



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

(21) **PI 1101201-3 A2**



(22) Data de Depósito: 23/03/2011  
(43) Data da Publicação: 16/04/2013  
(RPI 2206)

(51) *Int.Cl.:*  
A61K 31/395  
C07D 207/00  
C07D 255/00

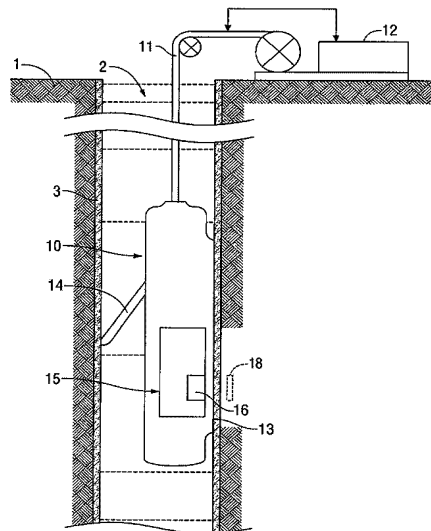
(54) **Título:** MÉTODO PARA USO EM CONJUNTO COM UM EQUIPAMENTO DE LABORATÓRIO QUE DEFINE UM VOLUME AMOSTRAL, EQUIPAMENTO DE LABORATÓRIO, E MÉTODO PARA USO EM CONJUNTO COM UM EQUIPAMENTO DE LABORATÓRIO QUE DEFINE UM VOLUME AMOSTRAL

(30) **Prioridade Unionista:** 24/03/2010 US 12/731,005

(73) **Titular(es):** Prad Research And Development Limited

(72) **Inventor(es):** Edmund J. Fordham, Jonathan Mitchel

(57) **Resumo:** MÉTODO PARA USO EM CONJUNTO COM UM EQUIPAMENTO DE LABORATÓRIO QUE DEFINE UM VOLUME AMOSTRAL, E EQUIPAMENTO DE LABORATÓRIO. Uma metodologia de RMN em laboratório (e equipamentos laboratoriais correspondentes) define um volume amostral. O método armazena dados da ferramenta que desce ao poço correspondentes a uma amostra portadora de hidrocarboneto coletada de uma dada formação subterrânea. Os dados da ferramenta que desce ao poço incluem parâmetros relativos a campos magnéticos utiliza dos por uma ferramenta que desce ao poço durante um conjunto de medições por RMN da dada formação subterrânea. A amostra é posicionada no volume amostral do equipamento de laboratório, que aplica um campo magnético estático ao volume amostral. Além disso, o equipamento de laboratório aplica um conjunto de medições por RMN ao volume amostral para desse modo determinar uma propriedade da amostra. As medições por RMN do conjunto de medições incluem uma sequência de pulsos do campo magnético oscilante em conjunto com um campo gradiente de modo pulsado. O campo gradiente de modo pulsado se baseia nos dados armazenados da ferramenta que desce ao poço correspondentes à amostra. Uma metodologia de RMN de laboratório para otimizar as medições de RMN no interior do poço é também descrita.



MÉTODO PARA USO EM CONJUNTO COM UM EQUIPAMENTO DE LABORATÓRIO QUE DEFINE UM VOLUME AMOSTRAL, EQUIPAMENTO DE LABORATÓRIO, E MÉTODO PARA USO EM CONJUNTO COM UM EQUIPAMENTO DE LABORATÓRIO QUE DEFINE UM VOLUME AMOSTRAL

## 5 Fundamentos da Invenção

### Campo da Invenção

Esta invenção se refere a instrumentos em laboratório e de sondagem que fazem uso de técnicas de ressonância magnética nuclear (RMN) para avaliar as

10 características de formações portadoras de hidrocarbonetos.

### Descrição da Técnica Relacionada

A introdução da ferramentas de perfilagem que utilizam ressonância nuclear magnética pulsada (RMN) no início dos anos 90 tem provido a indústria de petróleo com

15 métodos poderosos para avaliar os reservatórios de petróleo. As aplicações iniciais ferramentas de perfilagem por RMN pulsada, foram destinadas a proporcionar propriedades importantes da qualidade da rocha, tais como a porosidade total independente da litologia, porosidade

20 livre e vinculada a fluido, e permeabilidade.

Como é bem conhecido, a taxa de decaimento do sinal de RMN pode ser descrita, por exemplo, por uma distribuição dos tempos de decaimento, que são chamados de tempos de relaxação transversal ( $T_2$ ). É habitual ajustar os sinais

25 medidos de RMN a uma soma de diversos sinais exponenciais de decaimento simples, cada um com amplitude e tempo de

decaimento associados a  $T_2$ . O procedimento de ajuste é conseguido através de uma técnica matemática conhecida como inversão.

A medida da difusão tem se tornado uma importante  
5 função dos dispositivos de perfilagem de poços por RMN. Os sinais são atenuados pela difusão das moléculas do óleo, gás e salmoura através de gradientes no campo magnético estático. Esse efeito é o mecanismo físico que embasa todos os métodos autônomos de caracterização de fluidos por RMN.  
10 A difusão molecular é o movimento aleatório das moléculas. A constante da difusão molecular de uma molécula determina a distância média quadrática que a molécula irá se movimentar por unidade de tempo. A difusão das moléculas de gás e água pode ser descrita por uma única constante da  
15 difusão molecular. Os óleos brutos, por outro lado, têm distribuições das difusões moleculares que refletem a diversidade dos tamanhos moleculares em meio aos diversos componentes. Moléculas pequenas, de baixo peso molecular, tipo metano e etano, são relativamente móveis na fase  
20 gasosa e possuem constantes da difusão molecular ( $D$ ) que são tipicamente da ordem de magnitude maior que aquelas das moléculas da água. Em contraste, os óleos brutos com viscosidade de intermediária a alta têm constantes de difusão molecular, que são muito menores que os de água.  
25 Contrastes nessas constantes de difusão molecular dos fluidos na formação são exploradas por meio de medições

especialmente concebidas de RMN que sejam sensíveis à difusão. As medições realizadas pelo dispositivo de perfilagem de poços por RMN podem utilizar protocolos de campo de gradiente fixo. Os dados de RMN são então  
5 analisados para fornecer saturação de petróleo, gás e de salmoura.

A análise de RMN de bancada também é comumente realizada em instalações em laboratório de análises petrofísicas onde amostras de testemunhos de rocha são  
10 submetidos às medições por RMN que são sensíveis à difusão. Tais medições por RMN em laboratório geralmente utilizam um perfil de campo magnético estático homogêneo juntamente com um gradiente do campo magnético pulsado gerado pela aplicação de corrente contínua através de bobinas de  
15 gradiente colocadas em estreita proximidade com o volume amostral. Tipicamente, os protocolos utilizados pela análise por RMN em escala de bancada nas instalações de laboratório para estudos petrofísicos são diferentes em muitos aspectos, daqueles realizados pelos dispositivos de  
20 perfilagem em poços por RMN, devido a:

- a natureza mais homogênea do campo magnético estático da análise de RMN de bancada em relação ao campo magnético estático do dispositivo de perfilagem de poço por RMN;

- 25 - o uso preferencial de gradientes de campo pulsado, em oposição aos gradientes de campo fixo; e

- o uso preferencial da codificação da difusão da força do gradiente em tempo constante/variável em oposto à codificação da difusão da força do gradiente em tempo variável/constante.

5           Pelo fato da análise de RMN de bancada normalmente utilizar um protocolo diferente que os dispositivos de perfilagem de poços por RMN, é difícil comparar diretamente os dados de RMN produzidos por um dispositivo de perfilagem de poço por RMN e análise de RMN de bancada em relação a  
10           uma dada amostra da formação.

#### Breve Sumário da Invenção

A presente invenção permite a comparação direta dos conjuntos de dados de RMN produzidos por uma ferramenta de perfilagem de dados de poço por RMN e analisador da RMN em  
15           escala de bancada para uma dada amostra da formação. De acordo com a invenção, um método é fornecido para utilização em conjunto com um equipamento de laboratório que define um volume amostral. O método armazena os correspondentes dados da ferramenta que desce no poço,  
20           correspondente a uma amostra (por exemplo, amostra de testemunho de rocha), coletados a partir de uma dada formação subterrânea. Os dados da ferramenta que desce ao poço incluem parâmetros pertencentes aos campos magnéticos que variam com o tempo utilizados por uma ferramenta que  
25           desce ao poço durante as medições de RMN da dada formação subterrânea, bem como os dados da perfilagem por RMN

obtidos das tais medições por RMN. A amostra é posicionada no volume amostral do equipamento de laboratório. O equipamento de laboratório aplica medições por RMN ao volume amostral para determinar uma propriedade petrofísica da amostra. As medições por RMN empregam um campo magnético estático homogêneo no volume amostral, bem como uma sequência de pulsos do campo magnético oscilante em conjunto com um campo gradiente de modo pulsado. O campo gradiente de modo pulsado é baseado nos dados armazenados na ferramenta que desce ao interior do poço correspondente à amostra (ou seja, os parâmetros para as medições por RMN realizadas pela ferramenta que desce ao poço para derivar dados da perfilagem por RMN para a região da formação correspondente à amostra). As medições por RMN realizadas pelo equipamento de laboratório e os dados de RMN derivados podem ser diretamente comparados com o conjunto de dados de RMN produzidos pela ferramenta de perfilagem de poços por RMN.

A comparação da direção dos conjuntos de dados de RMN produzidos por uma ferramenta de perfilagem de dados de poço por RMN e analisador da RMN em escala de bancada podem ser usados para calibrar as interpretações petrofísicas constituídas das medições da perfilagem da sondagem, pelo fato de que no laboratório, o operador tem acesso a medições independentes com respeito às mesmas amostras de rocha e de fluido. Essas medições incluem (mas não se

limitam a), porosidade, distribuição de tamanho de poros, permeabilidade, saturação de água e óleo, viscosidade do óleo, e os indicadores da composição química do óleo cru, em que todas essas propriedades petrofísicas influenciam o

5 sinal RMN obtido, e para todas as quais existem métodos conhecidos de interpretação na técnica já existente. A importância das medições de referência surge porque a maior parte desses métodos de interpretação (tanto para propriedades de rocha ou de propriedades dos fluidos) estão

10 sujeitos a incertezas e ambigüidades, tanto em processamento de dados e na física da resposta de RMN, onde as diferentes propriedades da rocha ou do fluido podem dar surgimento a um sinal ou assinatura RMN similar. Ter acesso às amostras vigentes da rocha e do fluido no laboratório,

15 em que tais propriedades podem ser determinadas com muito menos ambigüidade, é assim de grande valor na interpretação das medições das perfilagens por RMN obtidas do interior do poço. Para algumas aplicações, torna-se importante realizar as medições de RMN em laboratório sob condições as mais

20 próximas possíveis daquelas que se possam obter na ferramenta de perfilagem vigente, porque diferentes induções ocorrem para os diferentes protocolos de RMN, e porque a relação sinal-ruído pode ser radicalmente diferente entre o obtido em laboratório e no furo de

25 sondagem.

Em uma modalidade representativa, a sequência de

pulsos do campo magnético oscilante inclui um rebatimento inicial do pulso de radiofrequência (RF) e pelo menos um pulso RF de reorientação, e as medições da ressonância magnética nuclear do conjunto recebe cada um pelo menos um eco de spin proveniente do volume amostral para perfilagem e análise. A amplitude do pelo menos um eco de spin é modificado pelo gradiente do campo pulsado, de modo a ser codificado por difusão.

Na modalidade preferida, a ferramenta que desce ao poço utiliza um gradiente do campo magnético fixo que tem amplitude constante em todos os momentos. No equipamento de laboratório, o campo gradiente pulsado para uma medição de RMN é definido por um conjunto de pulsos que são equivalentes ao campo de gradiente fixo para uma correspondente medição executada pela ferramenta que desce ao poço. Em uma modalidade representativa, o conjunto de pulsos são cada um caracterizado por uma forma de onda semi-senoidal uni-polar. O conjunto de pulsos se define preferivelmente, pela seleção de pelo menos um parâmetro (por exemplo, amplitude máxima e/ou duração do pulso) que lhes estão associados, tal que a integral da amplitude com variação no tempo dos pulsos do conjunto sobre a duração do tempo dos pulsos do conjunto se compatibilize ao produto da amplitude constante do campo de gradiente fixo e duração para a correspondente medição realizada pela ferramenta que desce ao poço.

Além disso, a duração do pulso para o conjunto de pulsos do gradiente pode ser limitado pelo espaçamento entre um pulso inicial de tombamento e um pulso de reorientação subsequente. Esta restrição garante que os pulsos do gradiente não se sobrepõem no tempo, com os pulsos do campo magnético oscilante (assim como o modo de receber períodos de tempo para a aquisição do sinal de ressonância medidos). Esse recurso oferece as seguintes vantagens:

1) as dinâmicas do spin são simplificada; notadamente a aplicação dos pulsos do campo magnético oscilante não gera efeitos fora da ressonância, tais como os dos ecos estimulados; e

2) os ecos de spin não são significativamente estreitados pela falta de homogeneidade do campo magnético, proporcionando uma mais alongada janela de aquisição em modo recepção e portanto melhorada relação sinal-ruído.

Essas vantagens simplificam a aquisição de dados e as análises.

Na modalidade preferida, o conjunto de medições por RMN realizada pelo equipamento de laboratório são processados por um método de inversão que deriva uma função bidimensional de distribuição  $f(D, T_2)$ , que correlaciona o coeficiente de difusão  $D$  aos tempos de relaxação spin-spin ( $T_2$ ) da amostra contendo hidrocarbonetos.

A invenção também pode ser usada de forma preditiva

para planejar um programa de perfilagem ainda não realizadas. Neste cenário, as medidas em laboratório podem ser realizadas com várias opções de parâmetro, a fim de prever a resposta provável das formações rochosas

5 relativamente às medições de perfilagem por RMN, e determinar, projetar, ou de outro modo otimizar as seleções de parâmetros necessárias para produzir a necessária precisão, resolução, ou outras discriminações necessárias nas medições para as quais o programa de perfilagem do furo

10 de sondagem está submetido. Isso pode ser feito, por exemplo, quando a rocha ou amostras de fluidos da mesma ou numa formação rochosa semelhante já estejam disponíveis, e acredita-se que possuam propriedades representativas da formação a ser estudada. As medições laboratoriais em tais

15 amostras podem ser feitas para planejar a melhor escolha dos protocolos ou parâmetros que possam ser feitos com antecedência da realização das medições vigentes do furo de sondagem. Tendo determinado uma escolha ideal do protocolo ou de um parâmetro em laboratório, esses parâmetros são

20 então transferidos para a ferramenta de perfilagem, quando as medições no furo de sondagem são feitas.

