 que estão referidos como os transmissores  $T_x$ ,  $T_z$ , e  $T_y$  estão mostrados (o eixo geométrico z é o eixo geométrico longitudinal da ferramenta). Correspondendo aos transmissores 801, 803 e 805 estão os receptores 807, 809 e 811 associados, referidos como os receptores  $R_x$ ,  $R_z$ , e  $R_y$ , para medir os campos magnéticos correspondentes. Em um modo preferido de operação da ferramenta, os componentes  $H_{xx}$ ,  $H_{yy}$ ,  $H_{zz}$ ,  $H_{xy}$ , e  $H_{xz}$  são medidos, apesar de outros componentes poderem também ser utilizados.

Na Figura 9, as bobinas de transmissor e de receptor estão mostradas em uma orientação fixa em relação ao corpo da ferramenta de perfilagem. Em uma modalidade alternativa da invenção, os transmissores e/ou receptores podem estar montados articulados utilizando métodos conhecidos na técnica.

O método da presente invenção foi acima discutido com referência a um dispositivo de perfilagem transportado sobre um cabo. No entanto, o método da invenção é igualmente aplicável a dispositivos de perfilagem transportados em um conjunto de fundo de poço para as aplicações de medição enquanto perfurando (MWD).

Deve ser ainda notado que o método da presente invenção foi fornecido utilizando exemplos de uma frequência única, a medição do componente real do campo magnético. O método da presente invenção poderia também ser utilizado com medições de componente real, de frequência dupla ou múltipla.

Apesar da descrição acima estar direcionada às modalidades preferidas da invenção, várias modificações ficarão aparentes para aqueles versados na técnica. É pretendido que todas tais variações dentro do escopo e do espírito das reivindicações anexas sejam abrangidas pela descrição acima.

## REIVINDICAÇÕES

1. Método para a perfilagem de uma formação terrestre (54) que tem uma resistividade horizontal e uma resistividade vertical, em que o método compreende as etapas de:

5 (a) transportar uma ferramenta (20) para dentro de um furo de poço (22) na formação terrestre, a ferramenta tendo um primeiro transmissor (801) com um primeiro eixo geométrico e um segundo transmissor (803)(803) com um segundo eixo geométrico inclinado em relação ao primeiro eixo geométrico;

10 (b) transmitir primeiro e segundo campos magnéticos para dentro da formação terrestre com os primeiro e segundo transmissores (801, 803);

(c) receber os primeiro e segundo campos magnéticos que resultam dos primeiro e segundo campos magnéticos; e

15 **caracterizado por**

(d) processar os componentes dos primeiro e segundo campos magnéticos recebidos substancialmente em fase com os primeiro e segundo campos magnéticos transmitidos respectivamente sem usar componentes dos primeiro e segundo campos magnéticos recebidos substancialmente em quadratura com os primeiro e segundo campos magnéticos transmitidos respectivamente para determinar uma resistividade horizontal e uma resistividade vertical da formação terrestre.

20

2. Método de acordo com a reivindicação 1, **caracterizado pelo fato de que** o primeiro eixo geométrico é substancialmente paralelo a um eixo geométrico da ferramenta (20) e o segundo eixo geométrico é substancialmente ortogonal ao primeiro eixo geométrico.

25

3. Método de acordo com a reivindicação 1, **caracterizado pelo fato de que** os primeiro e segundo eixos geométricos estão inclinados em outros ângulos do que  $0^\circ$  e  $90^\circ$ , e em que o processamento ainda compreende uma rotação de coordenadas.

30

4. Método de acordo com a reivindicação 1, **caracterizado pelo fato de que** o processamento ainda compreende definir um modelo que

compreende uma pluralidade de camadas, o modelo incluindo uma resistividade horizontal e uma resistividade vertical associadas com cada uma da pluralidade de camadas.

5 **5** **fato de que** o processamento ainda compreende inverter os sinais recebidos utilizando o dito modelo.

10 **6.** Método de acordo com a reivindicação 1, **caracterizado pelo fato de que** o processamento ainda compreende utilizar um subconjunto dos campos magnéticos recebidos para determinar uma resistividade horizontal de pelo menos uma camada da formação terrestre (54).

15 **7.** Método de acordo com a reivindicação 6, **caracterizado pelo fato de que** o processamento ainda compreende utilizar outro subconjunto dos ditos campos magnéticos recebidos e a resistividade horizontal determinada para determinar uma resistividade vertical para a pelo menos uma camada.

**8.** Método de acordo com a reivindicação 1, **caracterizado pelo fato de que** os primeiro e segundo transmissores são operados a uma pluralidade de frequências.

20 **9.** Aparelho para determinar um parâmetro de interesse de uma formação terrestre (54), o aparelho compreendendo:

25 (a) um primeiro transmissor (801) com um primeiro eixo geométrico e um segundo transmissor (803) com um segundo eixo geométrico inclinado em relação ao primeiro eixo geométrico, os primeiro e segundo transmissores transmitindo os primeiro e segundo campos magnéticos para dentro da formação terrestre (54);

(b) receptores os quais recebem os campos magnéticos que resultam dos primeiro e segundo campos magnéticos transmitidos; e

**caracterizado por**

30 (c) um processador o qual determina dos componentes dos campos magnéticos recebidos substancialmente em fase com os campos magnéticos transmitidos correspondentes uma resistividade horizontal e uma resistividade vertical de pelo menos uma camada na formação terrestre (54).

10. Aparelho de acordo com a reivindicação 9, **caracterizado pelo fato de que** o parâmetro de interesse compreende pelo menos um de (i) uma resistividade horizontal, e, (ii) uma resistividade vertical da pelo menos uma camada.

5                   11. Aparelho de acordo com a reivindicação 9, **caracterizado pelo fato de que** os primeiro e segundo transmissores são operáveis a uma pluralidade de frequências.

10                   12. Aparelho de acordo com a reivindicação 9, **caracterizado pelo fato de que** o primeiro eixo geométrico é substancialmente paralelo a um eixo geométrico de uma ferramenta (20) que carrega um primeiro transmissor (801) e o segundo eixo geométrico é substancialmente ortogonal ao primeiro eixo geométrico.

