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

(11) PI 0816081-3 B1

BRPI0816081B1

(22) Data do Depósito: 28/08/2008

(45) Data de Concessão: 02/07/2019

(54) Título: APARELHO PARA AVALIAR UMA FORMAÇÃO TERRESTRE, MÉTODO PARA AVALIAR UMA FORMAÇÃO TERRESTRE E PRODUTO DE MEIO LEGÍVEL POR COMPUTADOR

(51) Int.Cl.: G01R 33/44.

(30) Prioridade Unionista: 10/10/2007 US 60/978,954; 31/08/2007 US 60/969,501.

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

(72) Inventor(es): MARTIN BLANZ.

(86) Pedido PCT: PCT US2008074577 de 28/08/2008

(87) Publicação PCT: WO 2009/032731 de 12/03/2009

(85) Data do Início da Fase Nacional: 26/02/2010

(57) Resumo: Patente de Invenção: "MÉTODO E APARELHO PARA SATURAÇÃO EM RMN". A presente invenção refere-se a sequências de pulsos de satu- ração para garantir saturação completa de giros nucleares para medições duais de tempo de espera e de recuperação de saturação, no caso de um movimento axial de uma ferramenta de avaliação de RMN de fundo do furo. Podem ser usadas modulação de frequência e/ou modulação de fase. Pode ser usada uma bobina de saturação auxiliar.

Relatório Descritivo da Patente de Invenção para **"APARELHO PARA AVALIAR UMA FORMAÇÃO TERRESTRE, MÉTODO PARA AVALIAR UMA FORMAÇÃO TERRESTRE E PRODUTO DE MEIO LEGÍVEL POR COMPUTADOR".**

Antecedentes da Invenção

1. Campo da Invenção

[001] A presente invenção refere-se, em geral, à determinação de propriedades geológicas de formação da subsuperfície usando métodos de Ressonância Magnética Nuclear ("RMN") para avaliação de poços, particularmente, o uso de sequências de pulsos de saturação na presença de movimento de ferramenta axial para medições duplas de tempo de espera e recuperação de saturação T_1.

2. Descrição da Técnica Relacionada

[002] Uma pluralidade de técnicas é utilizada para determinar a presença e calcular as quantidades de hidrocarbonetos (petróleo e gás) em formações terrestres. Esses métodos estão projetados para determinar parâmetros de formação, que incluem, entre outras coisas, a resistividade, porosidade e permeabilidade da formação rochosa que circunda o poço perfurado para recuperar os hidrocarbonetos. Tipicamente, as ferramentas destinadas a fornecer as informações desejadas são usadas para fazer o perfil do poço. Grande parte do perfil é feito depois de os poços terem sido perfurados. Mais recentemente, os poços têm sido avaliados enquanto estavam sendo perfurados, o que é chamado de medição durante a perfuração (MWD) ou avaliação durante a perfuração (LWD).

[003] Uma técnica que tem se desenvolvido recentemente envolve a utilização de ferramentas de avaliação de Ressonância Magnética Nuclear (RMN) e ferramentas para determinar, entre outras coisas, porosidade, saturação de hidrocarbonetos e permeabilidade das formações rochosas. As ferramentas de avaliação de RMN são utilizadas

para excitar os núcleos dos líquidos nas formações geológicas que circundam o poço, de modo que determinados parâmetros, tais como densidade de spin, tempo de relaxação longitudinal (geralmente chamado na técnica de T_1) e tempo de relaxação transversal (geralmente chamado de T_2) das formações geológicas podem ser medidos. Dessas medições são determinadas porosidade, permeabilidade e saturação de hidrocarbonetos, o que fornece informações valiosas sobre a constituição das formações geológicas e a quantidade de hidrocarbonetos que pode ser extraída.

[004] As ferramentas de RMN geram um campo magnético estático uniforme ou quase uniforme em uma região de interesse circundando o poço. RMN está baseado no fato de que os núcleos de muitos elementos têm momento angular (spin) e um momento magnético. Os núcleos têm uma frequência ressonante de Larmor característica relacionada ao tamanho do campo magnético em sua localidade. Ao longo do tempo, os spins nucleares alinham-se ao longo de um campo magnético aplicado externamente. Essa situação de equilíbrio pode ser perturbada por um pulso de um campo magnético oscilante, que inclinam os spins com frequência ressonante dentro da largura de banda do campo magnético oscilante para fora da direção do campo estático. O ângulo θ pelo qual os spins exatamente em ressonância são inclinados é dado pela equação:

$$\theta=\gamma B_1 t_p \qquad (1)$$

onde γ é a relação giromagnética, B_1 é a potência de campo efetiva do campo oscilante e t_p é a duração do pulso de RF.

[005] Depois da inclinação, os spins precessam em torno do campo estático a uma frequência específica, conhecida como frequência de Larmo ω_0, dada por

$$\omega_0=\gamma B_0 \qquad (2)$$

onde B_0 é a intensidade do campo estático. Ao mesmo

tempo, os spins voltam para a direção de equilíbrio (isto é, alinhados com o campo estático) de acordo com um tempo de declínio exponencial, conhecido como tempo de relaxação do retículo de spins ou T_1. Para núcleos de hidrogênio, $\gamma/2\pi$=4258 Hz/Gauss, de modo que um campo estático de 235 Gauss produz uma frequência de precessão de 1 MHz. T_1 de fluido em poros é controlado totalmente pelo ambiente molecular e é, tipicamente, dez a um mil milissegundos em rochas.

[006] Ao final de um pulso de inclinação de θ=90°, spins em ressonâncias são apontados em uma direção comum perpendicular ao campo estático, e eles precessam à frequência de Larmor. Mas, devido a heterogeneidades no campo estático, devido às limitações no formato das ferramentas, cada spin nuclear precessa a uma velocidade ligeiramente diferente. Portanto, depois de um tempo longo comparado com o período de precessão, mas mais curto do que T_1, os spins não precessam mais em fase. Essa defasagem ocorre com uma constante de tempo que é normalmente chamada de T_2*, se for predominantemente devido à heterogeneidade do campo estático do aparelho, e como T_2, se for devido às propriedades do material.

[007] A bobina de recepção está configurada de modo que uma voltagem é induzida pelos spins em precessão. Apenas o componente da magnetização nuclear que está processando no plano perpendicular ao campo estático é detectado pela bobina. Depois de um pulso de inclinação de 180° (ou um "pulso de inversão"), os spins em ressonância são alinhados opostos ao campo estático e a "precessão" consiste em uma volta lenta ao longo do eixo do campo estático para a direção de equilíbrio. Portanto, um sinal é gerado depois de um pulso de inclinação de 90°, mas não depois de um pulso de inclinação de 180° em um campo magnético geralmente uniforme.

[008] Saturação em RMN significa "destruir toda a magnetização". A saturação é necessária dentro das medições de Tempo de Es-

pera Dual (DTW) e recuperação de saturação T_1. No campo de RMN, o termo T_1 é chamado de tempo de relaxação longitudinal, enquanto o termo T_2 é o tempo de relaxação transversal. O DTW compreende dois trens de eco de RMN, um que começa com magnetização total depois de um longo tempo de espera TW (por exemplo, 6 s ou mais), o outro que começa depois de um tempo de espera mais curto, de, por exemplo, TW=1s. Se os ecos de RMN das duas sequências forem diferentes, então isso é causado por componentes de formação com T_1 > aprox. 0,5 s. O método de DTW, portanto, fornece algumas informações sobre T_1. Para que o método funcione, é importante que para a sequência com TW=1 s, essa sequência comece com magnetização zero, também chamada de saturação. Vide, por exemplo, U.S. 6,331,755 para Thern *et al.*, com o mesmo cessionário da presente invenção e cujo teor está incorporado ao presente por referência. Uma sequência de saturação aperiódica (APS) funciona bem quando a ferramenta de avaliação é estacionária (W. Dietrich *et al.*, Z. Anal. Chem. 279, 177-181 (1976). Se, por outro lado, a ferramenta de avaliação mover-se entre a aplicação da sequência de saturação e a sequência de eco de RMN subsequente, então a região saturada não é coincidente com a região de onde se originam os ecos de RMN. Como consequência, a saturação não é eficiente, e as medições de DTW dão respostas erradas.

[009] O uso de pulsos de saturação de banda larga, que são relativamente insensíveis ao movimento de ferramenta lateral foi descrito na técnica anterior. Na técnica anterior não é mencionada a questão do movimento da ferramenta de avaliação ao longo do eixo do furo. Isso pode ser um problema para uma velocidade de penetração (ROP) maior que 20 m/h, dependendo da configuração da ferramenta de avaliação. Deve ser observado que todos os exemplos e descrições no presente são específicos para a ferramenta de RMN descria na figura

2. Com sequências de saturação de banda larga mais elaboradas, o problema pode ser superado e uma saturação eficaz torna-se possível, mesmo em excesso de ROP = 100 m/h.

Sumário da Invenção

[0010] Uma modalidade da invenção é um aparelho para avaliar uma formação terrestre. O aparelho inclui um conjunto de fundo de poço, configurado para ser transportado em um furo; uma disposição de ímã em uma ferramenta no conjunto de fundo de poço, configurada para gerar um campo magnético estático na formação terrestre; pelo menos uma bobina de radiofrequência (RF) no conjunto de fundo de poço, configurada para gerar um campo de RF na formação terrestre; e um processador, configurado para ativar a pelo menos uma bobina de RF com uma primeira sequência de pulsos, que satura substancialmente spins nucleares em uma região da formação terrestre, ativar a pelo menos uma bobina de RF com uma segunda sequência de pulsos, que gera pelo menos um sinal da região de saturação substancial e, substancialmente, não gera nenhum sinal de fora da região, sendo que há um movimento axial da ferramenta entre um tempo de início da primeira sequência de pulsos e um tempo final da segunda sequência de pulsos.

[0011] Outra modalidade da invenção é um método para avaliar uma formação terrestre. O método inclui transportar um conjunto de fundo de poço em um furo; usar uma disposição de ímã em uma ferramenta no conjunto de fundo de poço, para gerar um campo magnético estático em uma região da formação terrestre; usar pelo menos uma bobina de radiofrequência (RF) no conjunto de fundo de poço, para gerar um campo de RF na formação terrestre; e ativar a pelo menos uma bobina de RF com uma primeira sequência de pulsos, que satura substancialmente spins nucleares na região e com uma segunda sequência de pulsos, que gera pelo menos um sinal da região de

saturação substancial e não gera nenhum sinal de fora da região, em que há um movimento axial da ferramenta entre um tempo de início da primeira sequência de pulsos e um tempo final da segunda sequência de pulsos.