Um exercício similar de planejamento pode ser feito na preparação para as medições do furo de sondagem na observação dos poços em conjunto com projetos de melhorada

25 recuperação do óleo (EOR). Mais especificamente, uma ferramenta da perfilagem por RMN pode ser usada para

monitorar o progresso de um projeto de EOR, onde a injeção de gases como o dióxido de carbono, metano, ou misturas desses gases com outros hidrocarbonetos leves podem ser utilizadas para melhorar o deslocamento e a recuperação do hidrocarboneto do reservatório. Alternativos processos de EOR podem envolver o uso de tensoativos químicos para melhorar a recuperação de petróleo, reduzindo a tensão superficial e a detergência. É uma prática normal introduzir poços de observação em tais projetos, que são perfurados principalmente para acompanhar o processo e não para a produção de petróleo, ou para injeção dos gases ou tensoativos. A RMN é uma tecnologia que pode ser utilizada para tais observações, desde que os poços sejam revestidos internamente com tubulares que sejam invisíveis à RMN. Um exemplo de tais poços de observação é descrito na Publicação do Pedido de Patente U.S. No. 2009/0167302. No entanto, por causa do custo de perfuração e de completação de tais poços, antes de serem feitas as considerações de engenharia e financeiras, é importante ser capaz de prever através de estudo em laboratório que as medições realizadas no poço, de fato produzam os necessários dados para realizar o monitoramento exigido.

Em tais poços de observação as propriedades básicas da formação serão bem conhecidas pela coleta de testemunhos e pelos programas de perfilagem no momento em que o poço é perfurado, e a partir de outras informações conhecidas com

respeito ao reservatório contendo hidrocarbonetos. No poço de observação, é importante ser capaz de detectar e medir as mudanças não nas propriedades da rocha (que são, evidentemente, não deve mudar radicalmente), mas nas propriedades do fluido e conteúdo de fluido, em maior evidência na saturação de óleo que permanece nos diversos durante o projeto EOR. Em tais aplicações, é importante ser capaz de escolher os protocolos, parâmetros e tempos médios (ou número de medições repetidas exigidas obrigatório) tal que a desejada precisão, resolução ou discriminação nas alterações no teor de fluido ou das propriedades seja conseguida. Nesse contexto, as medições em laboratório pode precisar de ser efetuadas através de vários estados diferentes de saturação de óleo, utilizando um suporte de amostra (suporte do testemunho) capaz de alterar a saturação do óleo ou de outros fluidos mediante diversos processos de fluxo. A amostra do testemunho de rocha será escolhida para ser representativa das partes mais importantes da formação rochosa atravessada pelo poço de observação, ou pode incluir várias amostras de tais medidas no laboratório. Além disso, as medidas provavelmente terá que ser efetuada a temperaturas e pressões representativa da realidade do reservatório, pois as propriedades de RMN dos fluidos irão se alterar com a temperatura e pressão. A importância da presente invenção nesse pedido advém da capacidade de prever que as alterações na saturação do

óleo pode ser observada com a ferramenta que desce ao poço, com o necessário grau de precisão, e tendo em conta a relação sinal/ruído esperada da ferramenta no furo de sondagem, e dos métodos de processamento de dados que serão utilizados. Os melhores níveis de confiança em tal planejamento virão das medições em laboratório que imitem da melhor forma possível as condições da ferramenta de uso no furo de sondagem, levando em conta a relação sinal-ruído disponível na ferramenta (ou plano para um necessário grau de média) e empregar os mesmos métodos de processamento de dados.

Em poços de observação dos tipos citados, há também a necessidade de planejar os protocolos que serão utilizados. A perfilagem geofísica nos poços de observação está sujeita a poucas restrições práticas que aquelas em poços "nus" (sem revestimento). Em particular, a presença de um revestimento elimina o risco de uma ferramenta ficar encravada na reboco lamoso que adere às superfícies expostas da rocha em um furo sem revestimento. Também, devido ao poço de observação não servir a outros propósitos, o tempo que decorre no qual a ferramenta fica no furo de sondagem não tem o mesmo custo econômico no sentido a impedir outras operações. Portanto, a ferramenta pode parar pelo tempo que for necessário, ou empregar protocolos de RMN de longa duração que sejam factíveis no laboratório, mas não usualmente factíveis em perfilagem de

furo de sondagem sem reservatório devido à necessidade de que a ferramenta precisa se movimentar continuamente e a minimizar o tempo total da duração das operações de perfilagem.

5           As adicionais vantagens e objetivo da invenção se tornarão aparentes para aqueles hábeis na arte tendo por base referência na descrição detalhada, tomada em conjunto com as Figuras fornecidas.

#### Breve Descrição dos Desenhos

10           A Figura 1 mostra uma ferramenta de perfilagem de dados de poço por RMN que pode ser usada na prática de uma modalidade da presente invenção.

15           A Figura 2 é uma visão transversal de uma parte da ferramenta de perfilagem de dados de poço por RMN da Figura 1.

20           A Figura 3 é um diagrama esquemático ilustrando uma seqüência representativa de sinais de excitação de RMN (e ecos produzidos a partir deles), que pode ser utilizada pelo ferramenta de perfilagem de poço por RMN da Figura 1 na prática de uma modalidade da presente invenção.

          A Figura 4 é um diagrama esquemático de uma ferramenta de RMN de bancada que pode ser usada na prática de uma modalidade da presente invenção.

25           A Figura 5 é um diagrama esquemático ilustrando uma seqüência representativa de sinais de excitação de RMN (e representativos sinais de ecos produzidos a partir deles)

que podem ser usados pela ferramenta de RMN bancada da Figura 4 na prática de uma modalidade da presente invenção.

A Figura 6A é uma ilustração de uma matriz não retangular de dados.

5           A Figura 6B é uma ilustração pictórica representando truncamento da matriz não retangular de dados da Figura 6A.

10           A Figura 6C é uma ilustração pictórica representando a extrapolação dos dados da matriz não retangular da Figura 6A.

15           A Figura 7 mostra os dados adquiridos de análise por RMN de uma amostra de água dopada com cloreto de níquel realizado por uma ferramenta de RMN de bancada (semelhante à mostrada na Figura 4) utilizando uma sequência Carr-Purcell-Meiboom-Gill (CPMG) com gradiente de campo de pulso (semelhante à mostrada na Figura 5).

          A Figura 8 mostra a atenuação do sinal dos primeiro, segundo, e terceiros ecos de spin extraídos dos dados da Figura 7.

20           A Figura 9 mostra uma correlação  $D - T_2$  para uma amostra de água dopada a  $\sim 25^\circ\text{C}$ , que foi realizada por uma ferramenta de RMN de bancada (similar àquela mostrada na Figura 4) utilizando uma sequência de CPMG com gradiente de campo de pulso (semelhante ao mostrado na Figura 5).

25           A Figura 10 mostra uma correlação  $D - T_2$  para uma amostra de hexadecano a  $\sim 25^\circ\text{C}$ , que foi realizada por uma

ferramenta de RMN de bancada (semelhante à mostrada na FIG 4), utilizando uma seqüência de CPMG com gradiente de campo de pulso (semelhante à mostrada na Figura 5).

5 A Figura 11 mostra uma correlação  $D - T_2$  para um testemunho de rocha calcária Portland saturada com água, que foi realizada por uma ferramenta de RMN de bancada (semelhante à mostrada na Figura 4) utilizando uma seqüência de CPMG com gradiente de campo de pulso (semelhante à mostrada na Figura 5).

10 A Figura 12 mostra uma correlação  $D - T_2$  para uma amostra de arenito Bentheimer saturado com salmoura (água), que foi realizada por uma ferramenta de RMN de bancada (semelhante à mostrada na Figura 4) utilizando uma seqüência de CPMG com gradiente de campo de pulso  
15 (semelhante à mostrada na Figura 5).

As Figuras 13A e 13B, coletivamente, são um fluxograma de um fluxo de trabalho representativo que emprega ruídos característicos de uma ferramenta que desce ao poço, como parte da análise de RMN em laboratório, para  
20 prever o desempenho real das medições por RMN realizadas pela ferramenta que desce ao poço. O fluxo de trabalho prevê a avaliação e atualização das variáveis da análise de RMN realizadas pela ferramenta que desce ao poço para atender a precisão desejada.

25 A Figura 14 é um gráfico da dispersão da saturação do óleo remanescente ( $S_{or}$ ), derivado da análise de

laboratório por RMN prejudicada pelo ruído sintético bem como a "informação do terreno"  $S_{or}$  (linha pontilhada) para estados diferentes de saturação, que é produzido como parte do fluxo de trabalho das Figuras 13A e 13B.

5           A Figura 15 é um plano de estimativas da precisão de  $S_{or}$ , derivados de análises em laboratório de RMN prejudicadas pelo ruído sintético para um diferente nível de relação sinal-ruído (SNR), que é produzido como parte do fluxo de trabalho das Figuras 13A e 13B.

10           A Figura 16 é um plano de estimativas de precisão de  $S_{or}$ , derivados de análises em laboratório de RMN prejudicada pelo ruído sintético para as múltiplas interações com um único nível de sinal SNR, que é produzido como parte do fluxo de trabalho das Figuras 13A e 13B. Cada  
15           iteração emprega um número variável de sequências de RMN, cujos resultados são calculados em conjunto. As estimativas de desempenho do fluxo de trabalho são marcadas em gráfico em função do número de seqüências de RMN em cada iteração.

#### Descrição Detalhada da Invenção

20           Modalidades da invenção dizem respeito a equipamentos e métodos para determinar as propriedades do fluido do reservatório utilizando uma ferramenta de perfilagem de dados de poço por RMN. A Figura 1 mostra um equipamento representativo para investigar uma formação  
25           subterrânea atravessada por um furo de sondagem 2. O furo de sondagem 2 é, normalmente, embora não necessariamente,

preenchido com um fluido de perfuração ou lama (que contém sólidos finamente divididos em suspensão), com o reboco lamoso 3 nas paredes do poço. Uma ferramenta de perfilagem no interior de poços 10 é suspensa no furo de sondagem 2 em um cabo blindado 11, cujo comprimento determina substancialmente a profundidade relativa da ferramenta de perfilagem 10. O comprimento do cabo é controlado por meios adequados na superfície, como um mecanismo de tambor e guincho mecanismo (não mostrados). O equipamento de superfície, representado em 12, pode ser do tipo convencional, e pode incluir um subsistema do processador e se comunica com a ferramenta de perfilagem 10. A ferramenta de perfilagem 10 tem uma face 13 modelada para fazer contato íntimo com as paredes do furo de sondagem, com mínimas lacunas ou espaços, e um braço retrátil 14 que pode ser ativado para pressionar o corpo da ferramenta de perfilagem 10 contra as paredes do furo de sondagem durante uma descida para obtenção de perfilagem, com a face 13 pressionada contra a superfície da parede. Embora a ferramenta de perfilagem 10 seja mostrada como um corpo único, a ferramenta poderá, alternativamente, incluir componentes separados, como um cartucho, sonda, ou unidade deslizante e a ferramenta pode ser combinável com outras combinada com outras ferramentas de perfilagem. Além disso, embora uma ferramenta suspensa por cabos seja ilustrada, formas alternativas de suporte físico e enlaces de

comunicação podem ser usados, por exemplo, em um sistema de medição durante a perfuração.

Em uma modalidade representativa, a ferramenta de perfilagem 10 é uma ferramenta Scanner MR disponível de Schlumberger Technology Corporation de Sugar Land, Texas, EUA, e descrita na Patente U.S. No. 7486070, que é aqui incorporada por referência. Como mostrado na Figura 2, a ferramenta de perfilagem 10 inclui uma montagem magnética permanente 15, bem como um arranjo de antenas de radiofrequência (RF) (mostrado como 16) posicionado entre a montagem magnética permanente 15 e da face engajante de parede 13. O montagem magnética permanente 15 produz um campo magnético estático homogêneo  $B_0$  em um volume amostral 18. O volume amostral 18 é uma região diretamente diante da face 13 da ferramenta. Desse modo, durante o uso, o volume amostral 18 se situa dentro da formação 1 como mostrado. O campo magnético estático homogêneo  $B_0$  é não homogêneo devido ao esboço da montagem magnética permanente 15 e desse modo produz um gradiente de campo magnético espacial  $(\partial B_0/\partial z)$  no volume amostral 18. A antena de RF 16 irradia, em momentos selecionados, um campo magnético de RF oscilante  $B_1$  possuindo um momento magnético substancialmente perpendicular (ortogonal) àquele do campo magnético estático homogêneo  $B_0$  produzido pela montagem magnética permanente 15 como indicado pelas setas mostradas na Figura 2. Aquele usualmente versado na técnica irá notar

que a mesma antena de RF 16 pode funcionar como um transmissor para transmitir o campo magnético oscilante e como um receptor para receber os sinais. Alternativamente, o transmissor separado e antenas de recepção pode ser usado. A ferramenta de perfilagem 10 é capaz de realizar a análise de RMN em várias profundidades de interesse em camadas finas, tais como as camadas 18A, 18B, 18C, e 18D, como mostrado. Vantagens do uso da ferramenta de perfilagem da Figura 2 podem incluir, mas não estão limitados à capacidade de fazer medições em diversas e múltiplas profundidades de interesse, a capacidade para realizar sondagens mais profundas em uma formação rochosa, detectar uma grande região, e tornar mais fácil o ajuste. Embora mostrado como estando situada adjacente às paredes do furo de sondagem, a ferramenta de perfilagem 10 pode realizar medições em posições afastadas das paredes do furo de sondagem (por exemplo, no centro do furo de sondagem).