15                   13. Aparelho de acordo com a reivindicação 9, **caracterizado pelo fato de que** os primeiro e segundo eixos geométricos estão inclinados em outros ângulos do que  $0^\circ$  e  $90^\circ$ , e em que o processador ainda executa uma rotação de coordenadas.

20                   14. Aparelho de acordo com a reivindicação 9, **caracterizado pelo fato de que** os ditos primeiro e segundo transmissores e os receptores são transportados em um dispositivo de cabo para dentro de um furo de poço (22) na dita formação terrestre (54).

15                   15. Aparelho de acordo com a reivindicação 9, **caracterizado pelo fato de que** os ditos primeiro e segundo transmissores e os receptores são transportados no conjunto de fundo de poço que inclui uma ponta de broca para dentro de um furo de poço (22) na formação terrestre (54).

25                   16. Aparelho de acordo com a reivindicação 9, **caracterizado pelo fato de que** o processador ainda define um modelo de uma pluralidade de camadas da formação terrestre (54), o modelo incluindo uma resistividade horizontal e uma resistividade vertical associadas com cada uma da pluralidade de camadas.

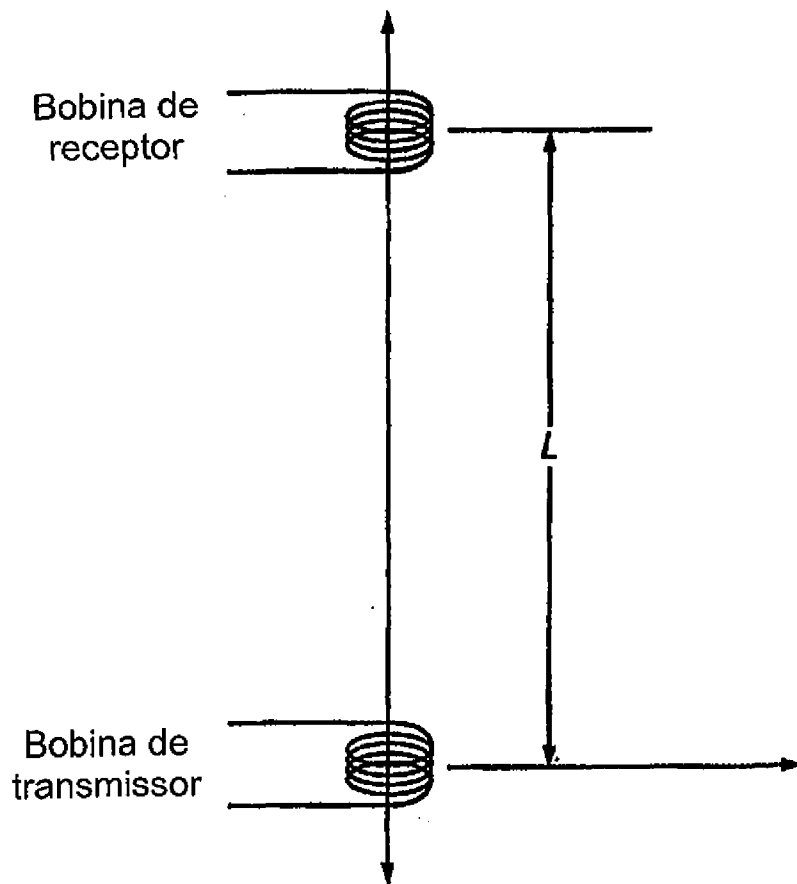
30                   17. Aparelho de acordo com a reivindicação 16, **caracterizado pelo fato de que** o processador ainda executa uma inversão dos sinais recebidos utilizando o modelo.

18. Aparelho de acordo com a reivindicação 9, **caracterizado pelo fato de que** o processador está em um local da superfície.

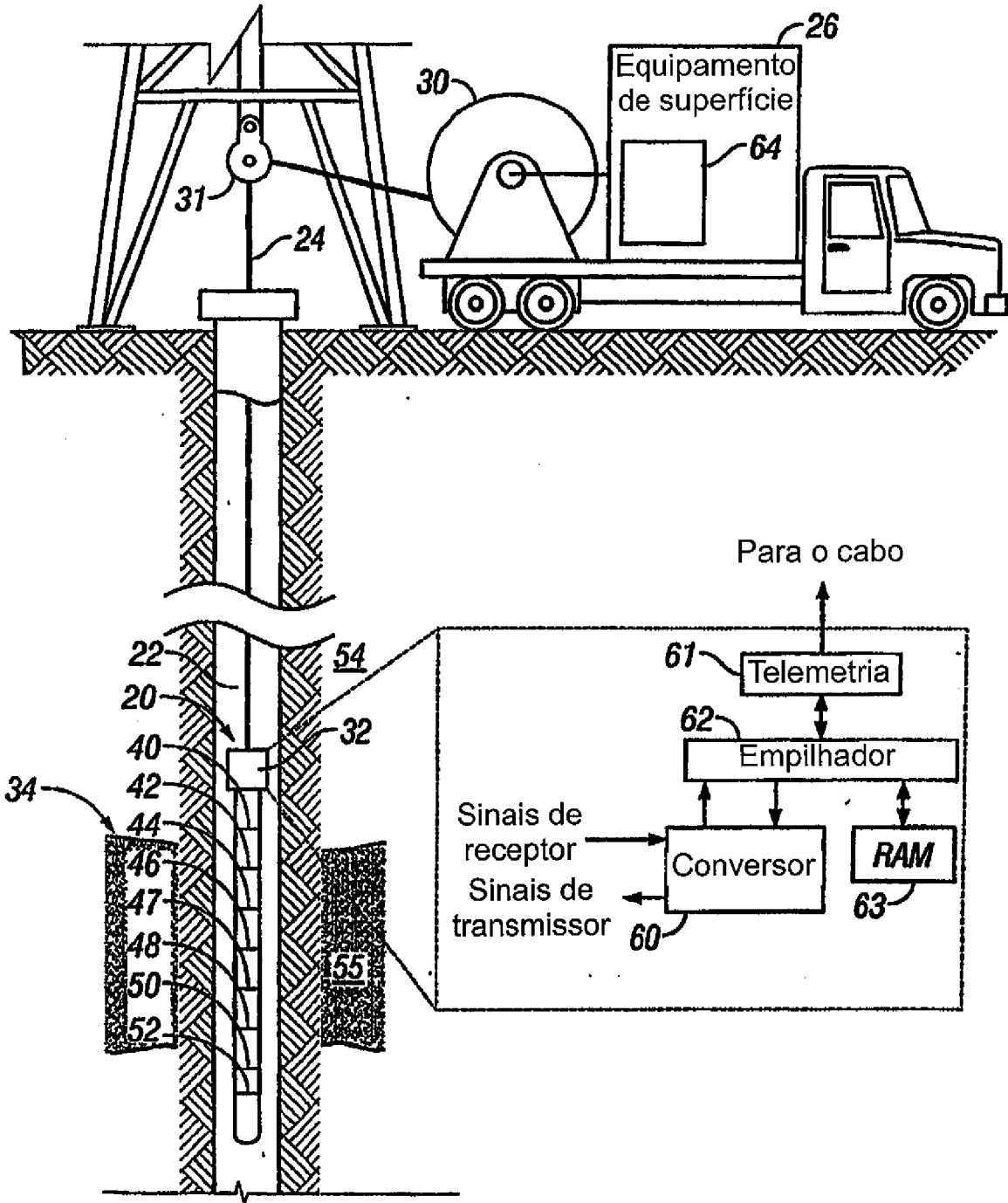
19. Aparelho de acordo com a reivindicação 9, **caracterizado pelo fato de que** o processador está em um local de fundo de poço.