[0012] Outra modalidade da invenção é um meio legível por computador, acessível a um processador. O meio inclui instruções que possibilitam ao processador determinar uma propriedade de uma formação terrestre, selecionada de (I) um tempo de relaxação longitudinal T_1 da formação, (II) um tempo de relaxação transversal T_2 da formação, e (III) um teor de fluido da formação, usando pelo menos um sinal de uma formação terrestre adquirido por uma ferramenta de ressonância magnética nuclear, após a aplicação de um campo magnético estático na formação terrestre durante um movimento axial da ferramenta, uma primeira sequência de pulsos de radiofrequência (RF), que satura, substancialmente, spins nucleares em uma região da formação terrestre, e uma segunda sequência de pulsos, que gera o pelo menos um sinal da região, sendo que a segunda sequência de pulsos não gera, substancialmente, nenhum sinal de fora da região.

Breve Descrição dos Desenhos

[0013] A presente invenção é mais bem entendida com referência às figuras anexas, nas quais números iguais referem-se a elementos iguais, e nas quais:

figura 1 mostra uma ferramenta de medição durante a perfuração, apropriada para uso com a presente invenção;

figura 2 (técnica anterior) mostra uma seção de sensor de um dispositivo de medição durante a perfuração, apropriada para uso com a presente invenção;

figura 3 mostra a magnetização nuclear como uma fração da magnetização de equilíbrio, um segundo depois de uma sequência de saturação aperiódica;

figura 4 mostra o volume sensível da ferramenta de avaliação exemplificada em dois momentos de tempo com um deslocamento axial;

figura 5 mostra os voxels do volume sensível da figura 4, classificado de acordo com seu componente de campo B_0 e campo B_1, que é ortogonal a B_0;

figura 6 mostra voxels do volume sensível deslocado da figura 4, classificado de acordo com seu componente de campo B_0 e campo B_1, que é ortogonal a B_0;

figura 7 mostra o componente B_1 médio, que é ortogonal a B_0 para cada B_0 na figura 5;

figura 8 mostra o componente B_1 médio, que é ortogonal a B_1 para cada B_0 na figura 6;

figura 9 mostra um pulso de frequência variável;

figura 10 mostra a transformada de Fourier do pulso da figura 9 e o espectro de frequência de um pulso retangular simples;

figura 11 mostra a magnetização remanescente depois do pulso de frequência variável;

figura 12A mostra a modulação de fase quadrática em etapas de 90° distintas como sinais em fase e de quadratura;

figura 12B mostra uma modulação de fase quadrática em etapas de 90° distintas como amplitude e fase;

figura 13 mostra os espectros de frequência da modulação de fase quadrática e de um pulso retangular simples;

figura 14 mostra uma comparação da eficiência dos diferentes métodos de saturação;

figura 15 mostra um diagrama de operações de metodologias que são usadas para projetar os parâmetros operacionais da ferramenta;

figura 16 um detalhe da disposição de bobina de transmis-

sor e receptor para uma modalidade da invenção;

figura 17 mostra a bobina de antena de transmissão e configuração de campo para outra modalidade da invenção; e

figura 18 mostra a disposição de uma bobina de saturação na disposição de antena da figura 17.

Descrição Detalhada da Invenção

[0014] A figura 1 mostra um diagrama esquemático de um sistema de perfuração 10, com uma coluna de perfuração 20, que leva um conjunto de perfuração 90 (também chamado de conjunto de fundo de poço, ou "BHA") transportado em um "poço" ou "furo" 26 para perfurar o poço. O sistema de perfuração 10 inclui uma torre de perfuração convencional 11 montada sobre um piso 12 que apoia uma mesa rotativa 14, que é girada por um motor principal, tal como um motor elétrico (não mostrado), a uma velocidade rotacional desejada. A coluna de perfuração 20 inclui uma tubulação, tal como um tubo de perfuração 22 ou uma tubulação enrolada, que se estende para baixo da superfície, para dentro do furo 26. A coluna de perfuração 20j é empurrada para dentro do poço 26 quando um tubo de perfuração 22 é usado como a tubulação. Para aplicações de tubulação enrolada, um injetor de tubulação, tal como um injetor (não mostrado), porém, é usado para mover a tubulação de uma fonte do mesmo, tal como uma bobina (não mostrada), para o poço 26. A broca de perfuração 50 fixada na extremidade da coluna de perfuração fragmenta as formações geológicas, quando ela é girada para perfurar o furo 26. Se for usado um tubo de perfuração 22, a correia de perfuração 20 é acoplada a um sistema de elevação 30 por meio de uma junta de Kelly 21, um suporte giratório 28 e linha 29 através de uma roldana 23. Durante as operações de perfuração, o sistema de elevação 30 é operado para controlar o peso na broca, que é um parâmetro importante, que afeta a velocidade de penetração. A operação do sistema de elevação é bem conhecida na

técnica e, portanto, não é descrita em detalhe no presente. Durante as operações de perfuração, um fluido de perfuração 31 apropriado de um tanque de lama (fonte) 32 é circulado sob pressão através de um canal na coluna de perfuração 20 por uma bomba de lama 34. O fluido de perfuração passa da bomba de lama 34 para a coluna de perfuração 20 por meio de um amortecedor de oscilação (não mostrado), linha de fluido 38 e junta de Kelly 21. O fluido de perfuração 31 é descarregado no fundo do furo 51 através de uma abertura na broca de perfuração 50. O fluido de perfuração 31 circula pelo furo acima através do espaço anular 27 entre a correia de perfuração 20 e o furo 36 e volta para o tanque de lama 32 por meio de uma linha de retorno 35. O fluido de perfuração age para lubrificar a broca de perfuração 50 e para carregar pedaços cortados ou lascas do furo para fora da broca de perfuração 50. Um sensor S_1 instalado tipicamente na linha 38, fornece informações sobre a velocidade da corrente de fluido. Um sensor de torque de superfície S_2 e um sensor S_3 associado com a coluna de perfuração 20 fornecem, em cada caso, informações sobre o torque e a velocidade rotacional da coréia de perfuração. Adicionalmente, um sensor (não mostrado) associado com a linha 29 é usado para fornecer a carga do gancho da coluna de perfuração 20.

[0015] Em uma modalidade da invenção, a broca de perfuração 50 é girada apenas girando o tubo de perfuração 22. Em outra modalidade da invenção, um motor do fundo do furo 55 (motor de lama) está disposto no conjunto de perfuração 90 para girar a broca de perfuração 50, e o tubo de perfuração 22 é girado, normalmente, para complementar a potência rotacional, caso necessário e para efetuar mudanças na direção de perfuração.

[0016] Em uma modalidade exemplificada da figura 1, o motor de lama 55 está acoplado à broca de perfuração 50 por meio de um eixo de acionamento (não mostrado) disposto em um conjunto de mancal

57. O motor de lama gira a broca de perfuração 50 quando o fluido de perfuração 31 passa através do motor de lama 55 sob pressão. O conjunto de mancal 57apoia as forças radiais e axiais da broca de perfuração. Um estabilizador 58 acoplado ao conjunto de mancal 57 age como um centralizador para a parte mais inferior do conjunto de motor de lama.

[0017] Em uma modalidade da invenção, um módulo de sensor de perfuração 59 está disposto próximo à broca de perfuração 50. O módulo de sensor de perfuração contém sensores, circuitos e software e algoritmos de processamento, referentes aos parâmetros de perfuração dinâmicos. Esses parâmetros incluem, tipicamente, salto de broca, emperramento-deslizamento do conjunto de perfuração, rotação de retrocesso, torque, choques, pressão do furo e do anel, medições de aceleração e outras medições da condição da broca de perfuração. Um sistema de telemetria ou comunicação adequado 72 que usa, por exemplo, telemetria de duas vias, também está previsto, tal como ilustrado no conjunto de perfuração 90. O módulo do sensor de perfuração processa as informações do sensor e transmite as mesmas para a unidade de controle de superfície 40 por meio do sistema de telemetria 72.

[0018] O sistema de comunicação 72, uma unidade energia 78 e uma ferramenta de MWD 79 estão todos conectados em série com a coluna de perfuração 20. Sistemas flex, por exemplo, são usados para conectar a ferramenta de MWD 79 no conjunto de perfuração 90. Esses sistemas e ferramentas formam o conjunto de perfuração do fundo do furo 90 entre a coluna de perfuração 20 e a broca de perfuração 50. O conjunto de perfuração 90 faz diversas medições, incluindo as medições de ressonância magnética nuclear pulsada, enquanto o furo 26 está sendo perfurado. O sistema de comunicação 72 obtém os sinais e medições e transfere os sinais, usando telemetria de duas vias, por

exemplo, a serem processados na superfície. Alternativamente, os sinais podem ser processados usando um processador do fundo do furo no conjunto de perfuração 90.

[0019] A unidade de controle de superfície ou processador 40 recebe também sinais de outros sensores e dispositivos de sensores do fundo do furo e sinais dos sensores S_1-S_3 e outros sensores usados no sistema 10 e processa esses sinais de acordo com instruções programadas fornecidas à unidade de controle de superfície 40. A unidade de controle de superfície 40 exibe parâmetros de perfuração desejados e outras informações em um dispositivo de exibição/monitor 42, utilizado por um operador para controlar as operações de perfuração. A unidade de controle de superfície 40 tipicamente inclui um computador ou um sistema de processamento baseado em microprocessador, memória para armazenar programas, modelos e dados, um gravador para gravar dados, e outros periféricos. A unidade de controle 40 está adaptada, tipicamente, para ativar alarmes 44 quando ocorrem determinadas condições operacionais inseguras ou indesejáveis.

[0020] Um dispositivo apropriado para uso da presente invenção está descrito no documento U.S. 6,215,304 para *Slade*, cujo teor está integralmente incorporado ao presente por referência. Deve ser observado que o dispositivo ensinado por *Slade* é apenas para fins de exemplificação e o método da presente invenção pode ser usado com muitos outros dispositivos de avaliação de RMN, e pode ser usado para aplicações de linha de fios, bem como de MWD.