A ferramenta de perfilagem 10 pode ser utilizada para fazer medições por RMN relacionadas com as propriedades de difusão e relaxação das amostras de fluidos. Como essas propriedades são geralmente diferentes de óleo e água, essas medidas podem proporcionar um meio para determinar a proporção relativa de água e óleo em uma amostra de fluido. Além disso, estas medidas podem fornecer informações sobre as propriedades dos óleos, incluindo suas composições, viscosidade e índices de gás/óleo (quantidades

de gás solução contida no óleo). Da mesma forma, para uma amostra de fluido, que podem incluir (1) gás e água, (2) gás, óleo e água, (3) óleo e gás, ou (4) óleo e água, as medições podem fornecer um meio para determinar as

5 propriedades relativas dos diferentes componentes que estejam presentes. Além disso, estas medidas podem fornecer informações sobre as propriedades dos hidrocarbonetos que são importantes para a determinação do valor econômico do reservatório e também essenciais para a tomada de decisões

10 quanto à completação do poço.

As medições por RMN realizadas pela ferramenta de perfilagem 10 são baseadas em princípios conhecidos que se tornaram uma ferramenta importante na avaliação da formação. Os fundamentos gerais da avaliação da formação

15 por RMN podem ser encontrados, por exemplo, na Patente U.S. No. 5023551, que é aqui incorporada por referência. As medições por RMN se baseiam no fato de que os testemunhos de elementos químicos possuem um momento angular ("spin") e um momento magnético. Em um campo magnético estático

20 homogêneo  $B_0$  aplicado externamente, os spins dos testemunhos se alinham na direção do campo magnético estático homogêneo  $B_0$ . Esta situação de equilíbrio pode ser perturbada por um pulso de um campo magnético oscilante  $B_1$  que rebata os spins para longe da direção do campo

25 magnético estático homogêneo  $B_0$ . Por exemplo, se um pulso de corrente alternada com uma frequência  $f$  é passado

através de uma bobina de antena RF produzindo campo magnético de polarização oscilante  $B_1$  perpendicular ao campo magnético estático homogêneo  $B_0$ , uma população de núcleos avançam na frequência Larmor igual a  $f$  se alinham em um ângulo  $\theta$  relativamente à direção  $B_0$ . No final do pulso, quando o campo magnético de polarização  $B_1$  é removido, os núcleos alinhados experimentam um torque perpendicular, e avançam em torno do vetor  $B_0$ . Depois de um tempo característico chamado tempo de relaxação longitudinal ou de reticulado-spin  $T_1$ , os testemunhos relaxam para o equilíbrio térmico, onde uma percentagem ponderada dos testemunhos ficam alinhadas na direção  $B_0$ . O ângulo  $\theta$  é dado por  $\theta = \gamma B_1 t_p / 2$ , onde  $\gamma$  é a relação giromagnética,  $B_1$  é a intensidade do campo oscilante linearmente polarizado, e  $t_p$  é a duração do pulso. Pulsos que produzem um ângulo  $\theta$  de noventa graus (referido como "um pulso de 90 graus") são comuns.

Também associado com o spin do núcleo molecular está um segundo tempo de relaxação,  $T_2$ , o chamado tempo de relaxação spin-spin. No final de um pulso de 90 graus, todas os spins estão apontados numa direção comum perpendicular ou transversal, com a direção  $B_0$ , e todos eles avançam na frequência de Larmor. No entanto, por causa de pequenas flutuações no campo estático induzidas por outros spins, impurezas paramagnéticas e pela não homogeneidade do campo estático  $B_0$ , o spin avança em

frequências ligeiramente diferentes, e a magnetização transversal se defasa com uma constante de tempo referido como o tempo de relaxação spin-spin  $T_2$ .

Uma técnica padrão para medir o tempo de relaxação spin-spin  $T_2$  utiliza uma seqüência de pulsos de RF conhecido como seqüência CPMG (Carr-Purcell-Meiboom-Gill). Como é sabido, depois de um tempo de espera que antecede cada seqüência de pulso, um pulso de 90 graus é emitido pela antena RF 16, que induz os spins a iniciar o avanço no plano transversal. Após um retardo, um pulso inicial de 180 graus é emitido pela antena de RF 16. O pulso inicial de 180 graus induz os spins, que estão em defasagem no plano transversal, a reverter a direção e a reorientar e em seguida induzir um eco de spin inicial a surgir. Um segundo pulso de reorientação de 180 graus pode ser emitido pela antena de RF 16, que posteriormente faz com que um segundo eco de spin surja. Em seguida, a antena de RF 16 emite uma série de pulsos a 180 graus separados por um curto intervalo de tempo. Esta série de vários pulsos a 180 graus revertem repetidamente os spins, induzindo uma série de "ecos de spins" a surgir. O trem de ecos de spin é medido e processado para determinar o tempo de relaxação spin-spin  $T_2$ .

Em um campo magnético estático uniforme, cada spin irá experimentar a mesma força do campo magnético independentemente de sua posição dentro do campo estático e

difusão não vai contribuir para o observado tempo de relaxação spin-spin  $T_2$ . No entanto, no gradiente do campo magnético do campo magnético estático não homogêneo  $B_0$ , cada spin irá experimentar diferentes intensidades de campo magnético à medida que se difunde através do campo estático. As frequências de Larmor dos spins que difundem se tornam tempo-dependentes, e os pulsos a 180 graus não podem reorientar os spins completamente, levando a uma deterioração adicional. Esta deterioração adicional contribui para o observado tempo de relaxação spin-spin  $T_2$  e é dependente do coeficiente de difusão  $D$  do fluido, da magnitude e da duração do gradiente do campo magnético, e da magnitude do campo magnético estático. Como o coeficiente de difusão fornece uma indicação do tipo de fluido, a medição dos efeitos de difusão no tempo de relaxação spin-spin  $T_2$  observado pode ser utilizado como base para determinar os tipos de fluidos numa formação de hidrocarbonetos.

A análise por RMN utilizando campos estáticos não homogêneos com difusão pela edição por um ou outros ecos estimulados (STE) ou ecos de Hahn (HE) seguido por um trem de pulsos de CPMG modificados também é prática comum. Exemplos de tais análises por RMN são apresentadas na Patente norte americana U.S. No. 6.570.382, a qual é aqui incorporada por referência. Em uma modalidade representativa da invenção, a ferramenta de perfilagem 10

realiza análise por RMN utilizando uma seqüência STE para a edição de difusão seguido por um trem de pulsos CPMG modificado como mostrado na Figura 3. A seqüência STE inclui uma série de dois pulsos de 90 graus, em momentos 5  $\tau_{STE}$  e  $\Delta$  após um pulso inicial de 90 graus, o que produz um eco estimulado no momento  $(\tau_{STE} + \Delta)$ . O momento temporal  $\tau_{STE}$  é normalmente referido como o intervalo de codificação espacial, e o momento  $\Delta$  é normalmente referido como o intervalo de armazenamento. A modificação seqüência de CPMG segue a seqüência STE e contém uma série de pulsos 180 10 graus que seguem o eco estimulado da seqüência STE por um tempo  $\tau_{CP}$ . Os pulsos 180 graus reorientar o eco estimulado a produzir uma série de ecos de spin com um tempo de afastamento aproximadamente igual a  $2\tau_{CP}$ . O eco estimulado 15 produzido por STE codifica seqüência de difusão, enquanto os ecos de spin produzidos pelo trem de pulso de CPMG modificado codificam para o tempo de relaxação transversa  $T_2$  como é bem conhecido na arte. Na modalidade preferida,  $\tau_{STE}$  está na faixa de poucos milissegundos,  $\Delta$  está na faixa 20 de 50 ms a 1 segundo, e  $\tau_{CP}$  está na faixa 100 ms a 500 ms. Outras modalidades de seqüências de RMN, que podem ser utilizadas de acordo com a presente invenção são descritas na Patente norte americana U.S. No. 6.570.382.

As medições por RMN realizadas pela ferramenta de 25 perfilagem 10 medem a amplitude do eco de spin de uma ou mais seqüências de RMN. A partir destas medições, o

coeficiente de difusão  $D$ , bem como outras propriedades de fluido da amostra de hidrocarbonetos da formação localizada no volume amostral 18, podem ser derivados. As medições por RMN assim obtidas são "codificadas por difusão" e podem ser

5 invertidas para produzir uma função de distribuição multidimensional relativamente às propriedades do fluido da amostra. A distribuição multidimensional pode ser uma função de distribuição bidimensional (2-D)  $f(D, T_2)$ , que relaciona o coeficiente de difusão  $D$  aos tempos de

10 relaxação spin-spin ( $T_2$ ) da amostra, uma função de distribuição 2-D  $f(D, T_1)$ , que relaciona o coeficiente de difusão  $D$  ao tempo de relaxação spin-reticulado  $T_1$  da amostra, ou uma função de distribuição tridimensional (3-D)  $f(D, T_1, T_2)$ , que relaciona o coeficiente de difusão  $D$  ao

15 tempo de relaxação spin-reticulado  $T_1$  e tempo de relaxação spin-spin  $T_2$  da amostra. Exemplos de tais técnicas de inversão são descritas em detalhe nas Patentes norte americanas U.S. Nos. 6.570.382; 6.960.913 e 7.053.611, aqui incorporadas por referência em suas totalidades.

20 Por exemplo, a função de distribuição multidimensional pode ser uma função de distribuição 2-D  $f(D, T_2)$ , que relaciona o coeficiente de difusão  $D$  ao tempo de relaxação spin-spin ( $T_2$ ) da amostra. Para uma amostra de óleo-água, a função  $f(D, T_2)$  pode ser usada para estimar os

25 volumes relativos do óleo e água, viscosidade do óleo, composição molecular do óleo, e relação gás-óleo. Uma

discussão mais detalhada de metodologias para a derivação de uma função de distribuição bidimensional (2-D)  $f(D, T_2)$ , que relaciona o coeficiente de difusão  $D$  ao tempo de relaxação spin-spin ( $T_2$ ) da amostra, medido pelo instrumento de perfilagem 10 é descrito abaixo. Em outro exemplo, a função de distribuição multidimensional pode ser derivada a partir das metodologias de entropia máxima (MEP) como descrito na Patente norte americana U.S. No. 6.960.913.

10 Para as respectivas medições por RMN realizadas pela ferramenta de perfilagem 10 na avaliação de uma amostra da formação, a informação que caracteriza cada respectiva seqüência de RMN (por exemplo, os dados utilizados para programar o equipamento de RMN de laboratório para gerar uma correspondente seqüência de RMN, tal como o intervalo de codificação espacial  $\delta$ , o intervalo de armazenamento  $\Delta$ , e o espaçamento de eco  $\tau_{CP}$  para a seqüência STE representativa, da Figura 3), bem como os dados das medições por RMN obtidos a partir de cada uma respectiva seqüência de RMN e informação do fluido derivada dela, pode ser armazenada em uma base de dados. Estas informações são referidas coletivamente como informações de RMN relacionadas com a ferramenta. Alternativamente, as informações de RMN relacionadas com a ferramenta podem ser introduzidas pelo usuário durante a configuração da análise de RMN para uma determinada amostra. As informações

relacionadas com a ferramenta de RMN estão associadas com as amostras da formação (por exemplo, amostra do testemunho de rocha) adquiridas a partir da mesma formação. De preferência, a amostra da formação é adquirida a partir de um poço ou próxima do onde se encontra a ferramenta a partir da qual os dados das medições por RMN foram derivados.

Voltando agora à Figura 4, é mostrado um equipamento 101 para a realização de medição e análises por RMN em laboratório dos hidrocarbonetos da formação, de acordo com uma modalidade preferida da presente invenção. O equipamento inclui uma carcaça 101 instrumento de RMN 111, que é preferencialmente feita sob medida para repousar sobre uma bancada padrão de laboratório, que abriga um arranjo magnético (por exemplo, ímãs permanentes 113A, 113B), bobinas de compatibilização de gradientes 115A, 115B, e uma antena RF 117 abrangendo um volume amostral 119. Um exemplo de formação de interesse (por exemplo, amostra de testemunho de rocha) associado a informações de RMN pré-existente de ferramentas relacionadas armazenadas em um banco de dados é selecionado para o teste e colocado no volume amostral 119. O exemplo de formação de interesse pode ser contido dentro de um porta-amostras que é colocado no volume amostral 119. Um transportador ou outro mecanismo de acionamento pode encaminhar a amostra da formação de interesse através do volume amostral 119 como é bem

conhecido. O arranjo magnético 113A, 113B produz um campo magnético homogêneo estático  $B_0$  no volume amostral 119. Na modalidade preferida, o arranjo magnético 113A, 113B produz um campo magnético estático homogêneo  $B_0$  da ordem de 42 mT (frequência de próton de 2 MHz). Campos com força menor e campos com força maior podem ser usados. Os campos com força menor sofrem das reduções da relação sinal-ruído. Campos com forças maiores podem fornecer melhorada relação sinal-ruído, mas as propriedades de RMN medidas podem ser significativamente diferentes daquelas medidas pelas modernas ferramentas de perfilagem por RMN. A antena de RF 117 transmite pulsos de um campo magnético oscilante  $B_1$  através do volume amostral 119. O momento magnético do campo magnético  $B_1$  é substancialmente perpendicular ao campo magnético estático homogêneo  $B_0$ . As bobinas de gradiente 115A, 115B transmite um gradiente de campo magnético estático em modo pulsado  $B_{PFG}$  através do volume amostral 119. Em uma modalidade ilustrativa, o momento magnético do gradiente de campo magnético  $B_{PFG}$  é substancialmente paralelo ao campo magnético estático homogêneo  $B_0$  no volume amostral 119. Note que o gradiente de campo magnético estático em modo pulsado BCFG pode modificar o campo magnético estático homogêneo  $B_0$  ao longo de uma coordenada (x, y, z, r) no volume amostral 119.