5                   20. Aparelho de acordo com a reivindicação 9, **caracterizado pelo fato de que** os primeiro e segundo transmissores estão montados articulados.

21. Aparelho de acordo com a reivindicação 9, **caracterizado pelo fato de que** os receptores estão montados articulados.



**FIG. 1.**  
(Técnica Anterior)



**FIG. 2**  
(Técnica Anterior)

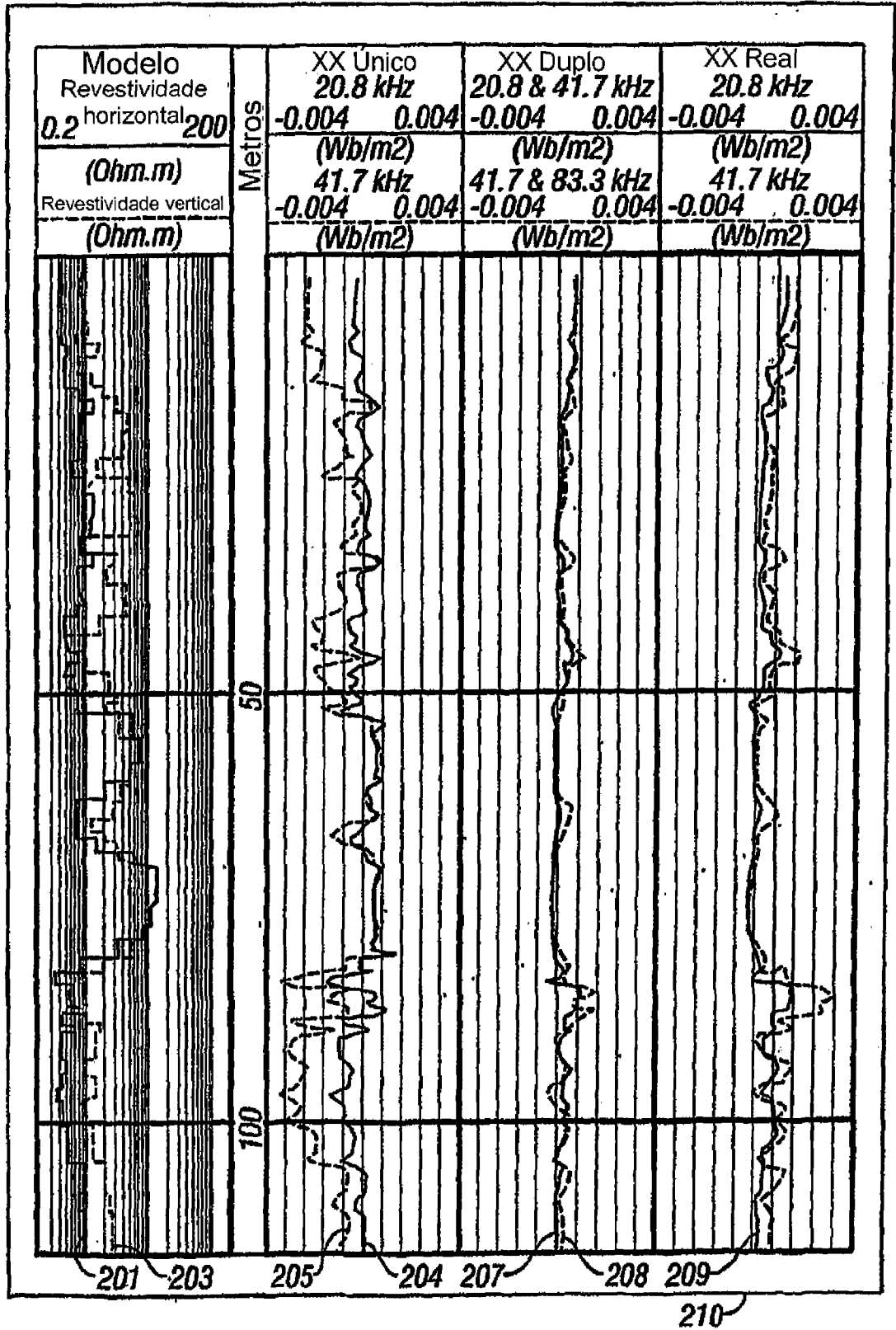


FIG. 3

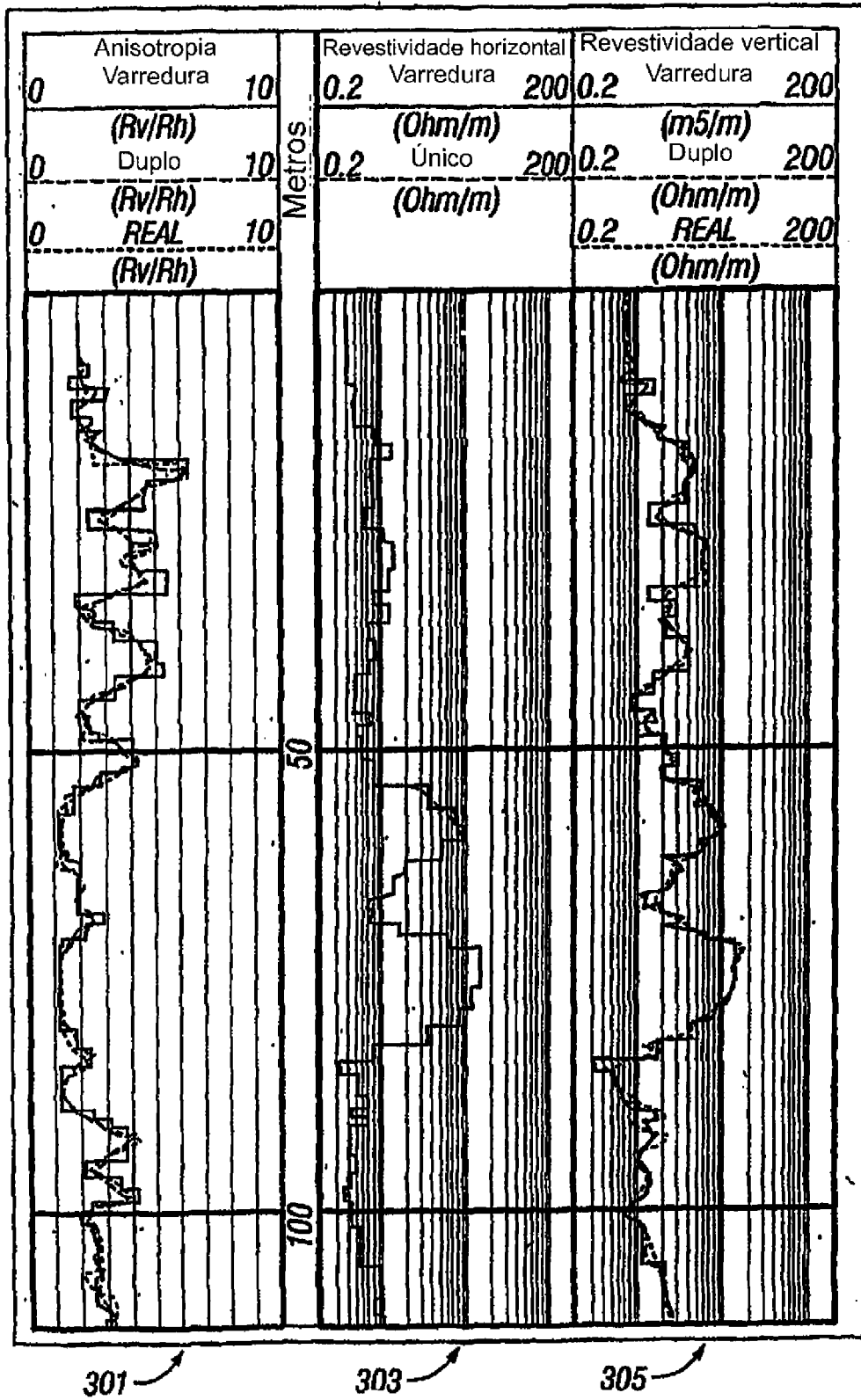


FIG. 4

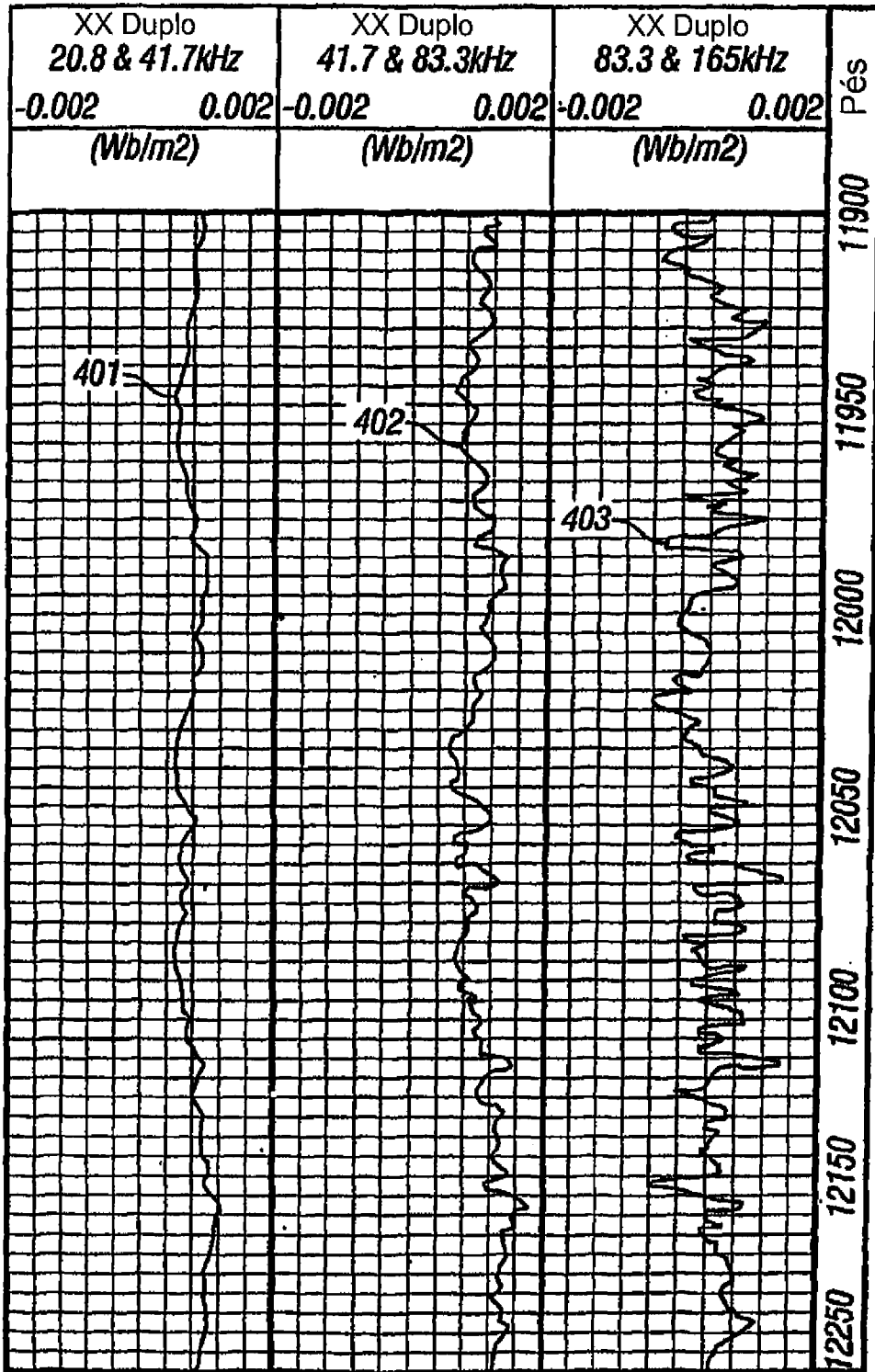
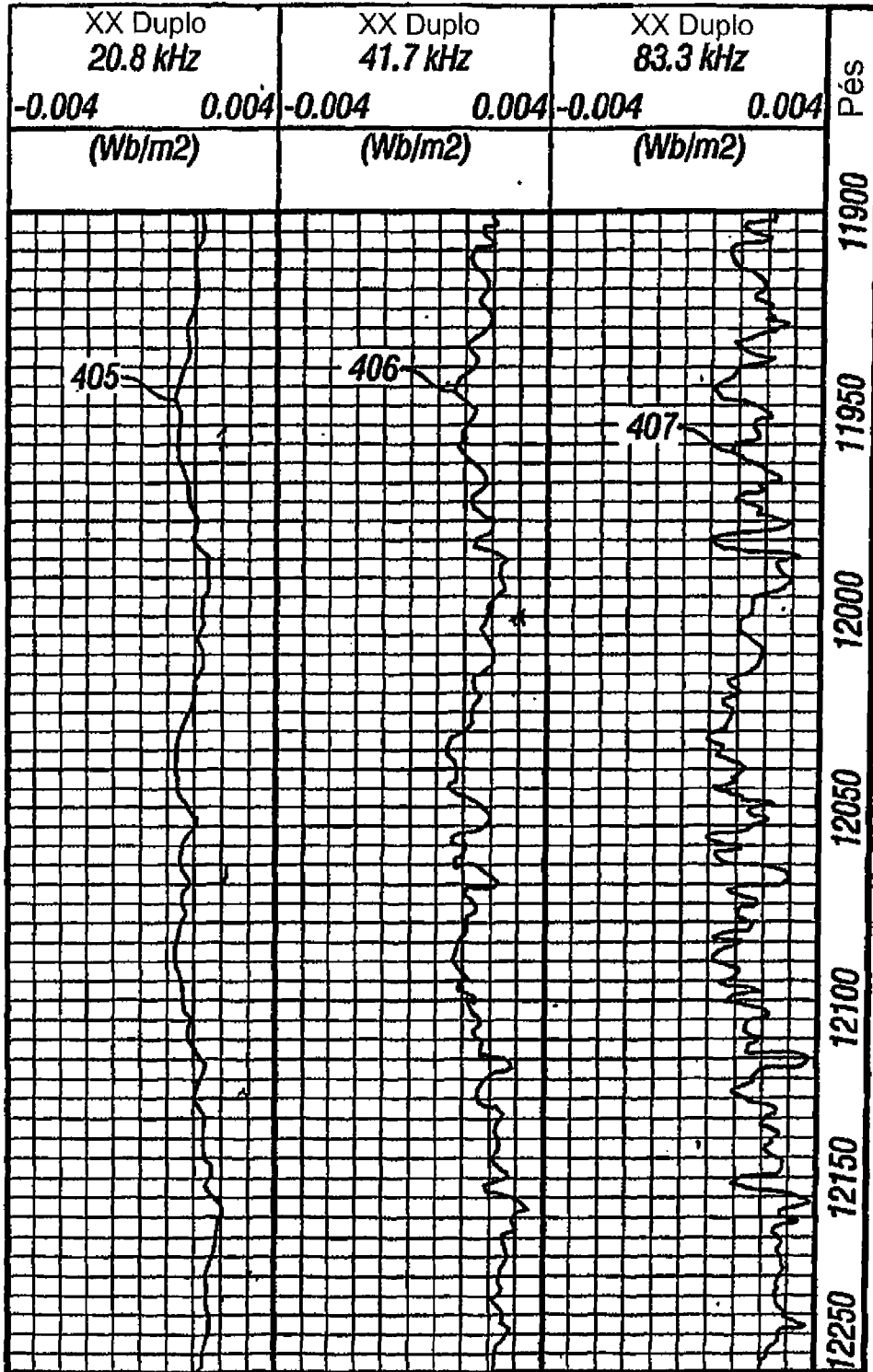