[0021] Com referência, agora, à figura 2, a ferramenta tem uma broca de perfuração 107 em uma extremidade, uma seção de sensor 102 atrás da cabeça de perfuração e dispositivos eletrônicos 101. A seção de sensor 102 compreende um conjunto que gera um campo magnético para gerar um campo magnético B_0 (que é substancialmente invariável em tempo ao longo da duração de uma medição), e um

sistema de RF, para transmitir e receber pulsos magnéticos de RF e ecos. O conjunto gerador de campo magnético compreende um par de ímãs principais 103, 104, axialmente distanciados, com orientações de polo opostas (isto é, com pólos magnéticos iguais voltados um para outro), e três membros de ferrita 109, 110 axialmente dispostos entre os ímãs 103, 104. Os membros de ferrita são feitos de ferrita "macia", que podem ser diferenciados de ferrita "dura" pelo formato da curva de BH, que afeta tanto a coercividade intrínseca (H_j a interseção com o eixo H) e permeabilidade inicial (μ_j, o gradiente da curva BH no caso não magnetizado). Valores de ferrita macia μ_j variam, tipicamente, de 10 a 10000, enquanto ferrita dura tem μ_j de cerda de 1. Portanto, a ferrita macia tem uma permeabilidade inicial grande (tipicamente maior do que 10, de preferência, maior do que 1000). O sistema de RF compreende um conjunto de enrolamentos de bobina 105 de antena de transmissão de RF e antena de recepção de RF, dispostos como um grupo solenoide central 113 "formador de campo", e um par de grupos solenoide externos 114 de "controle de acoplamento". Isso é mostrado mais detalhadamente na figura 16.

[0022] Tal como descrito em *Slade*, o grupo solenoide central "formador de campo" 1613 compreende três grupos de enrolamento de bobina de transmissão, enrolados positivamente, e dois grupos de enrolamento de bobina de recepção, todos enrolados no mesmo sentido. Cada grupo de enrolamento compreende diversas voltas solenoides. A figura 16 mostra um dos dois grupos de enrolamento de bobina de transmissão externos 1681 (sendo que o outro está localizado no lado oposto do plano do centro 1680), metade do grupo de enrolamento de bobina de transmissão central 1682 (sendo que a outra metade está localizada no lado oposto do plano do centro 1680, e um dos dois grupos de enrolamento de bobina de recepção 1686 (sendo que o outro está localizado no lado oposto do plano do centro 1680).

[0023] Cada grupo de solenoide de "controle de acoplamento" 1614 compreende um par de grupos de enrolamento de bobina de recepção 1683, 1684, enrolados no mesmo sentido como os grupos de enrolamento formadores de campo, e um grupo de enrolamento de bobina de transmissão 1685, enrolado no sentido oposto. Todas as bobinas nos dois grupos associadas à bobina de transmissão estão ligadas em série, tal como todos os que estão associados à bobina de recepção. A bobina e número de posições de voltas são selecionados para produzir um fluxo de RF, orientado axialmente de modo substancialmente uniforme, através do volume sensível, desse modo, criando condições para RMN, enquanto cancelam, simultaneamente, a indutância mútua das bobinas de transmissão e recepção. O sistema de "bobinas de acoplamento zero" está descrito em EP-A-0837338 de *Slade*. Além disso, tal como também descrito em *Slade* '388, a configuração do sistema de bobina de RF duplo é tal que ele não gera qualquer sinal de RMN dentro da região do furo (por exemplo, de lobos de furo de vestígio). Consequentemente, a presente invenção não necessita do uso de bobinas de gradiente para cancelar o sinal do furo. A importância de ter três bobinas de transmissão no grupo "formador de campo" central é descrita abaixo.

[0024] A ferramenta tem um tubo de lama 160 com um furo central livre 106 e várias aberturas 161-164 para levar lama de perfuração para a broca 107, e o corpo principal da ferramenta está dotado de um colar de perfuração 108. Lama de perfuração é bombeada para baixo no tubo de lama 160 por uma bomba 121, voltando em torno da ferramenta e toda a ferramenta é girada por um acionamento 120. Tubulação enrolada ou uma coluna de perfuração pode ser usada para acoplar o acionamento ao conjunto do fundo do furo.

[0025] O colar de perfuração 108 possui uma reentrância 170 para enrolamentos de bobina 105 de antena de transmissão de RF e ante-

na de recepção de RF. Vãos nas cavidades entre os membros de ferrita macia são preenchidos com material não condutor 131, 135 (por exemplo, cerâmica ou plástico de alta temperatura) e as bobinas de RF 113, 114 são depois enroladas sobre os membros de ferrita macia 109, 110. As ferritas macias 109, 110 e o conjunto de bobina de RF são impregnados sob pressão, com temperatura elevada apropriada, com resina de epóxi de baixa viscosidade (não mostrada), para endurecer o sistema contra os efeitos de vibração, vedar contra fluido de perfuração à pressão do poço, e reduzir a possibilidade de oscilações magneto-acústicas. As bobinas de RF 113, 114 são depois cobertas com placas antidesgaste 111, tipicamente, cerâmica ou outro material não condutor, durável, para proteger as mesmas contra lascas de rocha, que correm para cima pela ferramenta na lama do furo.

[0026] Devido à configuração magnética axialmente simétrica, o dispositivo de *Slade* tem um campo magnético axialmente simétrico e uma região de investigação 112 que não é afetada pela rotação da ferramenta. O uso de ferrita resulta em uma região de investigação que está próxima ao furo. Esse não é um problema importante um uma ferramenta de MWD, porque há pouca invasão da formação por fluidos de perfuração do furo, antes da avaliação. A região de investigação está dentro de um envoltório, com uma espessura radial de cerca de 20 mm e um comprimento axial de cerca de 50 mm. O gradiente dentro da região de investigação é de menos de 2,7 G/cm. Deve ser observado que esses valores são para o dispositivo de *Slade* e, tal como observado acima, o método da presente invenção também pode ser usado com outros dispositivos de RMN apropriados.

[0027] Em geral, a geometria do dispositivo de medição de RMN dá origem a um volume na formação terrestre, onde o campo B_0 tem a potência correta para satisfazer uma condição de ressonância e no qual um campo de RF pode ser apresentado com potência substancial

e orientação para reorientar spins nucleares dentro do volume. Esse volume é frequentemente chamado de volume sensível. Para uma ferramenta em movimento, quando a ferramenta se move axialmente, o volume que contém os prótons excitados pelo pulso de excitação (primeiro pulso da sequência de eco) move-se para fora do volume sensível. Portanto, o número de spins disponível para contribuir para o sinal de RMN subsequente é reduzido com cada eco subsequente. Em consequência, esses ecos obtidos posteriormente, em uma sequência de ecos com movimento axial da ferramenta apresentam-se menores em comparação com os ecos obtidos posteriormente em uma sequência de ecos sem movimento da ferramenta. "Ecos posteriores" não significa que apenas os últimos ecos de uma sequência são afetados. Na verdade, a perda de sinal começa exatamente no começo de uma sequência e desenvolve-se ao longo do tempo em um padrão particular.

[0028] A configuração magnética da figura 2 produz um campo magnético estático B_0 um tanto heterogêneo. Medido na direção axial, esse campo tem uma mínima no centro do sensor de RMN e aumenta em tamanho para uma máxima, nos ímãs. O resultado dessa configuração em um volume de formação atravessado em uma direção axial é que durante o movimento axial constante, a formação primeiramente chega próxima a um dos ímãs e é magnetizada por esse campo mais alto. Quando o centro do sensor de RMN se aproxima, o campo B_0 efetivo diminui. Mas a formação "se lembra" da magnetização mais alta anterior e só diminui gradualmente, com a constante de tempo T_1, em direção ao campo B_0 de magnetização de equilíbrio mínimo, localizado no centro.

[0029] A possibilidade mais simples de saturar RMN é por um pulso de RF único de 90°. Mas, qualquer pulso subsequente gera um eco de RMN. Além disso, a regulagem do comprimento ou altura de pulso é crítica. Considerando que na ferramenta de avaliação descrita aci-

ma, o campo B_1 é bastante heterogêneo, e B_1 não é ortogonal a B_0 em todos lugares, torna-se óbvio que um único pulso de 90° é simpels demais. Historicamente, uma série de pulsos tem sido usada com a ideia de que qualquer magnetização z deixada pelo pulso prévio é transformada no plano xy pelo pulso seguinte e, portanto, a magnetização z é destruída. Por razões de simplicidade, tempos de espera iguais foram usados entre os pulsos, isto é, uma sequência de pulsos periódica. Isso funciona bem para materiais sólidos, onde o tempo de relaxação transversal T_2 normalmente é de ordens de tamanho mais curtos do que o tempo de relaxação longitudinal T_1. Mas, existe um empecilho com esse método, quando aplicado a líquidos com T_2 longo. Um eco é criado por quaisquer dois pulsos sucessivos – exatamente no momento em que é aplicado um terceiro pulso. Como o terceiro pulso é aplicado durante o eco, quando os spins no plano xy são focalizados, esse pulso transforma a magnetização xy em z. Isso é indesejável. Wolfgang Dietrich (*Dietrich 1976*) sugeriu uma sequência aperiódica, onde os tempos de interpulsos formam uma sequência geométrica de tempos decrescentes.

[0030] Uma sequência de saturação aperiódica (APS) desse tipo foi simulada para a ferramenta de avaliação da figura 2. A APS compreende oito pulsos de RF, com tempos de interpulso decrescentes, 6400 μs, 3200 μs, 800 μs, 400 μs, 200 μs, 100 μs. Para aumentar ainda mais a eficiência, as fases são cicladas como 0°, 180°, 90°, 270°, 0°, 180°, 90° e 270°. Portanto, a duração total dessa sequência é de 12,7 ms vezes 8 vezes o comprimento dos pulsos de RF.

[0031] Essa sequência de saturação é eficiente quando a ferramenta de avaliação é estacionária, torna-se crescentemente ineficiente durante perfuração rápida com ROP alto. A figura 3 mostra a magnetização nuclear 301 como uma fração da magnetização de equilíbrio 1 segundo depois da sequência de saturação aperiódica. A magnetiza-

ção (ordenada) como uma fração de magnetização de equilíbrio é traçada contra ROP (abscissa) em m/h. Vê-se que para ROP zero, a saturação é perfeita (a magnetização é zero). Para ROP de 100 m/h, a saturação é ineficiente e mais da metade da magnetização de equilíbrio é deixada.

[0032] Um efeito de escoamento é a razão pela qual a saturação da figura 3 não funciona bem durante movimento axial. Por exemplo, a 100 m/h, a ferramenta move-se cerca de 30 mm dentro do tempo de espera de 1 s, ou, expresso de outro modo, depois de 1 s a região saturada moveu-se por 30 mm em relação à ferramenta de RMN. Os voxels saturados moveram-se em alto grau para regiões com campo B_0 mais baixo ou mais alto, enquanto formação nova, não saturada, moveu-se para dentro da região sensível. Essa nova formação não estava saturada, porque no momento em que os pulsos de saturação foram aplicados, esta formação estava exposta ao campo B_0 mais alto ou mais baixo, fora da largura de banda da saturação. A solução do problema é, portanto, usar uma saturação de banda larga. Existem muitas maneiras diferentes para obter isso e são descritas com referência à figura 15.