A carcaça do equipamento de RMN 111 também, de preferência contém circuito eletrônico 120A, 120B que faz

interface com a antena RF 117 e bobinas de gradiente 115A, 115B, respectivamente, para a realização de medições por RMN da amostra dos hidrocarbonetos da formação de interesse no volume amostral 119. O circuito eletrônico 120A preferencialmente opera em três modos: o modo de transmissão, amortecimento, modo e modo de recepção. No modo de transmissão, a antena de RF 117 é excitada de tal ordem que irradia um pulso de um campo magnético oscilante  $B_1$  através do volume amostral 119. O pulso do campo magnético oscilante  $B_1$  ressoa spins nucleares na amostra dos hidrocarbonetos da formação de interesse dispostos no volume amostral 119. Entre certos pulsos do campo magnético  $B_1$  produzido no modo de transmissão, o modo de recepção é realizado utilizando a antena de RF 117 para receber sinais magnéticos oscilantes de precessão do spin nuclear (também conhecido como "ecos de spin"), que irradia a partir da amostra dos hidrocarbonetos da formação de interesse dispostos no volume amostral 119. O modo de amortecimento é realizado entre o modo de transmissão e o modo de recepção a fim de limitar toque da antena RF 117 no final do pulso do campo magnético oscilante  $B_1$ . O circuito eletrônico 120B funciona para excitar as bobinas de gradiente 115A, 115B de tal forma que as bobinas de gradiente irradiem o gradiente de campo magnético em modo pulsado controlado  $B_{PFG}$  através do volume amostral 119 em sincronia com os pulsos do campo magnético oscilante  $B_1$ , conforme descrito abaixo em

detalhes.

Na modalidade preferida, o circuito eletrônico 120A inclui um bloco de circuitos 121 para gerar formas de ondas de sequências de pulso de RF que excitam os pulsos do campo magnético oscilante  $B_1$  através do volume amostral 119. Os parâmetros da seqüência de ondas de pulso de RF são preferencialmente controlados por sinais de controle fornecidos ao bloco de circuitos 121 provenientes do computador 171 através do bloco de interface 122. As formas de onda da sequência de pulsos de RF gerados pelo bloco de circuitos 121 são fornecidos para um circuito de acionamento de RF 123 que amplifica a forma de onda da sequência de pulsos de RF para níveis de potência adequados para fornecer à antena RF 117 em modo de transmissão tal que a antena 117 irradia pulsos de campo magnético oscilante  $B_1$  oscilando na frequência de Larmor do núcleo de interesse. A frequência de Larmor  $\omega$  é dada por,

$$\omega = (\gamma B_0) \quad (1)$$

onde  $\gamma$  é a razão giromagnética das espécies nucleares de interesse, e  $B_0$  é a intensidade do campo magnético estático. Para testemunhos de hidrogênio, o razão giromagnética  $(\gamma/2\pi)$  é normalmente 4258 Hz/Gauss. A circuitos de compatibilização T/R 127 fornece uma impedância que corresponde a impedância de entrada da antena RF 117 no modo de transmissão, a fim maximizar a transmissão de energia para a antena RF 117, e também

fornece uma impedância que corresponde a impedância de entrada do circuito receptor 129 no modo de recepção, a fim de minimizar o ruído. O circuito de compatibilização T/R 127 também fornece impedância que criticamente amortece a 5 antena RF 117, no modo de amortecimento, a fim de limitar toque da antena RF 117 no final do pulso do campo magnético oscilante  $B_1$ . No modo de recepção, o circuito receptor 129 amplifica os sinais capturados pela antena RF 117 e fornecido pelo circuitos de compatibilização T/R 127, e 10 utiliza um sinal de referência fornecido pelo bloco de circuitos 121 (este sinal de referência corresponde à frequência de interesse) e o sinal amplificado para obter um sinal de ressonância da RMN medida na frequência de interesse do volume amostral 119. O sinal de ressonância 15 medição de RMN é a saída para um conversor analógico-digital 131 para amostragem e conversão em formato digital. Os dados digitais é tamponado e encaminhada para o computador através do bloco 171 através do bloco de interface 122 para uso e análise posterior.

20 Na modalidade preferida, o circuito eletrônico 120B inclui um blocos de circuitos 133 para gerar formas de onda na sequência de pulso em gradiente que produzem o gradiente de campo magnético estático em modo pulsado BPFPG através do volume amostral 119. Os parâmetros das formas de onda na 25 sequência de pulso em gradiente são preferencialmente controladas por sinais de controle fornecido ao bloco de

5 circuitos 133 provenientes do computador 171 através do bloco de interface 122. As formas de onda na sequência de pulso em gradiente geradas pelo bloco de circuitos 133 são fornecidas para o circuito de acionamento da bobina de gradiente 135, que opera para amplificar a formas de onda na sequência de pulso em gradiente gerada pelo bloco de circuitos 133 para níveis de energia adequados ao abastecimento das bobinas de gradiente 115A, 115B tal que as bobinas de gradiente 115A, 115B irradiam pulsos do campo magnético  $B_{PFG}$ .

10 O computador 171 inclui uma plataforma de processamento de hardware, que inclui pelo menos uma unidade central de processamento, memória, armazenamento de dados persistentes (por exemplo, uma unidade de disco 15 rígido ou disco óptico), funcionalidade I/O, e outra funcionalidade como é bem conhecido nas técnicas de processamento de dados. Os armazenamentos de dados persistentes armazena um sistema operacional e um aplicativo de software (uma seqüência programada de 20 instruções) que são carregados na memória para serem executadas pela unidade de processamento central (s) da plataforma como é bem conhecido. Em uma modalidade representativa, o computador 171 se materializa através de uma estação de trabalho comercialmente disponível, que faz 25 interface com a carcaça de instrumentação de RMN 111 por meio de uma adequada interface, tal como um USB ou enlace

de dados 1394. O software incorpora um módulo de medição de RMN e um módulo de análise de dados de RMN que realizam a medição e análise por RMN em laboratório de uma amostra dos hidrocarbonetos da formação. O módulo de medição RMN realiza medições de RMN na selecionada amostra da formação. As medições de RMN são derivadas da operação de uma rotina de configuração de testes de RMN.

A rotina de configuração de testes faz interface com o bloco do circuito gerador da forma de onda 121 para fornecer os parâmetros necessários (por exemplo, duração de pulso e amplitude) para a programação da desejada seqüência de pulsos do campo magnético oscilante  $B_1$  a ser emitido pela antena RF 117. A rotina de configuração de teste também faz interface com o bloco do circuito gerador da forma de onda 133 para fornecer os parâmetros necessários (por exemplo, os parâmetros de temporização do pulso de gradiente, o parâmetro amplitude do pulso de gradiente, o gradiente de parâmetro de duração do pulso de onda) para a programação do desejado gradiente de campo magnético estático em modo pulsado  $B_{PFG}$  a ser emitido pelas bobinas de gradiente 115A, 115B.

A rotina de medição de RMN aciona os blocos de circuito eletrônico 120A, 120B para irradiar o volume amostral 119 com a desejada seqüência de pulsos do campo magnético oscilante  $B_1$  em conjunto com o desejado gradiente de campo magnético estático em modo pulsado BPG e mede e

registra os sinais da ressonância RMN (por exemplo, ressonâncias de ecos de spin) resultantes.

O módulo de análise de dados de RMN processa os dados de RMN registrados a partir de um ou mais conjuntos de medições por RMN realizado pelo módulo de medição de RMN para caracterização de parâmetros RMN-relacionados (por exemplo,  $T_2$ ,  $D$ ), bem como outras propriedades de interesse (composição molecular do óleo e relação gás-óleo) para a selecionada amostra da formação, e armazena os resultados da selecionada amostra da formação. Tais resultados armazenados podem ser emitidos (por exemplo, apresentados a um usuário em uma tela de exibição) para a comparação com resultados de análises de dados de RMN provenientes de correspondentes dados de RMN no poço.

As medições por RMN realizada pela medida de spin de RMN Medição módulo amplitude do eco de uma ou mais sequências de RMN. A partir destas medições, o coeficiente de difusão  $D$ , bem como outras propriedades do fluido da amostra dos hidrocarbonetos da formação localizada no volume amostral 18 pode ser derivada. As medições por RMN assim obtidos são "a difusão codificada" e pode ser invertida para produzir uma função distribuição multidimensional que relaciona as propriedades da amostra de fluido da formação. A distribuição multidimensional pode ser uma função de distribuição de duas dimensões (2-D)  $f(D, T_2)$ , que relaciona o coeficiente de difusão  $D$  para os

tempos de relaxação spin-spin ( $T_2$ ) da amostra da formação, uma função de distribuição 2-D  $f(D, T_1)$ , que relaciona o coeficiente de difusão  $D$  com o tempo de relaxação spin-rede  $T_1$  da amostra da formação, ou uma função de distribuição 5 tridimensional (3-D)  $f(D, T_1, T_2)$ , relativo a coeficiente de difusão  $D$  do tempo de relaxação spin-rede  $T_1$  e tempo de relaxação spin-spin  $T_2$  da amostra da formação. Exemplos de tais técnicas de inversão são descritos em detalhe nas Patentes norte americanas U.S. Nos. 6.570.382; 6.960.913 e 10 7.053.611, aqui incorporadas por referência em suas totalidades.

Por exemplo, a função de distribuição pode ser uma função de distribuição bidimensional (2-D)  $f(D, T_2)$ , que relaciona o coeficiente de difusão  $D$  ao tempo de relaxação 15 spin-spin ( $T_2$ ) da amostra. Para uma amostra de óleo-água, a função  $f(D, T_2)$  pode ser usado para estimar os volumes relativos do petróleo e da água, a viscosidade do óleo, a composição molecular do óleo e relação gás-óleo. Uma discussão mais detalhada de metodologias para a derivação 20 de uma função de distribuição bidimensional (2-D)  $f(D, T_2)$ , que relaciona o coeficiente de difusão  $D$  ao tempo de relaxação spin-spin ( $T_2$ ) da amostra, como parte do módulo de análise de dados de RMN é definido abaixo. Em outro exemplo, a função de distribuição multidimensional pode ser 25 derivada de metodologia dos princípios de entropia máxima (MEP) conforme descrito na Patente U.S. No. 6.960.913.

Na modalidade preferida, a técnica de inversão realizada pela Módulo de Análise de Dados de RMN do equipamento 101 corresponde à técnica de inversão utilizada pela ferramenta que desce ao poço em obter os correspondentes dados de RMN do poço. Essa inversão de processamento pode ser carregada e/ou executada como parte do Módulo de Análise de Dados de RMN do equipamento 101 em uma forma manual, ou, eventualmente, ser carregado e/ou executados como parte do Módulo de Análise de Dados de RMN do equipamento 101 em uma forma automática baseada em dados que caracteriza a técnica de inversão utilizada pela ferramenta que desce ao poço em derivar os correspondentes dados de RMN obtidos no interior do poço.

Na modalidade preferida da invenção, o campo magnético oscilante  $B_1$  emitido pela antena RF 117 do equipamento de laboratório 101 para uma dada seqüência de pulsos é controlado de modo que a seqüência de pulsos é equivalente à seqüência de pulsos aplicadas durante às correspondentes medições por RMN realizadas no poço pela ferramenta de perfilagem 10. Além disso, a duração e/ou variação do tempo da amplitude dos pulsos de gradiente do campo magnético emitido pelas bobinas de gradiente 115A, 115B do equipamento de laboratório 101 para a dada seqüência de pulsos é controlado de tal forma que os pulsos do gradiente são equivalentes ao campo de gradiente fixo durante respectivas medições por RMN realizados nos poços

pela ferramenta de perfilagem 10. Os pulsos do gradiente de uma dada seqüência de pulsos são equivalentes ao campo de gradiente fixo da ferramenta de perfilagem 10 para uma correspondente seqüência de RMN, garantindo que a medida da integral da amplitude variável no tempo dos pulsos do gradiente ao longo do tempo seja igual ao produto da magnitude do campo de gradiente fixo sobre a duração da seqüência para a correspondente análise por RMN.

Além disso, o pulso do gradientes emitidos pelo gradiente de bobinas 115A, 115B são aplicadas por um período de tempo controlado, a fim de permitir que o campo magnético se estabilize antes do próximo pulso ou evento aquisição de sinal.

Em uma modalidade representativa, como mostrado na Figura 5, a seqüência de pulsos emitidos pela antena RF 117 é equivalente ao emitido pela ferramenta de perfilagem 10 durante uma correspondente medição de RMN (Fig. 3), incluindo uma seqüência STE e modificado seqüência de CPMG. A seqüência STE inclui uma série de dois pulsos a 90 graus em momentos  $\tau_{STE}$  e  $\Delta$  após um pulso inicial de 90 graus, o que produz um eco estimulado no momento  $(\tau_{STE} + \Delta)$ . A seqüência CPMG modificada segue a seqüência STE e contém uma série de pulsos de 180 graus que seguem o eco estimulado da seqüência STE por um tempo  $\tau_{CP}$ . Os pulsos a 180 graus reorientam o eco estimulado a produzir uma série de ecos de spin com um tempo de afastamento aproximadamente

igual a  $2\tau_{CP}$ . O eco estimulado produzido por STE codifica seqüência de difusão, enquanto os ecos de spin produzidos pelo trem de pulso CPMG modificado codificam o tempo de relaxação transversal  $T_2$  como é bem conhecido na arte. Os parâmetros  $\tau_{STE}$ ,  $\Delta$ , e  $\tau_{CP}$  são persistentemente armazenados pelo computador 171 e carregados pela rotina de configuração de teste ao bloco do circuito gerador da forma de onda 121 para programar a desejada seqüência de pulsos STE e seqüência CPMG modificada do campo magnético oscilante  $B_1$  a ser emitida pela antena RF 117.

Durante a seqüência de STE, as bobinas de gradiente 115A, 115B do equipamento de laboratório 101 são controladas a emitir um número N de pulsos do gradiente cada uma definida por uma forma de onda semi-senoidal unipolar, como mostrado. Nessa configuração, a integral da amplitude com variação no tempo dos N pulsos gradientes é representado matematicamente como:

$$\int_0^{\delta_{PFG}} N * g_{PFG} * \sin(\pi t / \delta_{PFG}) dt = (g_{FFG} * T_d) \quad (2)$$

onde N é o número de pulsos do gradiente,  $\delta_{PFG}$  o tempo de duração da onda unipolar semi-senoidal para cada pulso de gradiente,  $g_{PFG}$  é a amplitude máxima da onda unipolar semi-senoidal para cada pulso de gradiente,  $g_{FFG}$  é a amplitude do campo de gradiente fixo e  $T_d$  (ie,  $\tau_{STE} + \Delta$ ) é a duração da

seqüência STE da medição de RMN realizada pela ferramenta de perfilagem 10.