FIG. 5



**FIG. 5**  
(Continuação)

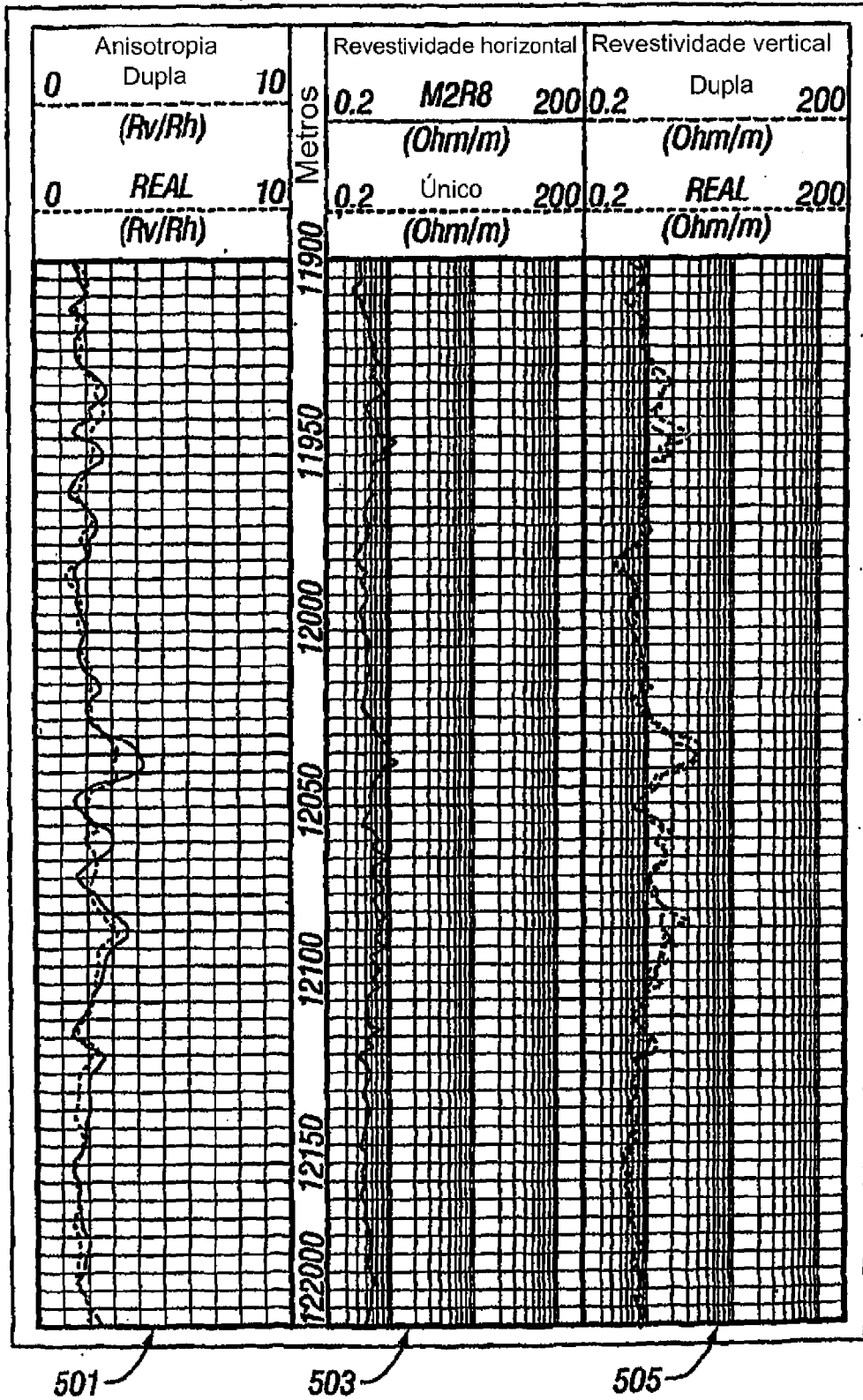


FIG. 6