[0033] O formato do volume de RMN sensível é determinado 1501. Esse é o volume onde B_0 está próximo ao B_0 ressonante. "Próximo" significa dentro da largura de banda equivalente de pulsos de RF e receptor de RMN. Vide a figura 4 abaixo, para um exemplo. Dependendo do tempo de espera TW e ROP max, o SV no mapa de campo magnético é deslocado 1503 por uma distância "d" na direção de movimento. Isso também está ilustrado acima na figura 4. A seguir, para o SV deslocado para dos os elementos de volume (voxels) B_0 e B_{1n} são determinados 1505, sendo que B_{1n} é o componente de B_1 que está ortogonal a B_0. Os voxels do volume sensível deslocado são classificados em um mapa bidimensional 1507de eixo horizontal B_0 e eixo verti-

cal B_{1n}. Isso está ilustrado na figura 6. Uma média ponderada de B_{1n} é calculada 1509 para cada B_0, sendo que os pesos são os componentes B_1 da bobina de recepção, que são ortogonais a B_0. Os pesos levam em consideração a sensibilidade da bobina de recepção para um voxel específico do SV. Vide, por exemplo, a figura 8. Chamaremos a função resultante de $A(B_0)$. A seguir, $A(B_0)$ é invertido 1511 para obter $f(B_0)=1/A(B_0)$, onde $f(B_0)$ é o espectro de frequência agora otimizado, que tem de se aplicado para saturação. Para saturação de RMN eficiente, esse espectro de frequência é aplicado com cada pulso de RF da sequência de pulsos aperiódica (APS). Isso irá saturar os spins em uma região que inclui as regiões originais 1501 e as deslocadas 1503.

[0034] Há pelo menos três maneiras de aplicar o espectro de frequência determinado acima pra saturação de RMN. Os mesmos são:

A. Modulação de frequência. Isso pode ser feito com velocidade e amplitude de sweep variáveis, velocidade de sweep variável com amplitude constante, e velocidade de sweep fixa com amplitude variável. Todos esses podem ser contínuos ou em passos separados (aplica-se à frequência e à amplitude).

B. Modulação de fase. Isso pode ser feito com uma velocidade de mudança de fase variável e amplitude variável, algumas vezes chamada de modulação de amplitude complexa (por exemplo, para minimizar energia, tal como descrito no documento US 6,686,737 para Kruspe *et al.*, com o mesmo cessionário como a presente invenção). Isso também pode ser feito com velocidade de mudança de fase variável e amplitude constante. Isso pode ser feito com uma velocidade de mudança de fase quadrática e amplitude variável (descrita a baixo). Todos esses podem ser contínuos ou em etapas separadas (aplica-se à frequência e à amplitude).

C. Outros métodos, por exemplo, pulsação estocástica)

[0035] O uso de pulsação estocástica (com baixa necessidade de

energia) está descrito no documento US 7,015,694 para Blumich, com o mesmo cessionário como a presente invenção.

[0036] Sweeps de frequência e modulação de fase podem ser projetados para fazer exatamente a mesma coisa, sendo que a única diferença é a execução. Deve ser observado, ainda, que uma saturação de banda larga usando o sweep B_0, tal como descrito no documento U.S. 6,844,728 para Speier *et al.* é equivalente a um sweep de frequência. Portanto, os métodos descritos aqui de um sweep de frequência sob medida também são aplicáveis aos métodos de saturação que usam um sweep de B_0. Nas modalidades abaixo, são descritos apenas métodos que trabalham com pulsos de RF de amplitude constante.

[0037] Voltando à figura 4, a região sensível da ferramenta de RMN descrita acima é mostrada por 401. A abscissa é a distância do eixo do furo e a ordenada é a distância ao longo do eixo do furo. A região sensível 403 corresponde a um deslocamento da região 401 por uma distância 'd'.

[0038] Para a eficiência do pulso de RF, apenas o componente B_1 que é ortogonal a B_0 é significativo. A figura 5 mostra todos os voxels 501 do volume sensível (401 na figura 4), agora classificado de acordo com seu componente de campo B_0 e campo B_1, que é ortogonal ao campo B_0. A abscissa é o campo B_0 em unidades arbitrárias. De modo similar, a ordenada é o componente B_1 que é ortogonal ao campo B_0. A linha 503 é o campo B_1 de referência no raio nominal da região de investigação e z=0 e é repetida, em cada caso, como 603, 705 e 805 nas figuras 6 a 8. A figura 6 mostra um traçado equivalente de todos os voxels 601 do volume sensível deslocado (403 na figura 4), agora classificados de acordo com seu componente de campo B_1, que é ortogonal ao campo B_0. 603 é o campo B_0 de referência. A seguir, mostrados nas figuras 7-8 estão valores ortogonais B_1 médios versus cam-

po B_0. 701 é a média simples para o volume sensível não deslocado, 703 é uma média ponderada com pesos proporcionais ao componente B_1 ortogonal, e 705 é o valor B_1 de referência. 801 é a média simples para o volume sensível não deslocado, 803 é uma média ponderada com pesos proporcionais ao componente B_1 ortogonal, e 805 é o valor B^1 de referência.

[0039] A figura 8 mostra que a média de B+1 ortogonal varia por um fator de 4 sobre os campos de B_0 do volume sensível deslocado. Isso significa que a melhor saturação no campo B_0 mais alto (na extrema direita na figura), a intensidade de RF precisa ser 4 vezes a do pico da curva. Em uma modalidade, são usados pulsos com amplitude constante. Para variar a intensidade do espectro de frequência, podem então escolher o comprimento de irradiação apropriado a cada frequência. Precisa, no entanto, ser considerado que quanto mais longa for a irradiação a uma frequência específica, tanto menor fica a largura de banda a essa frequência. Portanto, quanto mais longos os componentes do pulso, tanto mais próximo precisa ser o espaçamento da frequência. Um exemplo talhado é mostrado por 901 na figura 9. A abscissa é tempo e a ordenada é frequência. A figura 10 mostra o espectro de frequência 1001 do pulso 901. A abscissa é a frequência. 1003 mostra, para comparação, o tamanho da distribuição de frequência de um pulso retangular simples à frequência de RMN nominal. A frequência de RMN nominal é a frequência de ressonância de RMN para um ponto na formação que está a um raio nominal em z=0.

[0040] Para os resultados da simulação abaixo, presume-se que $|B_1|$, ou de modo equivalente, a corrente transmissora é independente da frequência. Isso pode não ser verdade em uma ferramenta de RMN real. Esse efeito não é considerado na simulação, mas é fácil de manejar.

[0041] Com referência, agora, à figura 11, são mostrados resulta-

dos de simulação para o pulso 901. A curva 1101 é para o pulso 901, executado como uma sequência de pulso aperiódica, com fases de 0°, 180°, 90°, -90°, 0°, 180°, 90° e -90°. Observa-se que a magnetização residual depois da saturação de frequência variável talhada com uma sequência de pulsos aperiódicas é de menos de 4% do equilíbrio total, comparada com cerca de 55% na figura 3.

[0042] Como uma alternativa à modulação de frequência, pode ser usada a modulação de fase. Se for possível uma modulação de fase contínua, pode ser gerado um pulso, que é completamente equivalente ao pulso modulado em frequência 901. Descreve-se aqui uma execução específica, na qual a modulação de fase está limitada a etapas de 90°. Mesmo com essa limitação rude, é possível construir um pulso de banda larga.

[0043] Um sinal modulado em fase pode ser escrito como $\cos(\omega t+\phi(t))$. Se a fase for constante, obtém-se o sinal $\cos(\omega t+\phi)$, um sinal com frequência angular constante ω. Se a mudança de fase for linear em tempo, então $\phi(t)=ct$, e obtém-se o sinal $\cos(\omega t+ct)=\cos(\omega+c)t$, isto é, um deslocamento constante da frequência por uma quantidade c, comparado com o sinal não modulado. Se a mudança de fase for quadrática em tempo $\phi(t)=ct^2$, obtém-se o sinal $\cos(\omega+ct)t$, um sinal com uma frequência deslocada ct, do qual a frequência deslocada está constantemente crescente em tempo. Esse é um sweep de frequência linear.

[0044] Submetida à limitação de mudanças em fase por etapas de 90°, a execução de uma mudança de fase em tempo quadrática, aproximada, é mostrada nas figuras 12A, 12B. 1201 e 1203 mostram os sinais em fase e de quadratura, enquanto 1251 e 1253 mostram, em cada caso, a amplitude e a fase. O espectro de frequência é mostrado na figura 13 pela curva 1301, enquanto 1303 é o espectro de um pulso retangular.

[0045] Abordando, a seguir, a figura 14, é mostrada uma comparação entre as eficiências do pulso retangular simples 1401, o pulso de frequência variável 1405 da figura 9, e a modulação de fase graduada, uma aproximação da modulação de fase de quadratura 1403 das figuras 12A, 12B. A eficiência da modulação de fase graduada 1403 na figura 14 é melhor do que a do pulso retangular 1401, mas pior do que a do sweep de frequência talhado 1405. A eficiência da modulação de fase graduada pode, no entanto, ser aperfeiçoada. Isso é possível desviando-se da mudança de fase quadrática simples, com o objetivo de obter um espectro de frequência que não é "retangular", tal como 1301 na figura 13, mas tem um formato mais parecido com 1001 na figura 10.

[0046] Em vista da descrição acima, as vantagens de ter uma bobina de RF apenas para fins de saturação tornam-se evidentes. A saturação de RF para fins de saturação pode ser igual ou adicional à bobina de RF, que é usada para transmitir e receber sinais. Uma vantagem de ter uma bobina de saturação separada da bobina de recepção é que é possível ter o campo de saturação mais forte e mais ortogonal ao campo estático.

[0047] Com referência, agora, à figura 16, a vantagem da estrutura do grupo solenoide "formador de campo" é descrita. Embora não considerado por *Slade*, diversas modificações podem ser feitas em vista da descrição acima. Para tratar do problema devido à largura de banda limitada da antena de transmissão, pode ser usada a pluralidade de bobinas de transmissão para os pulsos de saturação. Cada antena pode ser voltada para uma frequência diferente. Uma outra vantagem é que essa(s) antena(s) pode(m) estar mais próxima(s) da região onde a saturação é desejada; isso aperfeiçoa, ao mesmo tempo, a ortogonalidade entre os campos B_1 e B_0, aumentando ainda mais a eficiência dessa(s) antena(s) de saturação. Além disso, a excitação das bobinas

de transmissão nos lados opostos do plano central pode ser tornada assimétrica, de modo que a região saturada é maior na direção do movimento da ferramenta do que na direção oposta. Usando técnicas de modelação apropriadas, também é possível alterar dinamicamente o campo B_1, com base em uma velocidade de penetração média da broca de perfuração.