Assim, neste exemplo, os parâmetros  $N$ ,  $\delta_{PFG}$ , e  $g_{PFG}$  são limitados, tais que a integral da amplitude variável no tempo dos pulsos do gradiente de  $N$  é igual à integral da amplitude fixa do campo de gradiente fixo durante sua duração (dada por  $g_{FFG} * Td$ ) na correspondente seqüência medida pela ferramenta que desce ao poço 10. Os parâmetros  $\delta_{PFG}$  e  $g_{PFG}$ , bem como os  $N$  pulsos de campo gradiente são desse modo gerados pelo computador 171 e carregados pela rotina de configuração do teste ao bloco de circuito gerador da forma de onda 133 para programar o desejado campo gradiente de modo pulsado a ser emitido pelas bobinas gradientes 115A, 115B.

De forma importante, a duração  $\delta_{PFG}$  dos  $N$  pulsos gradientes emitidos pelas bobinas de gradiente 115A, 115B é menor que  $\tau_{STE}$ , a fim de permitir que o campo magnético se estabilize antes do próximo pulso de RF (ou caso de aquisição de sinais). Além disso, os pulsos emitidos pelo gradiente de bobinas de gradiente 115A, 115B do equipamento de laboratório 101 não se sobrepõem no tempo, com os pulsos de CPMG emitidos pela antena RF 117, bem como o modo de receber períodos de tempo para a aquisição do sinal de ressonância medido por RMN pela antena RF 117. Esse recurso oferece as seguintes vantagens:

- 1) as dinâmicas de spin são simplificadas,

notadamente a aplicação dos pulsos de CPMG, não geram efeitos fora da ressonância, tais como ecos estimulados; e

2) os ecos de spin não são significativamente reduzidos pela falta de homogeneidade do campo magnético, fornecendo uma janela de aquisição mais alongada em modo de recepção e, portanto, melhora a relação sinal/ruído. Estas vantagens simplificam a aquisição e análise de dados.

É típico que a relação sinal-ruído inerente (SNR) das medições por RMN realizada pelo equipamento de laboratório 101 seja maior do que o SNR das medições de RMN realizadas pela ferramenta de perfilagem no interior de poços 10. As diferenças entre a relação sinal/ruído dos equipamentos em laboratório e 101 a ferramenta de perfilagem no interior de poços 10 possa levar a discrepâncias entre as medições realizadas por RMN os respectivos instrumentos e, assim, tornam a difícil a comparação das medições de RMN. De forma importante, o SNR introduz efeitos nas medições de RMN e nas análises resultantes que são complicadas em sua natureza (ou seja, não é um simples efeito de escala). Além disso, o SNR da RMN realizadas pela ferramenta de perfilagem de poços 10 pode ser afetada por condições de fundo de poço, tais como temperatura e salinidade da amostra da formação.

Na modalidade preferida da presente invenção, o ruído de síntese é introduzido às medições por RMN realizada pelo equipamento de laboratório 101 tais que o

SNR destas medições por RMN corresponde ao SNR conhecido ou esperado da RMN realizados ferramenta de perfilagem de poços durante análise por RMN das correspondentes amostras da formação. O SNR da ferramenta que desce ao poço pode ser

5 caracterizado empiricamente de acordo com seu projeto e, possivelmente, em função das condições de fundo de poço (como temperatura e salinidade da amostra da formação). Tais condições poço pode ser medido ou estimado pela análise do líquido no poço da amostra da formação. A RMN

10 dados de medição gerados pela RMN rotina de medição, que é degradada pelo ruído sintético, é interpretado para determinar um ou mais parâmetros petrofísicos (por exemplo, mantendo-se a saturação do óleo ( $S_{or}$ )) expressa pelos dados de medição de RMN. A um ou mais parâmetros petrofísicos a

15 partir dos dados de medição de RMN é então comparada a "informação do terreno" correspondente parâmetro petrofísico que são derivados de medições em laboratório não assente na RMN (e assumidas precisas para os propósitos aqui). O resultados da comparação é usado para determinar

20 uma estimativa de precisão para a interpretação do parâmetro(s). Esta estimativa de precisão é preditiva do desempenho real das medições por RMN realizada pela ferramenta de perfilagem de poços 10. Desta forma, a característica de ruído sintético da ferramenta de

25 perfilagem de poços 10 é usado pelo equipamento de laboratório 101 para prever o desempenho real das medições

de RMN realizadas pela ferramenta de perfilagem no interior de poços 10. A estimativa de precisão pode ser usado para atualizar os protocolos de RMN, parâmetros, tempos médios (ou número de medidas repetidas) realizada pela ferramenta  
5 de perfilagem de poços 10, se necessário. Isto fornece para o planejamento e ajuste da análise de RMN realizadas pela ferramenta que desce ao poço para garantir a precisão desejada, resolução ou discriminação nas propriedades medido pela ferramenta de perfilagem de poços 10.

10 Um fluxo de trabalho representativo que emprega a característica de ruído sintético de uma ferramenta que desce ao poço de perfilagem como parte da análise de RMN em laboratório é indicado nas figuras 13A e 13B. Na etapa 1301, o equipamento de laboratório 101 é utilizado para  
15 realizar a análise de RMN em uma amostra de testemunho e gerar dados de medição por RMN em laboratório conforme descrito neste documento. Na etapa 1303, ruído gaussiano de síntese é introduzido no dados de medição por RMN em laboratório. O ruído sintético (na forma digital) pode ser  
20 gerado pela plataforma de processamento do computador 171 e misturado com a entrada de dados de medição por RMN em laboratório, pela rotina de medição por RMN da Figura 4. Alternativamente, o ruído sintético (em formato analógico) pode ser gerado por circuitos e misturado na sinais de RMN  
25 produzidos pelo circuito receptor 129 para o fornecimento para o bloco de conversão analógico-digital de entrada 131

e posteriormente para a plataforma de processamento de computador 171 durante a rotina de medições por RMN realizadas na plataforma de processamento. O ruído sintético introduzido no laboratório de RMN degrada os dados de medição de tais dados, fornecendo um SNR para tais dados de medição de RMN em laboratório que correspondem aos conhecidos ou esperados SNR dos dados de medição de RMN obtidos pela ferramenta de perfilagem no interior de poços 10 durante a análise RMN das correspondentes amostras da formação. E contemplado que o SNR dos dados de medição por RMN em laboratório serão equivalentes a (ou possivelmente menores que) o conhecido ou esperado SNR dos dados de medição por RMN obtidos pela ferramenta de perfilagem de poço 10.

15 Na etapa 1305, o dados de medição por RMN em laboratório é processado (por exemplo, a inversão) pelo Módulo de Análise de Dados de RMN do equipamento 101 como descrito aqui para obter os correspondentes dados de RMN ferramenta-equivalentes.

20 Na etapa 1307, os dados de RMN ferramenta-equivalente gerados na etapa 1305 são emitidos para uso por um pacote de software de análise da perfilagem por RMN. Na etapa 1309, a saída de dados de RMN ferramenta-equivalentes na etapa 1307 é interpretado pelo pacote de software de 25 análise da perfilagem de RMN para derivar um ou mais parâmetros petrofísicos que são expressos pelos dados de

RMN ferramenta-equivalentes. Por exemplo, um dos parâmetros petrofísicos pode ser a remanescente saturação do óleo ( $S_{or}$ ).

Na etapa 1311, o parâmetro petrofísico de  
5 "informação do terreno" correspondente ao parâmetro petrofísico gerado na etapa 1309 são derivados de medições em laboratório, não baseado nas medições de RMN (e considerados precisos para os propósitos aqui).

Na etapa 1313, o parâmetro petrofísico gerado na  
10 etapa 1309 se compara com os parâmetros petrofísicos(s) gerado na etapa 1311.

Na etapa 1315, o resultado da comparação da etapa  
1313 é usado para determinar uma estimativa de precisão para a interpretação do parâmetro(s) da etapa 1309. Esta  
15 estimativa de precisão é preditiva do desempenho real da RMN realizada pela ferramenta de perfilagem de poços de perfilagem 10. Desta forma, a característica de ruído sintético da ferramenta de perfilagem de poços 10 é usada pelo equipamento de laboratório 101 para prever o  
20 desempenho real das medições de RMN realizadas pela ferramenta de perfilagem no interior de poços 10.

Opcionalmente, na etapa 1317, as etapas 1301-1315 podem ser repetidas para diferentes condições de medição. Por exemplo, para  $S_{or}$ , as medições podem ser repetidas  
25 sobre múltiplos estados de saturação para a amostra do testemunho de teste para fornecer um gráfico de dispersão

dos medida  $S_{or}$ , bem como a "informação do terreno"  $S_{or}$  (linha tracejada) para os estados de saturação diferentes (fig. 14). As estimativas de precisão são representadas pela distância entre os pontos e a linha tracejada. Em 5 outro exemplo, as medidas podem ser repetidas ao longo de múltiplos níveis de SNR relacionados às ferramentas para fornecer um gráfico das estimativas da precisão para os diferentes níveis SNR (fig. 15). Em outro exemplo, a medição pode ser repetida sobre múltiplas iterações com um 10 único nível da SNR. Cada iteração emprega um número variável de sequências de RMN (medições), cujos resultados são calculados juntos como média. Esta técnica é comum para as ferramentas de RMN em poços na medida que o sinal obtido por metia sobre múltiplas sequências de RMN melhora a SNR 15 das medições por RMN. Os dados resultantes derivados de tal procedimento de média é processado para gerar os dados de RMN ferramenta-equivalente na etapa 1305 do fluxo de trabalho. As estimativas da precisão do fluxo de trabalho podem ser marcadas em gráfico como uma função do número de 20 medições em cada iteração (fig. 16).

Na etapa 1319, a estimativa de precisão gerada na etapa 1315 (e possivelmente as múltiplas estimativas de precisão geradas na etapa 1317 e/ou gráficos daí derivados) são utilizados para avaliar e atualizar os protocolos de 25 RMN, parâmetros, tempos médios (ou número de medições repetidas) realizada pela ferramenta de perfilagem de poços

10, se necessário. Isto fornece para o planejamento e ajuste das análises de RMN realizadas pela ferramenta de perfilagem no interior de poços 10 para garantir a precisão desejada, resolução ou discriminação nas propriedades  
5 medidas pela ferramenta de perfilagem de poços 10.

Como descrito acima, a análise de dados provenientes dos dados de RMN medidos pela ferramenta de perfilagem 10, bem como a análise dos dados realizada pelo módulo de Análise de Dados de RMN do equipamento 101 em  
10 laboratório podem empregar uma metodologia de inversão para a derivação da função de distribuição 2-D  $f(D, T_2)$ , que relaciona o coeficiente de difusão  $D$  ao tempo de relaxação spin-spin ( $T_2$ ) da amostra.

Essa inversão pode ser realizada com regularização  
15 de Tikhonov. Muitas vezes, é considerado que as duas dimensões ( $x, y$ ) dos dados apresentam estrutura de produto Tensor e, portanto, as partes essenciais de núcleo do sistema ('kernels') exponenciais  $k_{1,2}$  da função subjacente  $f(x, y)$  são separáveis. Esta hipótese permite que as  
20 matrizes  $K_{1,2}$  serem manejadas independentemente, reduzindo a complexidade computacional da inversão. Os dados podem ser comprimidos para a forma de uma integral linear de Fredholm usando Decomposição do Valor Singular (SVD) da matrizes de 'kernel'. Essa otimização pode ser conseguida usando uma  
25 combinação de truncagem do número de valores singulares, uma restrição não-negativa, e um parâmetro de suavização

que é escolhido de acordo com um dos diversos métodos equivalentes, incluindo mas não limitado a curva-S, Butler-Reeds-Dawson (BRD) e métodos de validação cruzada generalizada (GCV). O método da curva-S é descrito em P.C. Hansen, "Analysis of discrete ill-posed problems by means of the L-curve," SIAM Rev., Vol. 34, No. 4, Dec. 1992, pgs. 561-580. O método BRD está descrito em J.P. Butler et al., "Estimating Solutions of First Kind Integral Equations with Nonnegative Constraints and Optimal Smoothing," SIAM Journal on Numerical Analysis, vol. 18, No. 3, 1981, pp. 381-397. O método GCV está descrito em G. Wahba, "Practical Approximate Solutions to Linear Operator Equations When the Data are Noisy," SIAM Journal on Numerical Analysis, vol. 14, 1977, pp. 651-667, e J.D. Wilson, "Statistical Approach to the Solution of the First Kind Integral Equations Arising in the Study of Materials and their Properties," Journal of Materials Science, vol. 27, Jul. 1992, pp. 3911-3924. No caso da função bidimensional  $f(D, T_2)$  gerado pela difusão das sequências de pulso de edição (fig. 3 e fig. 5), isso não é verdade, porque as amplitudes do eco inicial são atenuadas tanto pela difusão e pela relaxação. Os 'kernels' podem ser tornados separáveis com a alteração da variável

$$t' = 2t_{E,1} + nt_E \quad (3)$$

onde  $2t_{E,1}$  é o espaçamento de eco  $2\tau_{STE}$  da sequência STE,

$t_E$  é o espaçamento de eco para o trem de eco de CPMG, e  $n$  é o índice de eco do trem de eco de CPMG.

Desse modo, a amplitude  $M$  da força de eco pode ser representado como

$$M(t_{E,1}, t') = \iint k_1(D_{eff}, t_{E,1}) k_2(T_2, t') f(D_{eff}, T_2) dD_{eff} dT_2 + E(t_{E,1}, t') \quad (4)$$

onde  $E(t_{E,1}, t')$  é o ruído experimental (erro).

Em seguida da medição da variável, os dados não estão mais em uma grade retangular, como mostrado na Figura 6A. A fim de inverter os dados, os dados devem ser modificados de duas maneiras possíveis. Uma maneira é truncar os dados em uma grade retangular, como ilustrado na Figura 6B, onde os momentos temporais dos dados na segunda dimensão ( $T_2$ ) são iguais. Isso resulta em perda de dados com a maior relação sinal/ruído. A outra maneira é extrapolar os dados para uma grade retangular, como ilustrado na Figura 6C. Esta extrapolação pode resultar na geração de componentes artificiais do tempo de relaxação.