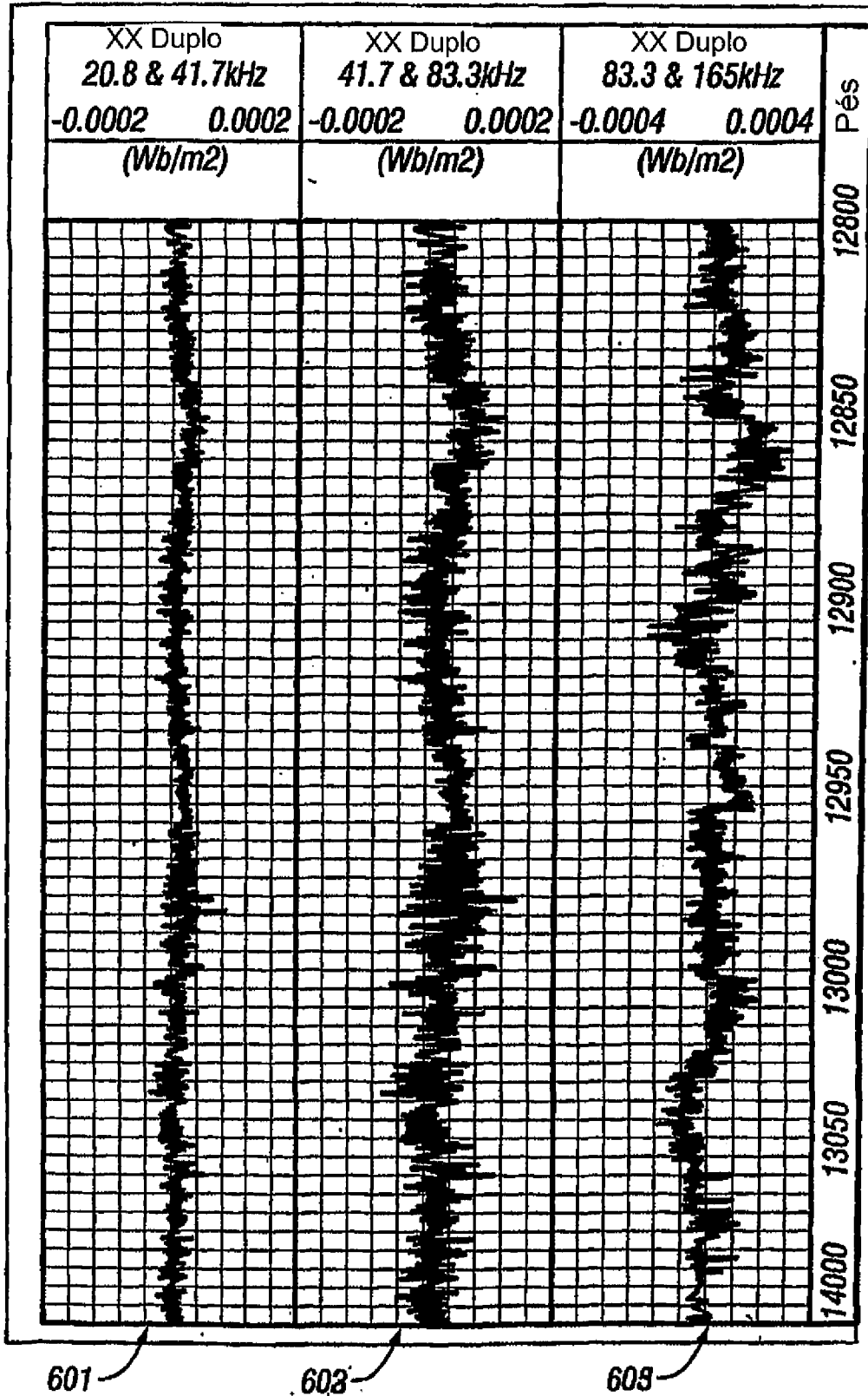
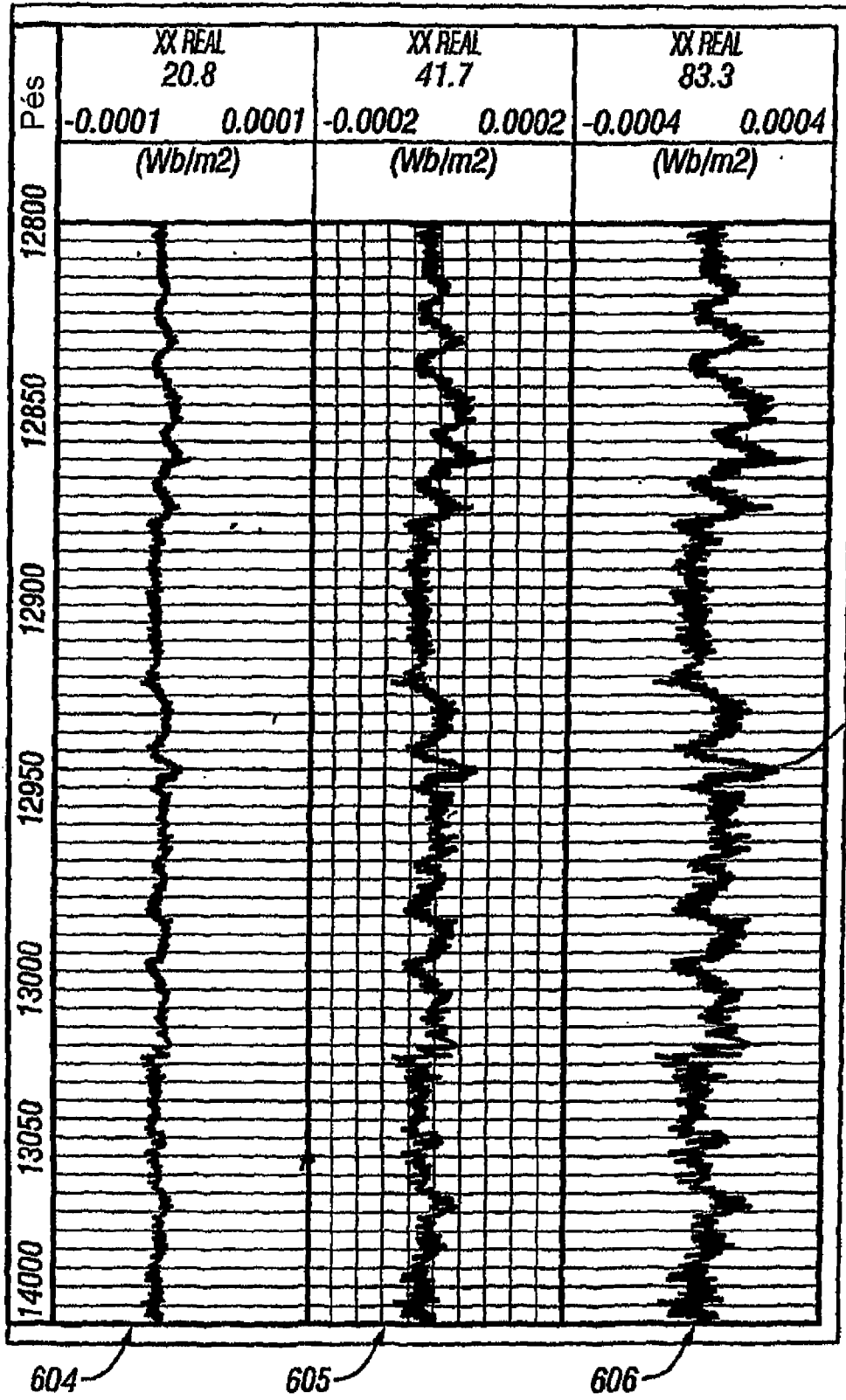