[0048] Abordando, agora, a figura 17, é mostrada uma ferramenta de RMN com um dos ímãs permanentes 103, a linha central 1680, o núcleo da antena 109 e uma bobina de transmissão 1701. A direção do campo B_0 é dada pelas setas de linha cheia 1703 e as linhas do campo de RF são dadas pelas setas duplas 1705. Também está mostrada na figura a região entre as linhas de contorno ponteadas 1711, que precisa ser saturada para um bom sinal de RMN. Com o movimento da ferramenta, essa região move-se pra dentro da região entre as linhas 1713. Pode ser visto que a ortogonalidade está satisfeita na região entre as linhas 1713, mas não está satisfeita na região entre as linhas 1711 (a região para saturação).

[0049] A figura 18 mostra, além da ferramenta da figura 17, uma bobina de saturação 1801. Existe agora uma boa ortogonalidade entre as linhas do campo de RF 1805 da bobina de saturação e as linhas B_0 1703.

[0050] Dados adquiridos pela ferramenta de avaliação de RMN podem ser usados usando métodos conhecidos para determinar propriedades deformação, tais como porosidade, uma distribuição de T_2, uma distribuição de T_1, e uma permeabilidade, e para registrar as propriedades da formação determinadas em um meio apropriado. Tal como observado acima, a saturação que usa os métodos descritos acima é particularmente útil quando seguida de um DTW para determinação das distribuições de T_2 afetadas por T_1 e tipificação do fluido, e por uma sequência de recuperação de saturação para determinação das

distribuições de T_1. Esses métodos não estão descritos aqui.

[0051] A descrição foi descrita com referência a um dispositivo de RMN que é parte de um BHA transportado em uma coluna de perfuração. A descrição é aplicável igualmente a dispositivos de RMN transportados em tubulações enroladas, linha de fios e cabo *slickline*, como parte da série de avaliação. Coletivamente, a série de avaliação e o BHA podem ser chamados de conjunto de fundo de poço. O controle descrito no presente pode ser feito usando um processador de fundo de poço e os resultados ser armazenados em uma memória no fundo do furo ou passados por telemetria para a superfície. Alternativamente, os dados podem ser armazenados em uma memória no fundo do furo e processados quando o BHA é recolhido do furo. Com capacidade de telemetria aperfeiçoada, deve ser possível passar as medições por telemetria para um local na superfície e fazer ali o processamento.

[0052] Está implícito no processamento de dados o uso de um programa de computador, executado em um meio legível por máquina apropriado, que possibilita ao processador realizar o controle e o processamento. O meio legível por máquina pode incluir ROMs, EPROMs, EAROMs, memórias flash e discos ópticos.

[0053] Embora a descrição precedente esteja voltada para as modalidades específicas da invenção, diversas modificações ficam evidentes para os que são versados na técnica.

REIVINDICAÇÕES

1. Aparelho para avaliar uma formação terrestre, o aparelho compreendendo:

um conjunto de fundo de poço (90) configurado para ser transportado em um poço (26);

uma disposição de ímãs em uma ferramenta (79) no conjunto de fundo de poço (90), configurada para gerar um campo magnético estático na formação terrestre;

pelo menos uma bobina (113, 114) de radiofrequência (RF) no conjunto de fundo de poço (90), configurada para gerar um campo de RF na formação terrestre; e

um processador (40), configurado para:

- ativar a pelo menos uma bobina (113, 114) de RF com pelo menos uma primeira sequência de pulsos, que satura, substancialmente, spins nucleares em uma região da formação terrestre, e

- ativar a pelo menos uma bobina (113, 114) de RF com pelo menos uma segunda sequência de pulso que gera pelo menos um sinal da região de saturação substancial de spins e, não gera substancialmente nenhum sinal de fora da região;

em que há um movimento axial da ferramenta (79) entre um tempo de início da pelo menos uma sequência de pulsos e um tempo final da pelo menos uma sequência de pulsos;

caracterizado pelo fato de que o processador (40) está configurado, ainda, para alterar um espectro de frequência de pelo menos um pulso na pelo menos uma primeira sequência de pulsos, usando um formato da região e um campo magnético estático B_0 na região para uma condição de ressonância.

2. Aparelho, de acordo com a reivindicação 1, **caracteriza-**

do pelo fato de que o processador (40) está configurado, ainda, para:

usar o pelo menos um sinal para estimar pelo menos um de: (I) um tempo T_1 de relaxação longitudinal da formação, (II) um tempo de relaxação transversal T_2 da formação, e (III) um teor de fluido da formação.

3. Aparelho, de acordo com a reivindicação 1, **caracterizado pelo fato de** que o processador (40) está configurado, ainda, para alterar um espectro de frequência de pelo menos um pulso na pelo menos uma primeira sequência de pulsos, usando, ainda, um componente do campo magnético de RF B_1, que é substancialmente ortogonal ao campo magnético estático B_0.

4. Aparelho, de acordo com a reivindicação 1, **caracterizado pelo fato de** que a pelo menos uma sequência de pulsos compreende uma sequência de pulsos aperiódica.

5. Aparelho, de acordo com a reivindicação 4, **caracterizado pelo fato de** que a sequência de pulsos aperiódica compreende, ainda, pulsos com fases selecionadas do grupo que consiste em: (i) 0°, (ii) 90°, (iii) 180°, e (iv) 270°.

6. Aparelho, de acordo com a reivindicação 1, **caracterizado pelo fato de** que o processador (40) está configurado, ainda, para alterar um espectro de frequência de pelo menos um pulso da pelo menos uma primeira sequência de pulsos por pelo menos uma de: (i) uma modulação de frequência, (ii) uma modulação de fase, e (iii) pulsação estocástica.

7. Aparelho, de acordo com a reivindicação 1, **caracterizado pelo fato de** que a pelo menos uma bobina (113, 114) de RF compreende, ainda, uma primeira bobina de RF, configurada para gerar a pelo menos uma primeira sequência de pulsos, e uma segunda bobina de RF, configurada para receber o pelo menos um sinal.

8. Aparelho, de acordo com a reivindicação 1, **caracteriza-**

do pelo fato de que a pelo menos uma bobina (113, 114) de RF compreende, ainda, pelo menos duas bobinas de RF, em que uma primeira bobina de RF substancialmente satura os spins nucleares na região, e uma segunda bobina de RF gera o pelo menos um sinal.

9. Aparelho, de acordo com a reivindicação 1, **caracterizado pelo fato de** que o conjunto de fundo de poço (90) está configurado para ser transportado para dentro do poço em um dispositivo de transporte selecionado de: (i) uma linha de fios, e (ii) uma tubulação de perfuração.

10. Método para avaliar uma formação terrestre, utilizando o aparelho como definido na reivindicação 1, o método compreendendo:

transportar um conjunto de fundo de poço (90) em um poço;

usar uma disposição de ímãs em uma ferramenta (79) no conjunto de fundo de poço (90), para gerar um campo magnético estático em uma região da formação terrestre;

usar pelo menos uma bobina (113, 114) de radiofrequência (RF) para gerar um campo de RF na região; e

ativar a pelo menos uma bobina (113, 114) de RF com pelo menos uma primeira sequência de pulsos, que satura, substancialmente, spins nucleares na região, e pelo menos uma segunda sequência de pulsos que gera pelo menos um sinal da região de saturação substancial de spins e, não gera substancialmente nenhum sinal de fora da região;

em que há um movimento axial da ferramenta (79) entre um tempo de início da pelo menos uma sequência de pulsos e um tempo final da pelo menos uma sequência de pulsos;

caracterizado pelo fato de que um espectro de frequência de pelo menos um pulso na pelo menos uma sequência de pulsos é alterado usando um formato da região e um campo magnético estático

B_0 na região para uma condição de ressonância.

11. Método, de acordo com a reivindicação 10, **caracterizado pelo fato de** que compreende, ainda,

usar o pelo menos um sinal para calcular pelo menos um de: (I) um tempo de relaxação longitudinal T_1 da formação, (II) um tempo de relaxação transversal T_2 da formação, e (III) um teor de fluido da formação.

12. Método, de acordo com a reivindicação 10, **caracterizado pelo fato de** que compreende, ainda, alterar um espectro de frequência de pelo menos um primeiro pulso na pelo menos uma sequência de pulsos, usando, ainda, um componente do campo magnético de RF B_1, que é substancialmente ortogonal ao campo magnético estático B_0.

13. Método, de acordo com a reivindicação 10, **caracterizado pelo fato de** que compreende, ainda, usar para a pelo menos uma primeira sequência de pulsos uma sequência de pulsos aperiódica.

14. Método, de acordo com a reivindicação 13, **caracterizado pelo fato de** que compreende, ainda, modular os pulsos da sequência de pulsos aperiódica com uma fase selecionada do grupo que consiste em: (i) 0°, (ii) 90°, (iii) 180°, e (iv) 270°.

15. Método, de acordo com a reivindicação 10, **caracterizado pelo fato de** que compreende, ainda, alterar um espectro de frequência de pelo menos um primeiro pulso na pelo menos uma sequência de pulsos por pelo menos uma dentre: (i) uma modulação de frequência, (ii) uma modulação de fase, e (iii) pulsação estocástica.

16. Método, de acordo com a reivindicação 10, **caracterizado pelo fato de** que compreende, ainda, usar uma primeira bobina de RF, para gerar a primeira ou segunda sequência de pulsos, e uma segunda bobina de RF, para receber o pelo menos um sinal.

17. Método, de acordo com a reivindicação 10, **caracterizado pelo fato de** que compreende, ainda, usar uma primeira bobina de RF, operada para substancialmente saturar os spins nucleares na região, e usar uma segunda bobina de RF, para gerar o pelo menos um sinal.

18. Produto de meio legível por computador, **caracterizado pelo fato de** conter instruções que, quando lidas por um processador (40), fazem com que o processador (40) execute um método para avaliar uma formação terrestre usando o aparelho como definido na reivindicação 1, o método compreendendo:

determinar uma propriedade de uma formação terrestre, selecionada de (I) um tempo de relaxação longitudinal T_1 da formação, (II) um tempo de relaxação transversal T_2 da formação, e (III) um teor de fluido da formação, usando pelo menos um sinal de uma formação terrestre adquirido por uma ferramenta (79) de ressonância magnética nuclear (RMN), após a aplicação de:

(a) um campo magnético estático na formação terrestre durante um movimento axial da ferramenta (79) de RMN,

(b) pelo menos uma primeira sequência de pulsos de radiofrequência (RF), que satura substancialmente spins nucleares em uma região da formação terrestre, e pelo menos uma segunda sequência de pulsos de rádio frequência (RF) que gera o pelo menos um sinal da região em que a pelo menos uma primeira sequência de pulsos não gera, substancialmente, nenhum sinal de fora da região e em que um espectro de frequência de pelo menos um primeiro pulso na pelo menos uma sequência de pulsos é alterado usando um formato da região e um campo magnético estático B_0 na região para uma condição de ressonância.