Alternativamente, a inversão térmica pode ser obtida assumindo que os dados não apresentam estrutura de produto Tensor tal que os 'kernels' exponenciais  $k_{1,2}$  da função subjacente  $f(x, y)$  não são separáveis. Neste caso, a amplitude  $M$  da força do eco pode ser representada como

$$M(t_{E,1}, nt_E) = \iint k_0(D_{eff}, T_2, t_{E,1}, nt_E) f(D_{eff}, T_2) dD_{eff} dT_2 + E(t_{E,1}, nt_E) \quad (5)$$

onde  $k_0$  é o produto de Kronecker de  $k_1$  e  $k_2$  tal que

$$k_0 = k_1 \otimes k_2.$$

Nesse caso, os 'kernels'  $k_{1,2}$  compartilham a variável  $t_{E,1}$ . Para a modalidade representativa da sequência de CPMG com campo de gradiente fixo como mostrado na Figura 3,  $k_0$  pode ser representado por

$$k_0 = \exp\left[-\frac{1}{6}\gamma^2 g^2 D_{\text{eff}} t_{E,1}^3\right] \exp\left[-\frac{2t_{E,1}}{T_2}\right] \exp\left[-\frac{nt_E}{T_2}\right]. \quad (6)$$

Para a modalidade representativa da sequência de CPMG com gradiente de modo pulsado como mostrado na Figura 5,  $k_0$  pode ser representado por

$$k_0 = \exp\left[-\gamma^2 g^2 D_{\text{eff}} \frac{\delta(2t_{E,1} - \delta)}{\pi^2}\right] \exp\left[-\frac{2t_{E,1} + nt_E}{T_2}\right]. \quad (7)$$

10

o 'kernel' pode ser modificado para diferentes configurações de pulso de gradiente como descrito em W.S Price, "Pulse-field Gradient Nuclear Magnetic Resonance as a Tool for Studying Translational Diffusion: Part II. Experimental Aspects," Concepts in Magnetic Resonance, vol. 10, 1998, pp. 197-237.

A equação (5) pode ser expressa em notação matricial como  $M = K_0 F + E$ . Nessa implementação, a matriz  $K_0$  completa pode ser gerada como descrito na Patente norte americana U.S. No. 6.937.014, que aqui se incorpora por referência. Isso permite que as matrizes de dados não-retangulares (Fig. 6A), sejam invertidas. Todavia, esta matriz pode conter um grande número de valores, por

20

exemplo, se os dados adquiridos  $M(t_{E,1}, nt_E)$  contém pontos de dados  $i \times j$ , e a função de correlação de saída  $f(D, T_2)$  contém pontos de dados  $m \times n$ , então a matriz  $K_0$  irá conter pontos de dados  $i \times j \times m \times n$ . É comum gerar um grande número de ecos na porção da seqüência de CPMG que codifica o tempo de relaxação  $T_2$  transversal, por exemplo,  $j \sim 10.000$ . O tamanho da matriz de dados de entrada pode ser reduzido tomando médias das janelas das intensidades de eco ou simplesmente dizimando os dados (por exemplo, selecionando 32 ecos em uma base logarítmica de tempo do trem de eco). Devido à natureza da inversão numérica, essa redução nos dados de entrada tem pouco impacto na correlação de saída, considerando que o tamanho da matriz de dados de entrada fica reduzida de forma adequada. Um computador de mesa comum com um sistema operativo de 32 bits normalmente pode gerar  $K_0$  com base em um tamanho de dados de entrada de  $32 \times 32$  e um tamanho de correlação de saída de  $64 \times 64$ . Uma matriz  $K_0$  maior pode ser gerada usando sistemas operacionais de 64 bits, embora o tempo necessário para gerar os valores singulares da matriz  $K_0$  necessárias para a compressão dos dados possa se tornar excessivamente longo.

O método BRD de escolher o melhor parâmetro de suavização  $\alpha$  para a inversão numérica exige o desvio padrão do ruído nos dados. Se a relação sinal/ruído é muito alta,  $\alpha \rightarrow 0$ . Portanto, nenhuma suavização é aplicada e o

resultado contém artefatos adicionais determinados pelo ruído sistemático ou erros nos dados. Também é possível usar o método de validação cruzada generalizada (GCV), que é descrito em detalhes em G. Wahba, "Practical Approximate  
5 Solutions to Linear Operator Equations When the Data are Noisy," SIAM Journal on Numerical Analysis, vol. 14, 1977, pp. 651-667, e J.D. Wilson, "Statistical Approach to the Solution of the First Kind Integral Equations Arising in the Study of Materials and their Properties," Journal of  
10 Materials Science, vol. 27, Jul. 1992, pp. 3911-3924. Este método não requer que o desvio padrão do ruído nos dados.

A operação da seqüência STE-CPMG com gradiente de modo pulsado da Figura 5 foi demonstrada em quatro amostras: água deionizada dopado com cloreto de níquel,  
15 hexadecano, um testemunho de rocha calcária Portland saturado com água, e um testemunho de arenito Bentheimer saturado com salmoura (2 por cento em peso de solução de cloreto de potássio). O arenito foi saturado com água salgada para evitar inchaço osmótico do teor de argila. Os  
20 dados foram obtidos através de um espectrômetro de bancada Oxford Instruments Maran DRX operando em uma frequência de ressonância  $f_0 = 2$  MHz, com um conjunto gradiente tridimensional capaz de fornecer um gradiente máximo  $g_{max} = 0,5$  T/m em cada uma dos eixos x, y, e z. A seqüência de  
25 CPMG com gradiente de modo pulsado da Figura 5 foi implementada com a duração dos pulsos de gradientes de

campo magnético senoidal variando entre  $\delta_{PFG} = 400\mu\text{s}$  a 8 ms, e uma amplitude máxima  $g_{FFG}$  de 0,3 T/m aplicada no eixo y. Isso é equivalente a um campo de gradiente fixo de  $g_{FFG} = 0,191$  T/m em um tempo total de aquisição de cerca de 2 segundos. Na porção da sequência de RMN que codifica o tempo de relaxação transversal, 3.333 ecos foram adquiridos com um tempo de eco  $t_E = 600$  ms.

A Figura 7 mostra os dados brutos adquiridos a partir de uma amostra de água dopada com cloreto de níquel. As linhas contínuas representam os decaimentos de relaxação  $T_2$  ponderados de difusão (trens de ecos de spin de CPMG) com comprimentos de pulso magnético de (de cima para baixo)  $\delta_{PFG} = 400\mu\text{s}$  a 8000  $\mu\text{s}$ . As linhas pontilhadas indicam a intensidade do primeiro eco direto em cada conjunto de dados. Observe que cada um dos decaimentos CPMG começa em um horário diferente, determinado por  $2t_{E,1}$ . A intensidade do eco inicial é ponderada em difusão e desse modo a amplitude diminui à medida que  $\delta$  aumenta. Para destacar a atenuação da difusão, as amplitudes dos 3 primeiros ecos em cada decaimento CPMG da Figura 7 são plotados contra o efetivo tempo de difusão na fig. 8. As intensidades do eco se situam quase numa linha reta nesse gráfico logarítmico linear; uma linha do melhor ajuste foi acrescentada para orientar a visão. Desvios dessa linha ocorrem devido à ponderação variável  $T_2$  nos dados, e do ruído experimental.

Alguns resultados preliminares são apresentados nas

Figuras. 8-12. Em cada gráfico uma linha tracejada horizontal indica o coeficiente de difusão da água a 24,15 °C, e uma linha pontilhada diagonal indica a correlação difusão/relaxação independente da temperatura para os alcanos.

A Figura 8 mostra a correlação  $D-T_2$  obtida a partir de uma amostra de água deionizada dopada com cloreto de níquel para reduzir o tempo de relaxação. Este doping não tem nenhum efeito sobre o coeficiente de auto-difusão da água. No entanto, a redução de ambos os tempos de relaxação transverso ( $T_2$ ) e longitudinal ( $T_1$ ), permite que a seqüência de pulsos sejam implementadas com um atraso mais curto de recuperação  $T_w = 5 \times T_1$  entre varreduras sucessivas. Para típica água deionizada,  $T_1 = T_2 \approx 2s$ . O gráfico mostra um único componente observado em A com  $D = 2,4 \times 10^{-9} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$  e  $T_1 = T_2 = 0,3 \text{ s}$ .

A Figura 9 mostra a correlação  $D-T_2$  para hexadecano. Um único componente é observado em A próximo da linha diagonal "alcano" independente da temperatura, com  $D = 3,7 \times 10^{-9} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$  e  $T_2 = 0,6 \text{ s}$ . O tempo de relaxação  $T_2$  é um pouco menor do que o previsto devido à presença de oxigênio molecular paramagnético dissolvido no líquido.

Uma propriedade crítica da seqüência  $D - T_2$  é a capacidade de distinguir o óleo e água. As Figuras 9 e 10 mostram que a seqüência de CPMG da Figura 5 pode proporcionar momentos de relaxação e coeficientes de

difusão correto ao longo de várias ordens de magnitude e, portanto, ser usada para a caracterização das frações de óleo e água, nos testemunhos de rocha do reservatório.

As Figuras 11 e 12 demonstram a aplicabilidade da seqüência de CPMG da Figura 5 para análise do testemunho de rocha. Embora esses testemunhos sejam apenas saturados com água, as fraturas salientes típicas desses tipos de rocha são visíveis. Na pedra calcária de Portland (fig. 11), dois componentes discretos são observados em A e B. O componente A corresponde à água contida em poros ou fissuras macroscópicas ( $T_2$  longo, alta difusividade aparente), enquanto que o componente B corresponde a água contida na microporosidade ( $T_2$  curto, reduzida difusividade aparente). O coeficiente aparente de difusão é reduzido quando a água está confinada nos poros devido a vias restritas de difusão e tortuosidade da rede interligada do testemunho. Isto é mais significativo no poros de menores dimensões conforme o esperado.

A Figura 12 mostra a correlação D- $T_2$  de arenito Bentheimer saturado com salmoura (água). Esta rocha é conhecida por compreender grãos de areia com um diâmetro típico de ~ 100  $\mu\text{m}$ . Por conseguinte, esta rocha tem uma distribuição muito estreita de tamanhos de poros, como refletido pelo componente dominante de difusão/relaxação observado em A. Um pequeno componente água secundário é também observado em B, o qual está associado ou a poros

menores ou à influência da superfície de poro. Notadamente, um terceiro componente água é observado em C. Tais altas difusividades aparentes foram notada anteriormente em arenitos, embora eles sejam artefatos resultantes da presença de um campo magnético subjacente induzido pelas diferenças de suscetibilidade magnética entre sólidos e líquidos (devido primordialmente à presença de espécies químicas paramagnéticas nos componentes argilosos), preferentemente que pela rápida difusão das moléculas de água.

Vantajosamente, a metodologia da presente invenção (e respectivo sistema e equipamentos) prevê medições por RMN e análises que permitem que dados de correlação da difusão-relaxação sejam adquiridos em um equipamento de RMN em escala de bancada (laboratório) em um tal modo a permitir uma comparação direta com dados equivalentes adquiridos utilizando uma ferramenta de perfilagem de dados de poço por RMN. A comparação direta do conjunto de dados de RMN produzidos por uma ferramenta de perfilagem de dados de poço por RMN e analisador da RMN em escala de bancada podem ser usados para calibrar a interpretação petrofísica das medições de perfilagem do furo de sondagem, porque no laboratório o operador tem acesso às medições independentes sobre a mesma rocha e amostras de fluidos. Essas medidas incluem (mas não se limitam a) a porosidade, distribuição de tamanho de poros, permeabilidade, e saturação de

petróleo e água, viscosidade do óleo, e os indicadores da composição química do óleo cru, todos os quais propriedades petrofísicas influenciam o sinal de RMN adquirido, e para todos os quais são conhecidos métodos de interpretação da arte anterior. A importância das medições de referência surge porque a maioria destes métodos de interpretação (tanto para propriedades de rocha ou de propriedades dos fluidos) estão sujeitas a incertezas e ambigüidades, tanto em processamento de dados e na física da resposta de RMN, onde a rocha diferente ou propriedades do fluido podem dar origem a um semelhante sinal de RMN ou assinatura. Tendo acesso à rocha atual e amostras de fluidos em laboratório, sobre os quais tais propriedades podem ser determinadas com muito menos ambigüidade, é desse modo de grande valor na interpretação das perfilagens de poços por RMN. Para algumas aplicações se torna importante realizar as medições de RMN de laboratório sob condições as mais próximas possíveis daquelas que sejam obtidas na ferramenta de perfilagem atual, porque diferentes induções podem ocorrer para diferentes protocolos de RMN, e porque a relação sinal-ruído pode ser radicalmente diferente entre o laboratório e o furo de sondagem.

A invenção também pode ser usada de forma preditiva para planejar um programa de perfilagens ainda não realizadas. Neste cenário, as medidas em laboratório podem ser realizadas com várias opções de parâmetro, a fim de

prever a resposta provável das formações rochosas para as medições de perfilagem de RMN, e determinar o escopo, ou otimizar as seleções parâmetro necessários para produzir a precisão necessária, a resolução, ou outras discriminações necessárias para que as medições do programa de perfilagem geofísica sejam realizadas. Isso pode ser feito, por exemplo, quando a rocha ou amostras de fluidos da mesma ou de uma formação rochosa semelhante já estejam disponíveis e acreditadas possuírem propriedades representativas da formação a ser estudada. As medições laboratoriais em tais amostras podem ser feitas para planejar a melhor escolha de protocolos ou parâmetros que possam ser feitas em antecedência da realização das reais medições de poço. Tendo determinado uma ótima escolha de um protocolo ou um parâmetro em laboratório, esses parâmetros são então transferidos para a ferramenta de perfilagem, quando as medições são feitas no poço.