FIG 7



**FIG. 7**  
(Continuação)

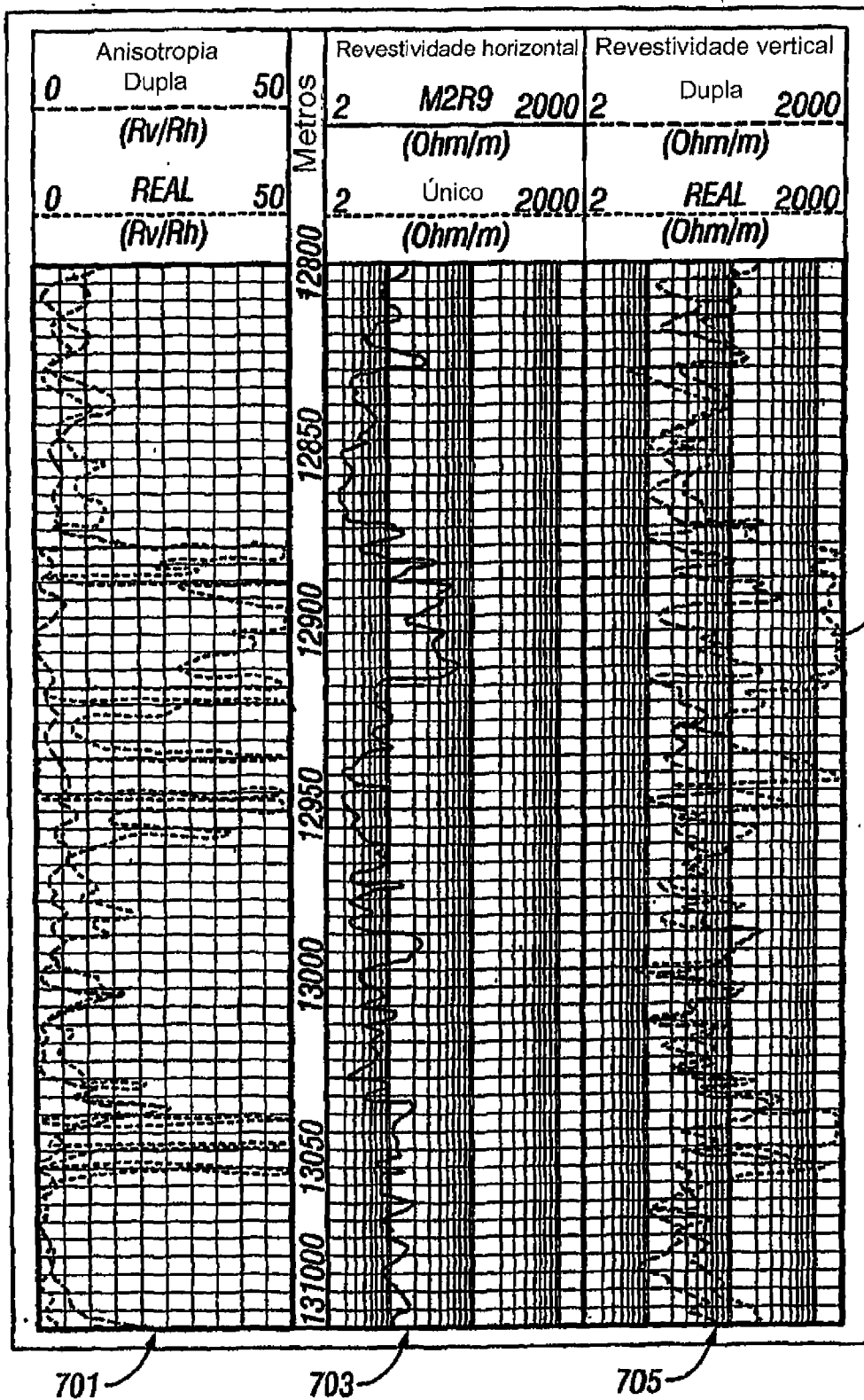
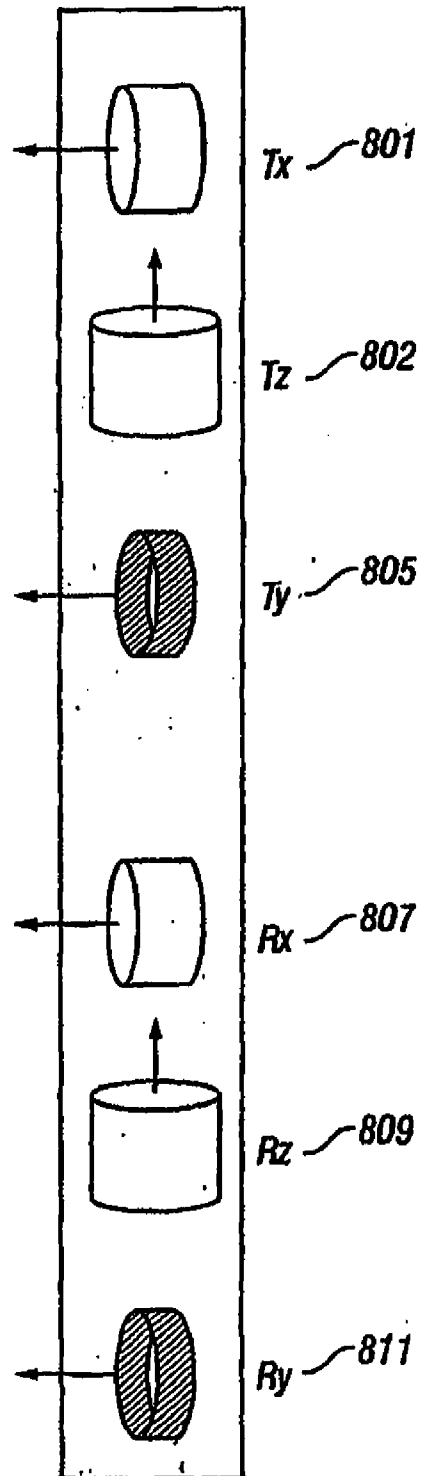


FIG. 8



**FIG. 9**  
(Técnica Anterior)

## RESUMO

Patente de Invenção: **"MÉTODO PARA A PERFILAGEM DE UMA FORMAÇÃO TERRESTRE E APARELHO PARA DETERMINAR UM PARÂMETRO DE INTERESSE DE UMA FORMAÇÃO TERRESTRE"**.

5                   A presente invenção refere-se a medições por indução de múltiplos componentes que são feitas utilizando uma ferramenta (20) de perfilação de resistividade em uma formação terrestre (54) anisotrópica. Um subconjunto das medições de múltiplos componentes é invertido para primeiramente determinar as resistividades horizontais. Utilizando as resistividades  
10 horizontais determinadas e outro subconjunto das medições de múltiplos componentes, as resistividades verticais são obtidas. Os resultados da utilização dos sinais em fase são comparáveis com aqueles obtidos utilizando uma focalização de múltiplas frequências de sinais de quadratura.