19. Produto de meio, de acordo com a reivindicação 18, **caracterizado pelo fato de** que ainda compreende pelo menos um den-

tre: (i) ROM, (ii) e EPROM, (iii) uma EAROM, (iv) uma memória flash, e (v) um disco óptico.

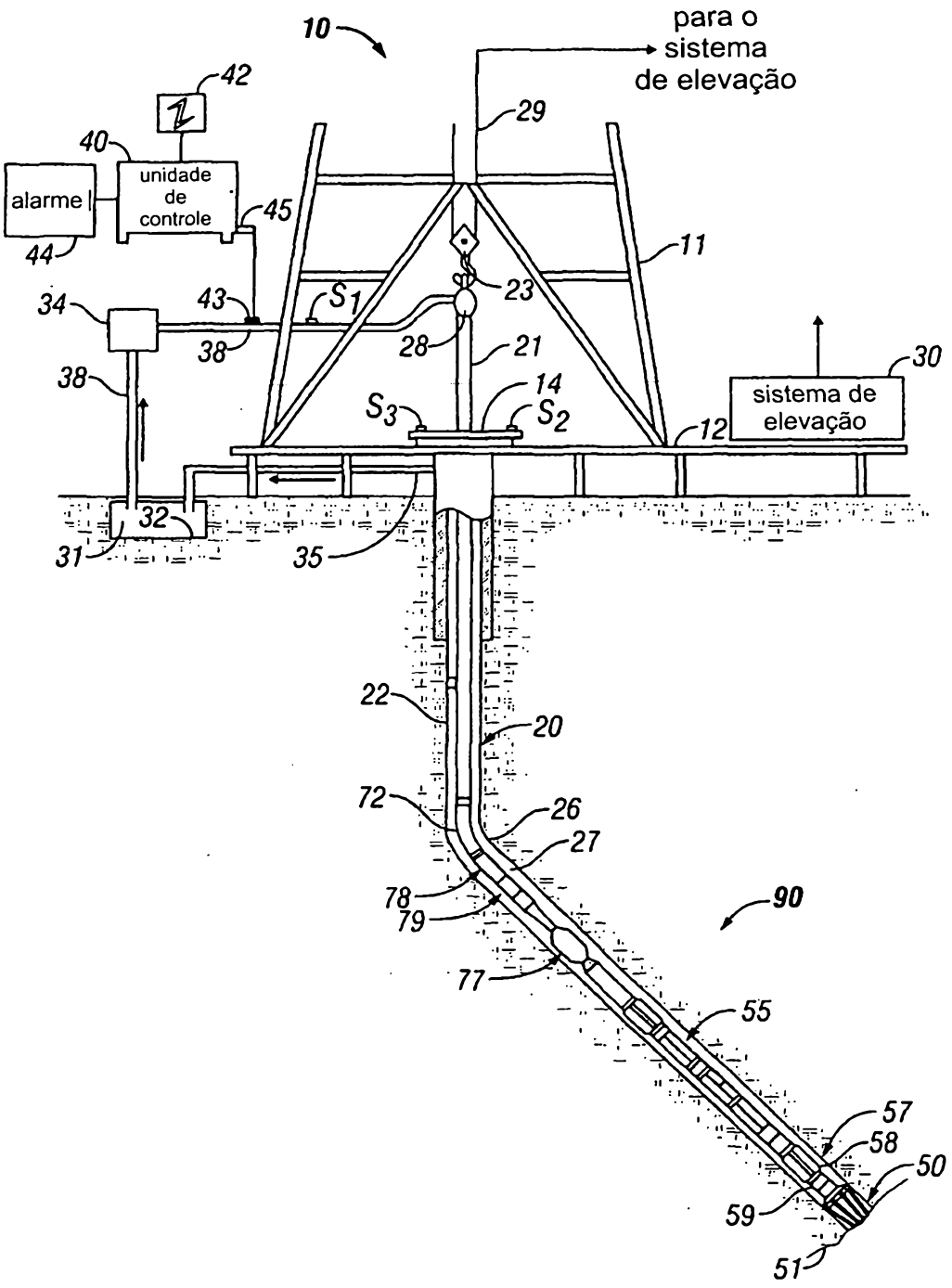


FIG. 1

(Técnica anterior)

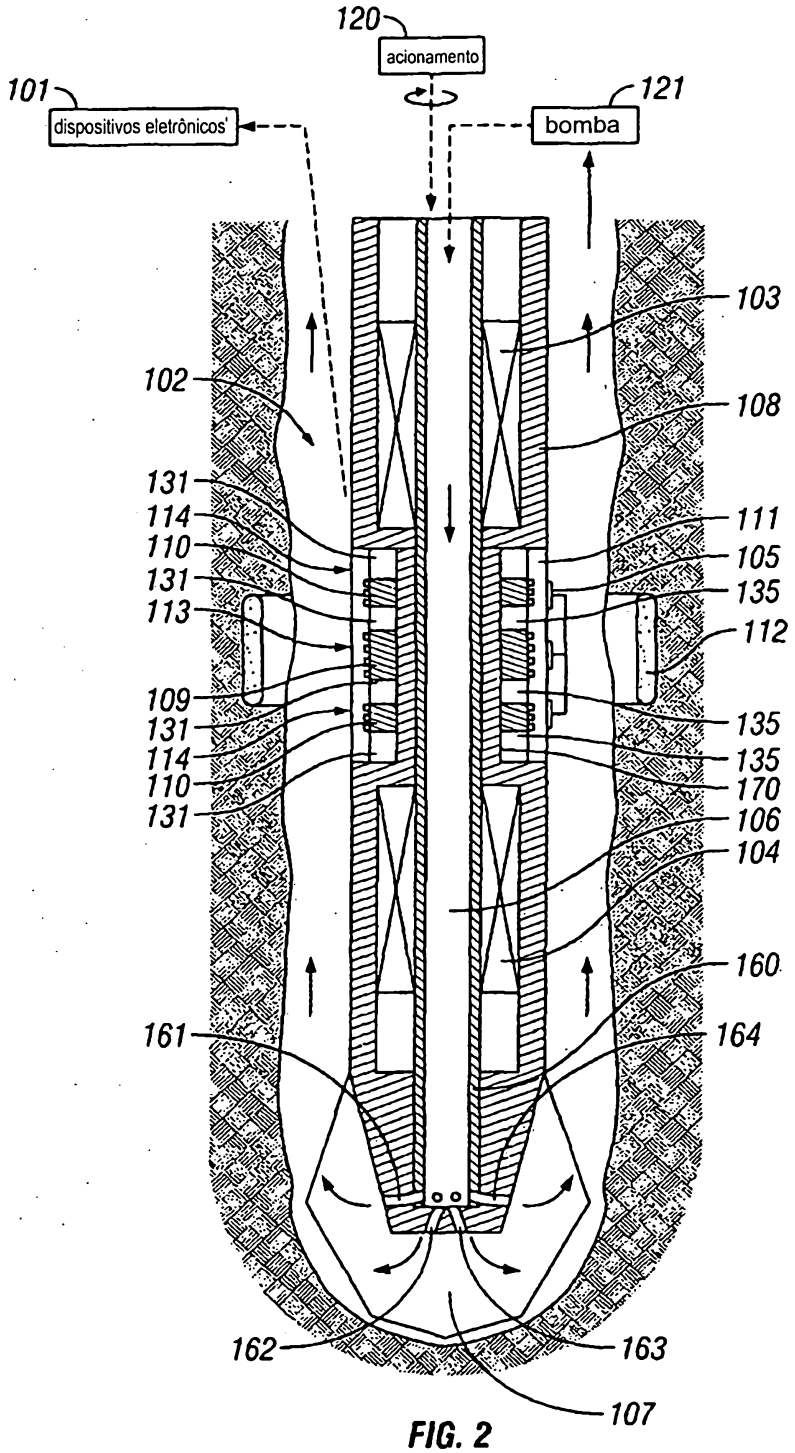


FIG. 2
(Técnica anterior)

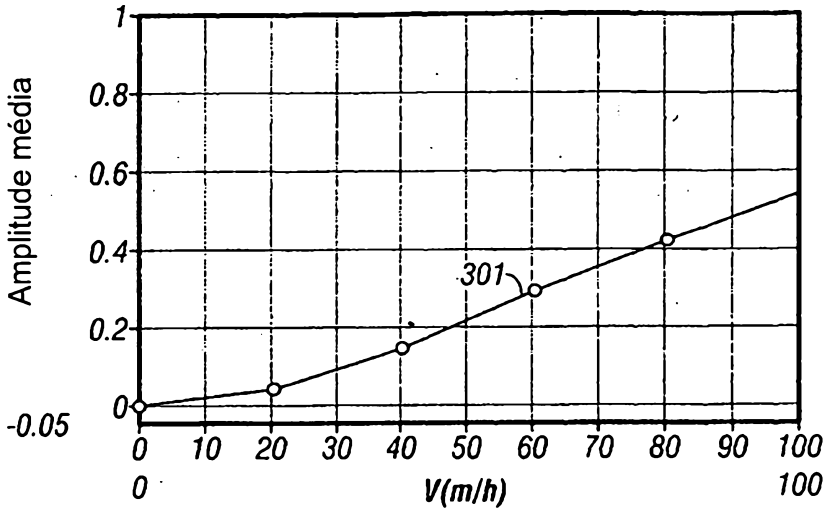

Amplitude média
1
0.8
0.6
0.4
0.2
0
-0.05
301
0 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100
0
V(m/h)
100