Um exercício similar de planejamento pode ser feito na preparação para as medições no furo de sondagem nos poços de observação em conjunto com projetos EOR. Mais especificamente, uma ferramenta da perfilagem por RMN pode ser usada para monitorar o progresso de um projeto de EOR, onde a injeção de gases como o dióxido de carbono, metano, ou misturas desses gases com outros hidrocarbonetos leves podem ser utilizados para melhorar o deslocamento e a recuperação do hidrocarboneto do reservatório. Processos

alternativos de EOR podem envolver o uso de tensoativos químicos para melhorar a recuperação de petróleo, reduzindo a tensão superficial e a detergência. É uma prática normal introduzir poços de observação em tais projetos, os quais  
5 são perfurados principalmente para acompanhar o processo, ao invés de serem para a produção de petróleo, ou injetando gás ou tensoativos. A RMN é uma tecnologia que pode ser utilizada para tais observações, desde que os poços sejam revestidos internamente com tubulares os quais sejam  
10 invisíveis à RMN. Um exemplo de tais poços de observação é descrito na Publicação do Pedido de Patente U.S. No. 2009/0167302. Todavia, por causa do custo de perfuração e de completação de tais poços, antes de serem feitos os comprometimentos de engenharia e financeiros, é importante  
15 ser capaz de prever por meio de estudos laboratoriais que as medições realizadas no furo de sondagem produzirão de fato os dados necessários para realizar o monitoramento exigido.

Em tais poços de observação, as propriedades  
20 básicas da formação serão conhecidas, mediante programas de amostragem e de perfilagem realizados no momento em que o poço é perfurado, e a partir de outras informações conhecidas com respeito ao reservatório portador de hidrocarbonetos. No poço de observação é importante ser  
25 capaz de detectar e medir as mudanças não nas propriedades da rocha (que são, evidentemente, não deve mudar

radicalmente), mas nas propriedades do fluido e conteúdo líquido, com maior evidência na saturação de óleo remanescente em vários momentos durante o projeto EOR. Em tais aplicações, é importante ser capaz de escolher os protocolos, parâmetros e tempos médios (ou número necessário de medições repetidas) tal que a desejada precisão, resolução ou discriminação nas alterações no teor de fluido ou propriedades sejam conseguidas. Nesta pedido, as medições de laboratório podem precisar serem efetuadas usando diferentes estados de saturação do óleo, usando um suporte de amostra (suporte de testemunhos), para ser capaz de alterar a saturação do óleo ou de outros fluidos por vários processos de fluxo. A amostra do testemunho de rocha será escolhida para ser representativa das partes mais importantes da formação rochosa atravessada pelo poço de observação, ou pode incluir várias amostras nas tais medições no laboratório. Além disso, as medições precisarão ser provavelmente realizadas em temperaturas e pressões representativas do reservatório real, uma vez que as propriedades de RMN dos fluidos irão se alterar com a temperatura e pressão. A importância da presente invenção nessa aplicação vem da capacidade de prever com antecedência que as mudanças na saturação do óleo podem ser observadas com a ferramenta de furo de sondagem, com o exigido grau de precisão, e levando em conta a relação sinal-ruído esperada a partir da ferramenta inserida no

furo de sondagem, e dos métodos de processamento de dados que serão utilizados. A melhor confiabilidade em tal planejamento virá das medições de laboratório que simulem a ferramenta de uso no furo de sondagem o tanto quanto possível, levando em conta a relação sinal-ruído disponível na ferramenta (ou um planejamento para um grau necessário de média) e empregar os mesmos métodos de processamento de dados.

Em poços de observação dos tipos citados, há também a necessidade de planejar os protocolos que serão utilizados. A perfilagem geofísica em poços de observação providos de revestimento interno é submetida a poucas restrições práticas que nos "poços nus" (sem revestimento). Em particular, a presença de um revestimento interno elimina o risco de uma ferramenta de ficar presa no reboco lamoso que adere à superfície da rocha exposta em um furo de sondagem. Também, pelo fato do poço de observação não ter outro propósito, a duração do tempo que a ferramenta gasta na perfuração não tem o mesmo custo econômico no impedimento de outras operações. Portanto, a ferramenta pode parar pelo tempo que for necessário, ou empregar protocolos de RMN de longa duração que sejam factíveis no laboratório, mas não usualmente factíveis em perfilagem de furos de sondagem, devido à necessidade da ferramenta em se movimentar continuamente, e de minimizar o tempo total da perfilagem do poço.

Em outro exemplo, a presente invenção pode ser usada para determinar o protocolo de RMN para aplicação no interior do poço que seja exigido para conseguir um nível objetivado de precisão para um ou mais parâmetros de reservatório medidos por uma dada ferramenta de perfilagem por RMN no interior do poço. Por exemplo, a SNR da ferramenta de perfilagem de poço por RMN pode ser melhorado empregando uma média de sinais sobre múltiplas seqüências de RMN. Neste aspecto da invenção, a SNR do equipamento de RMN em laboratório pode ser degradada com a utilização de ruídos sintéticos, como parte das medições por RMN realizados pelo equipamento de RMN de laboratório. Tais medições por RMN são processada para derivar dados de RMN ferramenta-equivalentes. Os dados de RMN ferramenta-equivalente são interpretados para derivar um ou mais parâmetros petrofísicos expressos pelos dados de RMN ferramenta-equivalente. Estes um ou mais parâmetros petrofísicos foram comparados a parâmetros correspondentes derivados das medições de "informação do terreno", e o resultado da comparação é usado para determinar uma estimativa de precisão. A estimativa de precisão é derivada durante várias iterações com diferentes esquemas de médias de sinal. Análise da precisão de estimativas sobre as várias iterações pode ser usada determinar o nível mínimo de médias de sinal para uso na dada ferramenta de perfilagem por RMN no interior do poço a fim de conseguir a

desejada precisão para o um ou mais parâmetros do reservatório medidos pela ferramenta de perfilagem por RMN no interior do poço.

Em outro exemplo, a presente invenção pode ser usada para comparar os parâmetros do reservatório, medida pela ferramenta de perfilagem de poço por RMN e equipamento de RMN de laboratório, a fim de verificar o nível de precisão ou qualidade dos dados dos parâmetros do reservatório, medida pelo ferramenta de perfilagem de poço por RMN, e/ou para demonstrar que existem propriedades da formação que são simplesmente não mensuráveis no contexto do interior do poço (ou seja, nas condições da operação de perfilagem) pelo ferramenta de perfilagem de poço por RMN.

Embora modalidades particulares da invenção tenham sido descritas, não se pretende que a invenção seja limitada a estas, na medida que é pretendido que a invenção seja de escopo o mais amplo possível na arte que irá permitir que a especificação seja igualmente lida. Assim, embora projetos particulares de ferramentas de perfilagens e equipamentos particulares de uso em bancada (laboratório) para uso com RMN tenham sido aqui revelados, será entendido que outros escopos de ferramentas de perfilagem por RMN no interior de poços e equipamentos de bancadas de uso com RMN outros, podem ser usados também. Além disso, embora particulares CPMG no interior de poços e protocolos RMN de campo de gradiente fixo tenham sido revelados, será

entendido que outros CPMG no interior de poços e protocolos RMN de campo de gradiente fixo podem ser usados na ferramenta que desce ao poço. Além disso, embora protocolos particulares de CPMG de laboratório e de RMN de gradiente de modo pulsado tenham sido revelados, será entendido que outros protocolos de RMN de gradiente de modo pulsado de laboratório podem ser usados onde tais protocolos são equivalentes àqueles usados pela ferramenta no interior do poço. Por exemplo, outras adequadas formas de onda de modo pulsado podem ser usadas como um substituto para a forma de onda unipolar semi-senoidal para os pulsos de gradiente como aqui descritos. Além disso, embora metodologias de inversão particulares e de análise de dados de transformação tenham sido descritas para correlacionar informação de relação e de difusão das medições por RMN, será entendido que outras metodologias de inversão e de análises de processamento de dados podem ser igualmente utilizados. Assim, será apreciado por aqueles hábeis na arte que ainda outras alterações podem ser feitas para a invenção fornecida sem se desviar do seu âmbito, tal como reivindicado.

- REIVINDICAÇÕES -

1. MÉTODO PARA USO EM CONJUNTO COM UM EQUIPAMENTO DE LABORATÓRIO QUE DEFINE UM VOLUME AMOSTRAL, o método caracterizado por compreender:

5           para uma amostra recolhida numa dada formação subterrânea, armazenar os correspondentes dados da ferramenta do interior do poço que inclui os parâmetros relativos às medições da ressonância magnética nuclear (RMN) da dada formação subterrânea realizada por uma  
10 ferramenta no interior do poço;

          posicionar a amostra no volume amostral; e  
          realizar pelo menos uma medição de RMN do volume amostral para desse modo determinar uma propriedade da amostra, a pelo menos uma medição de RMN aplicando ao  
15 volume amostral um campo magnético homogêneo estático em conjunto com uma sequência de pulso do campo magnético oscilante e um campo gradiente de modo pulsado, o campo gradiente de modo pulsado definido pelos dados armazenados obtidos da ferramenta no interior do poço correspondentes à  
20 amostra.

2. Método, de acordo com a reivindicação 1, caracterizado por a sequência de pulso do campo magnético oscilante incluir um rebatimento inicial do pulso de radiofrequência (RF) e pelo menos um pulso de reorientação  
25 da RF.

3. Método, de acordo com a reivindicação 1,

caracterizado por a seqüência de pulsos do campo magnético oscilatório ser definida pelos dados armazenados na ferramenta no interior do poço.

4. Método, de acordo com a reivindicação 1, caracterizado por a medição de RMN receber pelo menos um eco de spin proveniente do volume amostral para registro e análise.

5. Método, de acordo com a reivindicação 4, caracterizado por o pelo menos um eco de spin ser codificado para difusão como induzida pelo campo gradiente de modo pulsado.

6. Método, de acordo com a reivindicação 1, caracterizado por as medições por RMN realizadas pela ferramenta que desce ao poço utilizar gradientes de campo fixo que têm amplitude constante em todos os momentos.

7. Método, de acordo com a reivindicação 6, caracterizado por o campo gradiente de modo pulsado para uma dada medição de RMN ser definido por um conjunto de pulsos que são equivalentes ao campo de gradiente fixo para uma correspondente medição de RMN executada pela ferramenta que desce ao poço.

8. Método, de acordo com a reivindicação 7, caracterizado por adicionalmente compreender selecionar pelo menos um parâmetro que define o conjunto de pulsos tal que a integral da amplitude variável no tempo dos pulsos do conjunto durante o tempo de duração dos pulsos do conjunto

compatibiliza o produto da amplitude constante do campo de gradiente fixo e a duração para a correspondente medição de RMN executada pela ferramenta que desce ao poço.

9. Método, de acordo com a reivindicação 8, caracterizado por o pelo menos um parâmetro compreender duração do pulso para o conjunto de pulsos e a duração de pulso ser restringida por um intervalo de tempo  $\tau$  entre um pulso inicial de rebatimento da radiofrequência (RF) e um subsequente pulso de reorientação.

10. Método, de acordo com a reivindicação 7, caracterizado por os dados da ferramenta que desce ao poço incluírem pelo menos um parâmetro que representa um intervalo de tempo referente a uma seqüência de pulsos que é parte das medições por RMN realizadas por uma ferramenta que desce ao poço, a seqüência de pulso gerar pelo menos um eco de codificação da difusão, e onde o campo gradiente de modo pulsado se baseia no pelo menos um parâmetro.

11. Método, de acordo com a reivindicação 10, caracterizado por a seqüência de pulso para gerar pelo menos um eco de codificação da difusão compreender uma seqüência eco estimulada (STE) representada por um intervalo espacial de codificação  $\tau_{STE}$  e um intervalo de armazenamento  $\Delta$  armazenado como parte de dados da ferramenta que desce ao poço, e onde o campo gradiente de modo pulsado é baseada no intervalo espacial de codificação  $\tau_{STE}$  e o intervalo de armazenamento  $\Delta$ .

12. Método, de acordo com a reivindicação 1, caracterizado por a propriedade da amostra compreender um ou mais coeficientes de difusão da amostra derivado por uma metodologia de inversão.

5 13. Método, de acordo com a reivindicação 12, caracterizado por:

a metodologia de inversão derivar uma função de distribuição multidimensional selecionada do grupo que compreende

10 i) uma função de distribuição bidimensional  $f(D, T_2)$  que relaciona o coeficiente de difusão  $D$  aos tempos de relaxação spin-spin ( $T_2$ ) da amostra;

ii) uma função de distribuição bidimensional  $f(D, T_1)$  que relaciona o coeficiente de difusão  $D$  aos tempos de relaxação spin-rede ( $T_1$ ) da amostra;

15 iii) uma função de distribuição tridimensional  $f(D, T_1, T_2)$  que relaciona o coeficiente de difusão  $D$  com os tempos de relaxação spin-rede ( $T_1$ ) da amostra e os tempos de relaxação spin-spin ( $T_2$ ) da amostra.

20 14. Método, de acordo com a reivindicação 12, caracterizado por a metodologia de inversão empregar um método de princípios de máxima entropia (MEP).

15 15. Método, de acordo com a reivindicação 12, caracterizado por a metodologia de inversão corresponder à metodologia de inversão realizada na derivação dos dados de RMN armazenados como parte dos dados da ferramenta que

desce ao poço.

16. Método, de acordo com a reivindicação 1, caracterizado por adicionalmente compreender a introdução de ruído sintético nos dados de medição de RMN derivados pela análise por RMN do volume amostral tal que a relação 5 sinal-ruído (SNR) dos dados de medição de RMN corresponda a uma predeterminada SNR.

17. Método, de acordo com a reivindicação 16, caracterizado por adicionalmente compreender:

10 processar os referidos dados de medição de RMN derivados da análise RMN do volume amostral para gerar dados da ferramenta-equivalentes;

interpretar os dados da ferramenta-equivalentes para derivar pelo menos um parâmetro petrofísico expresso 15 pelos dados da ferramenta-equivalentes;

comparar o pelo menos um parâmetro petrofísico a um correspondente parâmetro petrofísico derivado de uma medição do tipo informações do terreno; e

20 utilizar os resultados da comparação para determinar uma estimativa da precisão.

18. Método, de acordo com a reivindicação 17, caracterizado por as etapas de processamento, interpretação, e comparação serem repetidas sob diferentes condições de medição, a fim de derivar uma pluralidade de 25 estimativas de precisão para as diferentes condições de medição.