FIG. 3

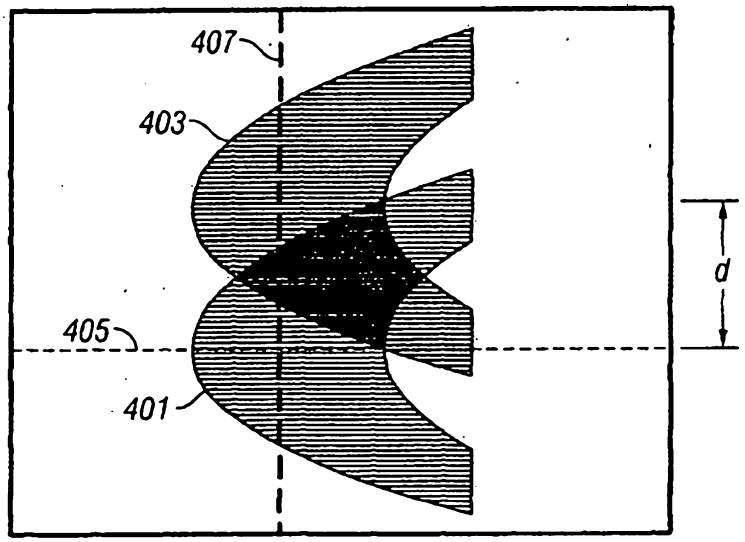

407
403
405
401
d

FIG. 4

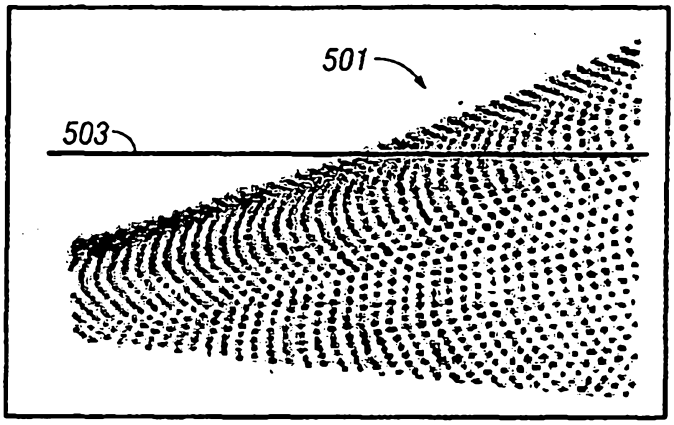


FIG. 5

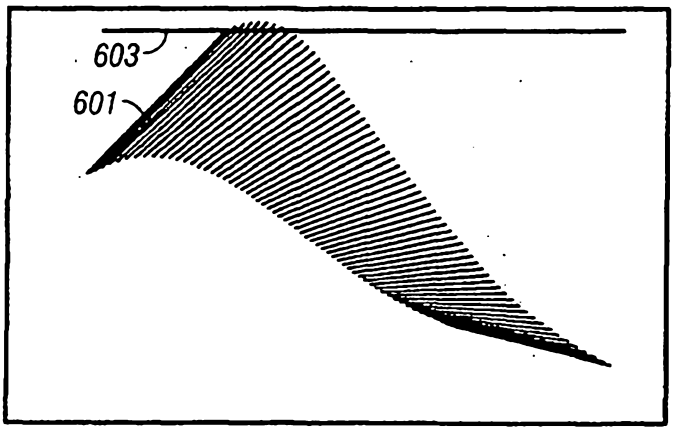


FIG. 6

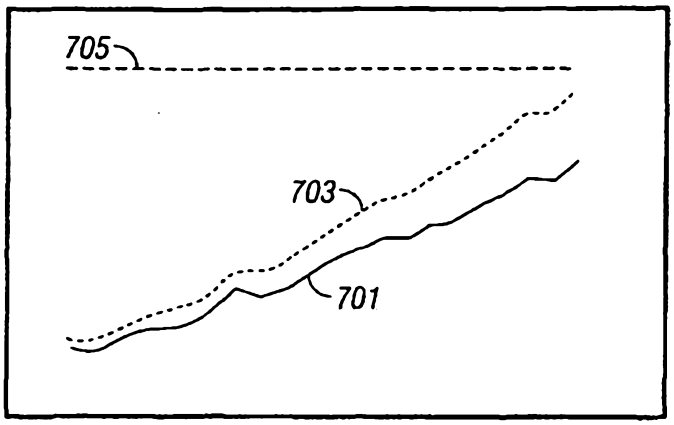


FIG. 7

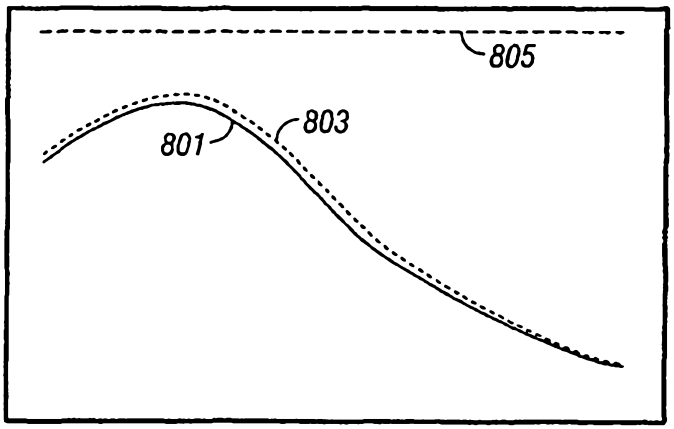


FIG. 8

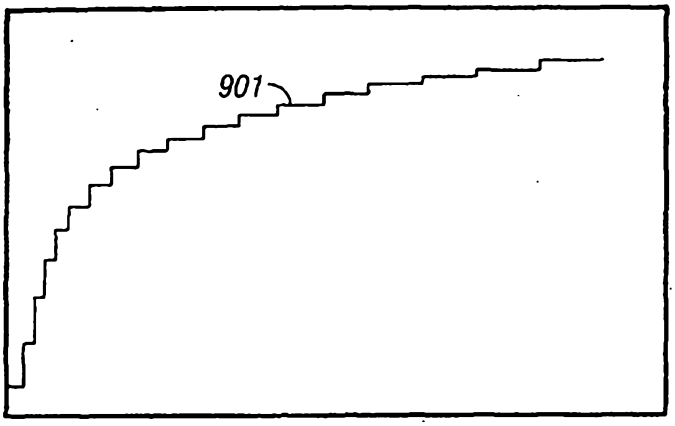


FIG. 9

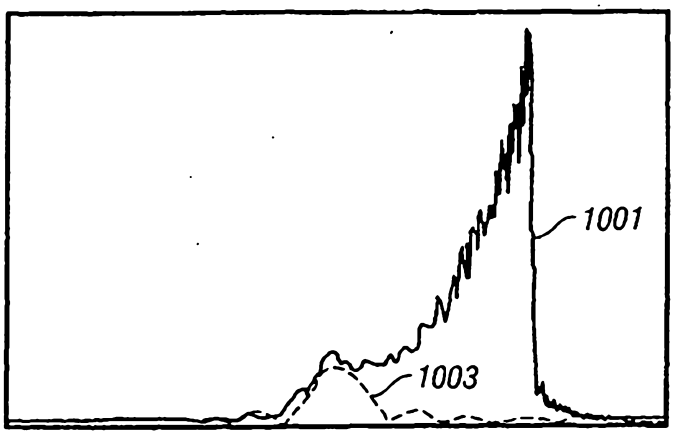


FIG. 10

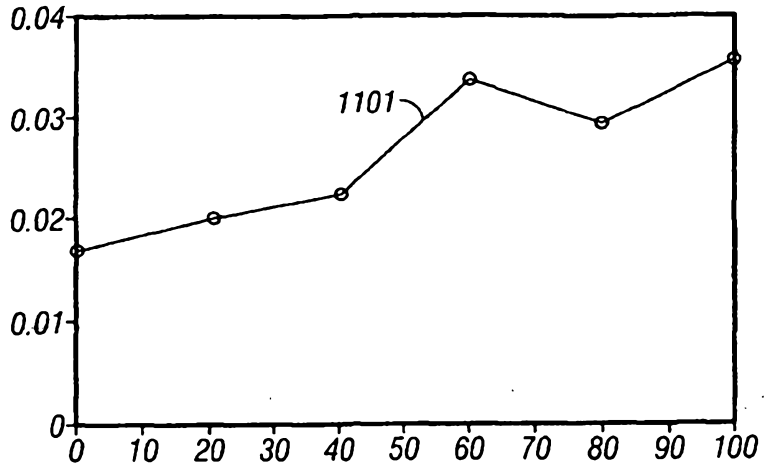


FIG. 11

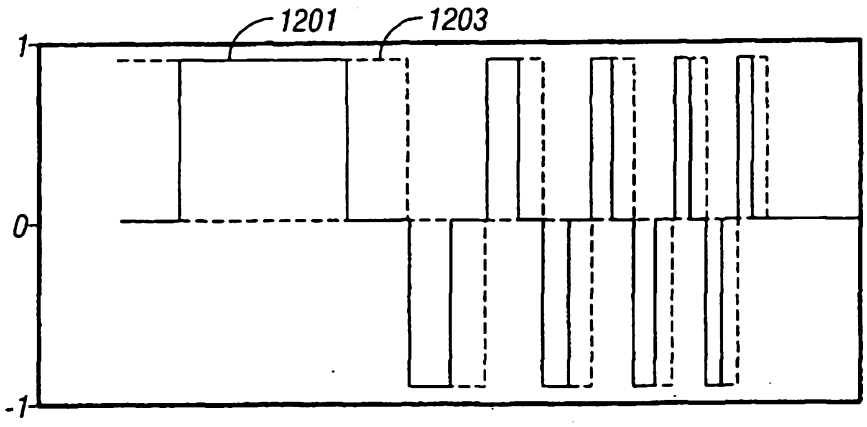


FIG. 12a

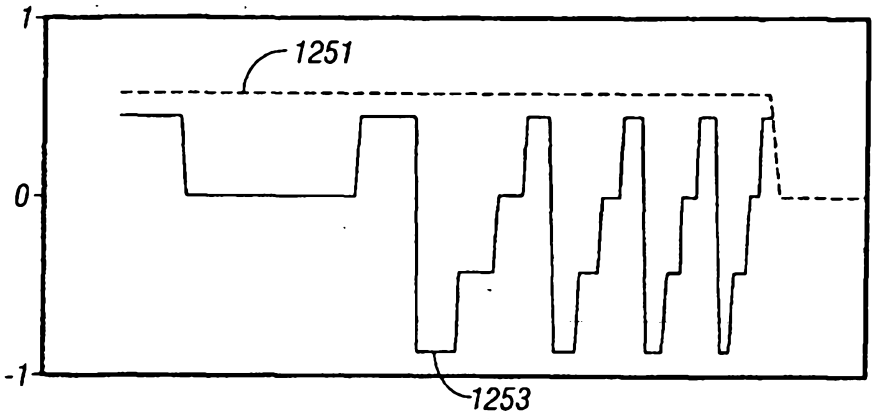


FIG. 12b

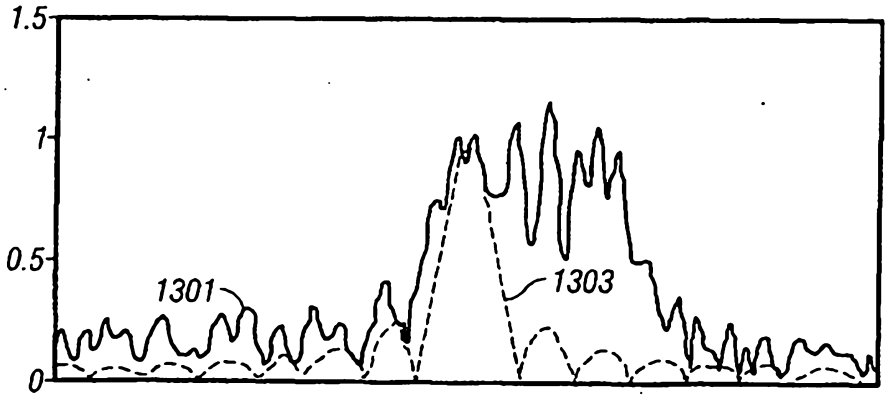


FIG. 13

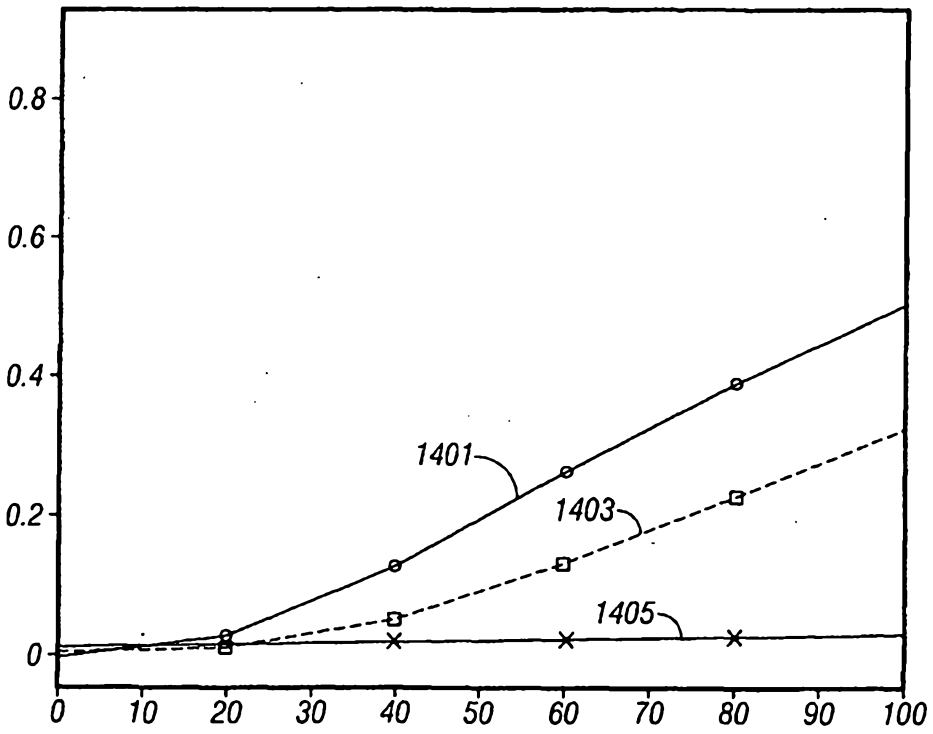


FIG. 14

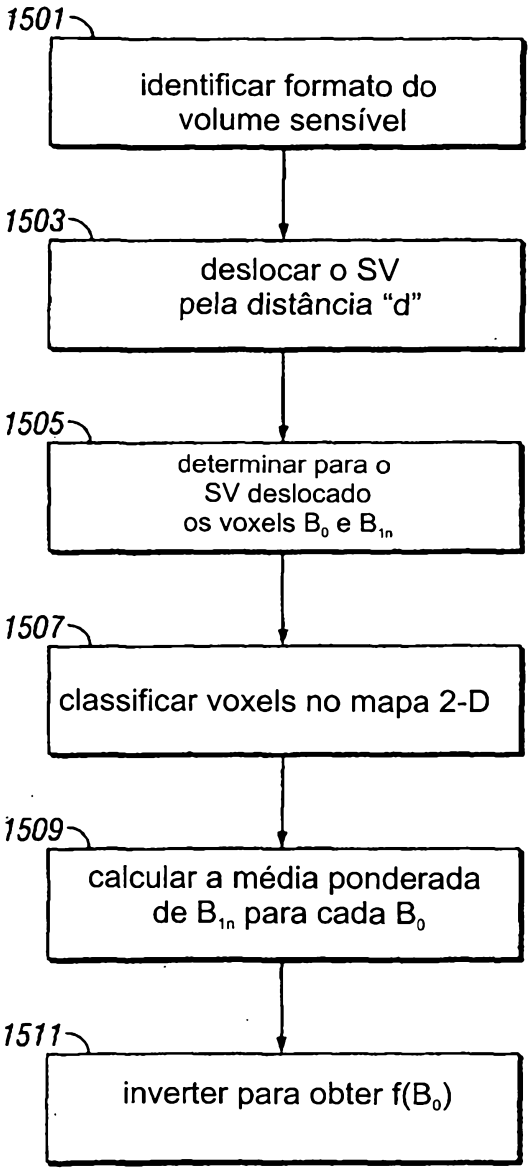

1501
identificar formato do volume sensível
1503
deslocar o SV pela distância "d"
1505
determinar para o SV deslocado os voxels B_0 e B_{1n}
1507
classificar voxels no mapa 2-D
1509
calcular a média ponderada de B_{1n} para cada B_0
1511
inverter para obter $f(B_0)$

FIG. 15

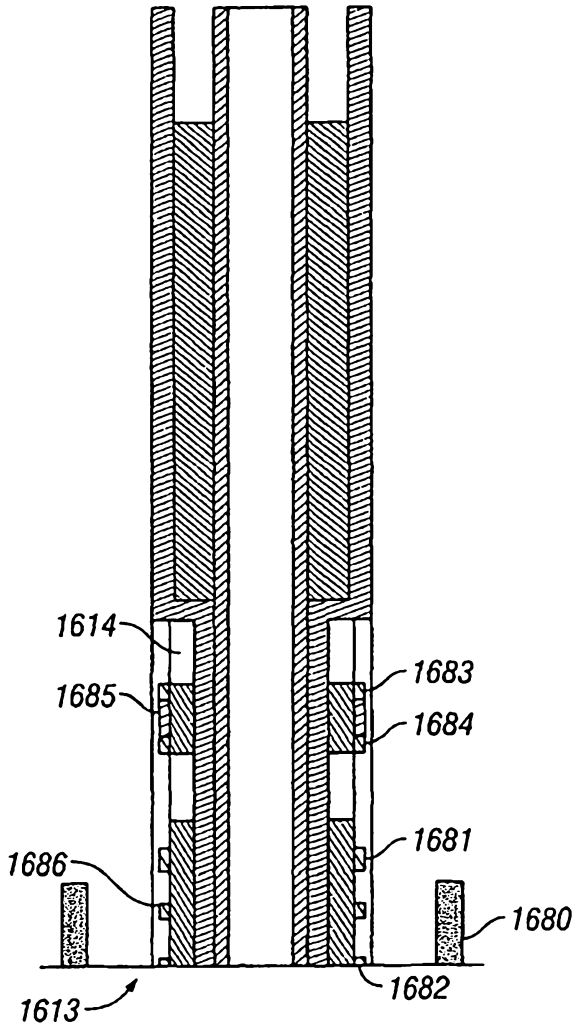


FIG. 16

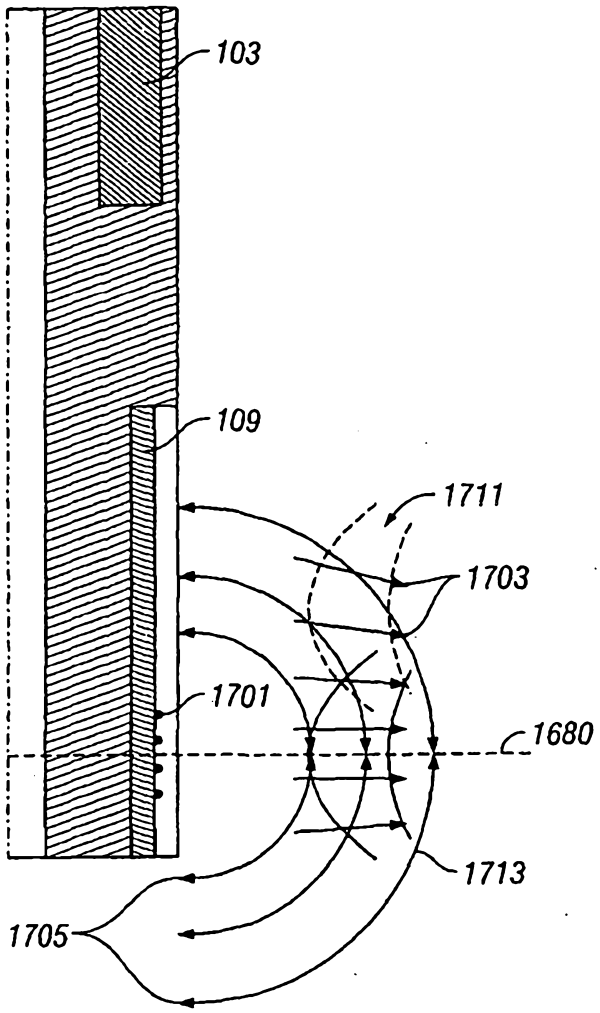


FIG. 17

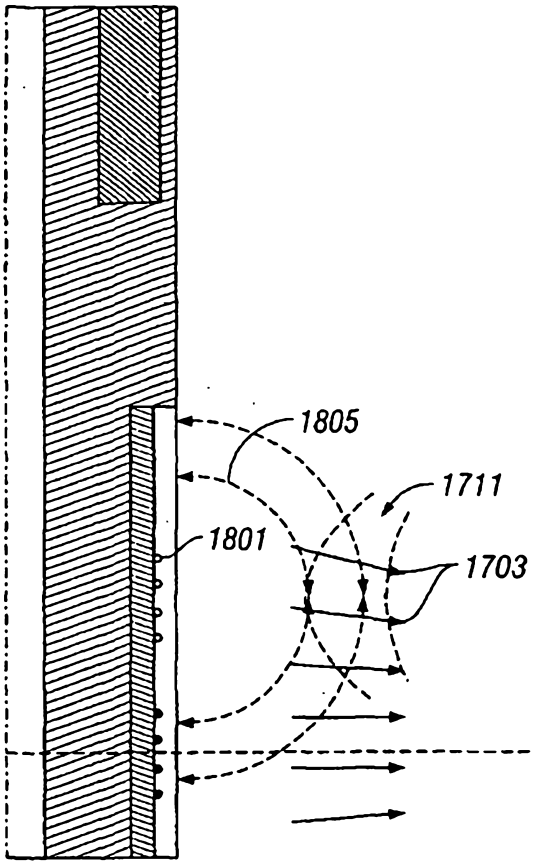


FIG. 18