19. Método, de acordo com a reivindicação 18, caracterizado por a pluralidade das estimativas de precisão serem usadas para avaliar e atualizar as variáveis da análise de RMN realizadas pela ferramenta que desce ao poço.

20. Método, de acordo com a reivindicação 19, caracterizado por as variáveis definirem pelo menos um dos seguintes:

i) o protocolo de RMN da análise de RMN realizada pela ferramenta que desce ao poço;

ii) ajustes dos parâmetros da análise de RMN realizadas pela ferramenta que desce ao poço;

iii) obter médias dos tempos das análises de RMN realizadas pela ferramenta que desce ao poço; e

iv) o número de medições repetidas para obter a média de sinal realizadas pela ferramenta que desce ao poço.

21. EQUIPAMENTO DE LABORATÓRIO, caracterizado por compreender:

meios para fornecer dados da ferramenta que desce ao poço correspondentes a uma amostra contendo hidrocarbonetos coletados a partir de uma dada formação subterrânea, os dados da ferramenta que desce ao poço, incluindo os parâmetros utilizados por uma ferramenta que desce ao poço durante as medições por ressonância magnética nuclear (RMN) da dada formação subterrânea;

um volume amostral; e

meios de realizar medição para aplicar pelo menos uma medição de RMN ao volume amostral para desse modo determinar uma propriedade de uma amostra posicionada no volume amostral, a pelo menos uma medição de RMN aplicando ao volume amostral um campo magnético estático homogêneo em conjunto com uma sequência de pulsos do campo magnético oscilante e um campo gradiente de modo pulsado, o campo gradiente de modo pulsado definido pelos dados da ferramenta que desce ao poço correspondentes à amostra contendo hidrocarbonetos.

22. Equipamento de laboratório, de acordo com a reivindicação 21, caracterizado por os meios de medição incluírem uma antena de radiofrequência (RF) para a aplicação da sequência de pulsos do campo magnético oscilante ao volume amostral.

23. Equipamento de laboratório, de acordo com a reivindicação 21, caracterizado por os meios de medição incluírem pelo menos uma bobina de gradiente para aplicar o campo gradiente de modo pulsado ao volume amostral.

24. Equipamento de laboratório, de acordo com a reivindicação 21, caracterizado por a sequência de pulso do campo magnético oscilante incluir um pulso inicial de rebatimento da radiofrequência (RF) e pelo menos um pulso de reorientação da RF.

25. Equipamento de laboratório, de acordo com a

reivindicação 21, caracterizado por a pelo menos uma medição de RMN receber pelo menos um eco de spin proveniente do volume amostral para registro e análise.

26. Equipamento de laboratório, de acordo com a  
5 reivindicação 25, caracterizado por o pelo menos um eco de spin codificar a difusão induzida pelo campo gradiente de modo pulsado.

27. Equipamento de laboratório, de acordo com a  
reivindicação 21, caracterizado por as medições por RMN  
10 realizadas pela ferramenta que desce ao poço empregarem gradientes de campo fixo que têm amplitude constante em todos os momentos.

28. Equipamento de laboratório, de acordo com a  
reivindicação 27, caracterizado por o campo gradiente de  
15 modo pulsado para uma medição de RMN ser definido por um conjunto de pulsos que são equivalentes ao campo de gradiente fixo para uma correspondente medição de RMN executada pela ferramenta que desce ao poço.

29. Equipamento de laboratório, de acordo com a  
20 reivindicação 28, caracterizado por os meios de medição incluírem um circuito de programação do pulso do gradiente para a programação de pelo menos um parâmetro que define o conjunto de pulsos, o circuito de programação do pulso do gradiente adaptado para programar o pelo menos um parâmetro  
25 tal que a integral da amplitude variável no tempo dos pulsos do conjunto durante o tempo de duração dos pulsos do

conjunto compatibilizar o produto da amplitude constante do campo de gradiente fixo e a duração para a correspondente medição de RMN realizada pela ferramenta que desce ao poço.

30. Equipamento de laboratório, de acordo com a reivindicação 29, caracterizado por o pelo menos um parâmetro compreender duração de pulso para o conjunto de pulsos e a duração do pulso para o conjunto de pulsos ser restringida por um intervalo de tempo  $\tau$  entre um pulso inicial de rebatimento da radiofrequência (RF) e um subsequente pulso de reorientação.

31. Equipamento de laboratório, de acordo com a reivindicação 29, caracterizado por os dados da ferramenta que desce ao poço incluírem pelo menos um parâmetro que representa um intervalo de tempo referente a uma seqüência de pulsos que é parte das medições por RMN realizadas por uma ferramenta que desce ao poço, a seqüência de pulso gerar pelo menos um eco de codificação da difusão, e onde o campo gradiente de modo pulsado se baseia no pelo menos um parâmetro.

32. Equipamento de laboratório, de acordo com a reivindicação 31, caracterizado por a seqüência de pulso para gerar pelo menos um eco de codificação da difusão compreender uma seqüência eco estimulada (STE) representada por um intervalo espacial de codificação  $\tau_{STE}$  e um intervalo de armazenamento  $\Delta$  armazenado como parte de dados da ferramenta que desce ao poço, e onde o campo gradiente de

modo pulsado é baseada no intervalo espacial de codificação  $\tau_{STE}$  e o intervalo de armazenamento  $\Delta$ .

33. Equipamento de laboratório, de acordo com a reivindicação 21, caracterizado por a propriedade da amostra compreender um ou mais coeficientes de difusão da amostra derivado por uma metodologia de inversão.

34. Equipamento de laboratório, de acordo com a reivindicação 33, caracterizado por:

a metodologia de inversão derivar uma função de distribuição multidimensional selecionada do grupo que compreende

i) uma função de distribuição bidimensional  $f(D, T_2)$  que relaciona o coeficiente de difusão  $D$  aos tempos de relaxação spin-spin ( $T_2$ ) da amostra;

ii) uma função de distribuição bidimensional  $f(D, T_1)$  que relaciona o coeficiente de difusão  $D$  aos tempos de relaxação spin-rede ( $T_1$ ) da amostra;

iii) uma função de distribuição tridimensional  $f(D, T_1, T_2)$  que relaciona o coeficiente de difusão  $D$  com os tempos de relaxação spin-rede ( $T_1$ ) da amostra e os tempos de relaxação spin-spin ( $T_2$ ) da amostra.

35. Equipamento de laboratório, de acordo com a reivindicação 33, caracterizado por a metodologia de inversão empregar um método de princípios de máxima entropia (MEP).

36. Equipamento de laboratório, de acordo com a

reivindicação 33, caracterizado por a metodologia de inversão corresponder à metodologia de inversão realizada na derivação dos dados de RMN armazenados como parte dos dados da ferramenta que desce ao poço.

5           38. Equipamento de laboratório, de acordo com a reivindicação 21, caracterizado por adicionalmente compreender meios para a comparação dos dados de RMN derivados das medições de RMN realizadas pelo equipamento de laboratório de RMN fornecidas como parte dos dados da  
10 ferramenta que desce ao poço.

39. MÉTODO PARA USO EM CONJUNTO COM UM EQUIPAMENTO DE LABORATÓRIO QUE DEFINE UM VOLUME AMOSTRAL, o método caracterizado por compreender:

- i) posicionar uma amostra no volume amostral;
- 15           ii) realizar uma pluralidade de medições por ressonância magnética nuclear (RMN) do volume amostral, a pluralidade de medições de RMN aplicando ao volume amostral um campo magnético estático homogêneo em conjunto com uma seqüência de pulsos de campo magnético oscilante e um campo  
20 gradiente de modo pulsado, onde a pluralidade das medições de RMN são definidas por uma pluralidade de parâmetros que variam no transcurso das medições;
- iii) selecionar os parâmetros que definem uma desejada medição de RMN; e
- 25           iv) armazenar os parâmetros selecionados em iii) para serem emitidos a uma ferramenta que desce ao poço para

a realização de medições de RMN, de acordo com os parâmetros armazenados;

onde a ferramenta que desce ao poço utiliza um campo de gradiente fixo na realização da medição de RMN, o campo de gradiente fixo possuindo amplitude constante todo o tempo, e o campo de gradiente de modo pulsado é adaptado para se compatibilizar ao campo de gradiente fixo da ferramenta que desce ao poço.

40. Método, de acordo com a reivindicação 39, caracterizado por os parâmetros definirem diferentes protocolos de RMN, ajustes, intervalos de tempo, e/ou número de repetições das medições de RMN.

41. Método, de acordo com a reivindicação 39, caracterizado por o campo gradiente de modo pulsado para uma medição de RMN ser definido por um conjunto de pulsos que são equivalentes ao campo de gradiente fixo para uma correspondente medição de RMN realizada pela ferramenta que desce ao poço.

42. Método, de acordo com a reivindicação 41, caracterizado por adicionalmente compreender selecionar pelo menos um parâmetro que define o conjunto de pulsos tal que a integral da amplitude variável no tempo dos pulsos do conjunto durante o tempo de duração dos pulsos do conjunto compatibiliza o produto da amplitude constante do campo de gradiente fixo e a duração para a correspondente medição de RMN executada pela ferramenta que desce ao poço.

43. Método, de acordo com a reivindicação 42, caracterizado por o pelo menos um parâmetro compreender duração de pulso para o conjunto de pulsos e a duração do pulso ser restringida por um intervalo de tempo  $\tau$  entre um pulso inicial de rebatimento da radiofrequência (RF) e um subsequente pulso de reorientação.

44. Método, de acordo com a reivindicação 39, caracterizado por os parâmetros armazenados em iv) representarem um intervalo de tempo pertencente a uma seqüência de pulso que é parte d uma medição de RMN a ser realizada pela ferramenta que desce ao poço, a seqüência de pulso para a geração de pelo menos um eco de codificação da difusão.

45. Método, de acordo com a reivindicação 44, caracterizado por a seqüência de pulso para gerar pelo menos um eco de codificação da difusão compreender uma seqüência eco estimulada (STE), representada por um intervalo espacial de codificação  $\tau_{STE}$  e um intervalo de armazenamento  $\Delta$  armazenado em iv).

46. Método, de acordo com a reivindicação 39, caracterizado por a pluralidade de medições realizadas em RMN ii) serem realizadas sobre condições variáveis da amostra.

47. Método, de acordo com a reivindicação 46, caracterizado por as condições variáveis da amostra submetem a amostra a diferentes pressões e/ou temperaturas.

48. Método, de acordo com a reivindicação 39, caracterizado por a ferramenta que desce ao poço realizar medições por RMN em um poço de observação, as referidas medições de RMN realizadas de acordo com os parâmetros armazenados.

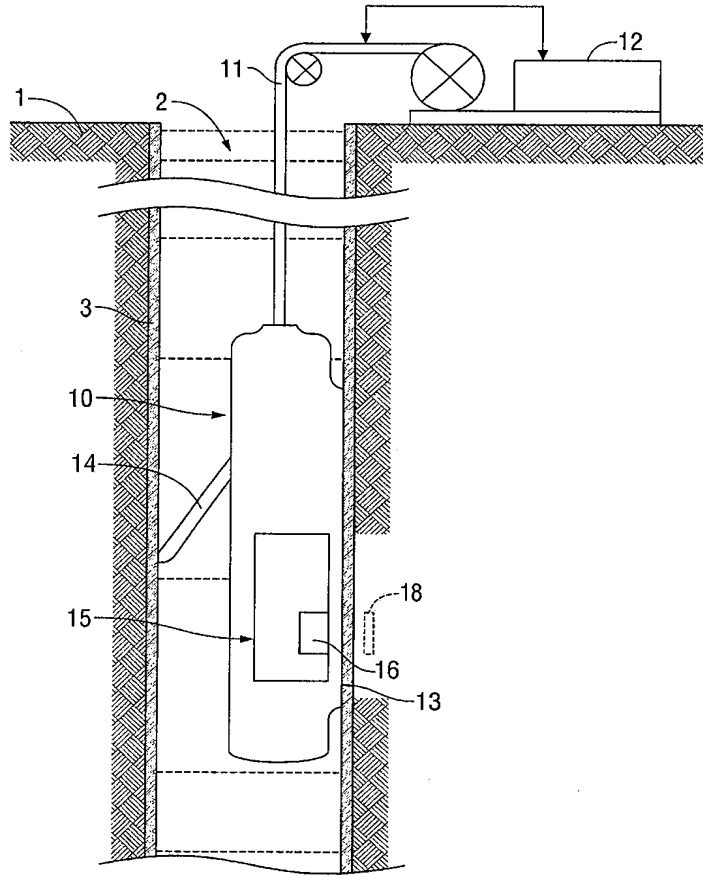


FIG. 1

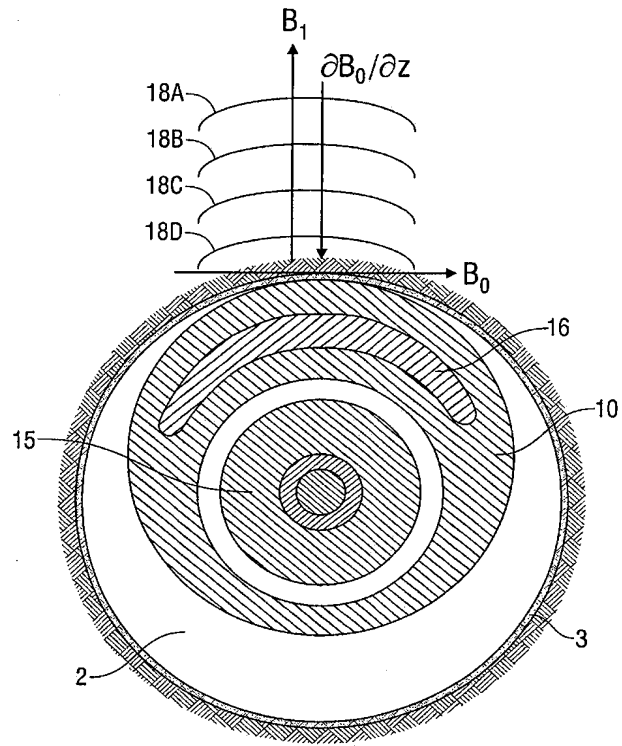


FIG. 2



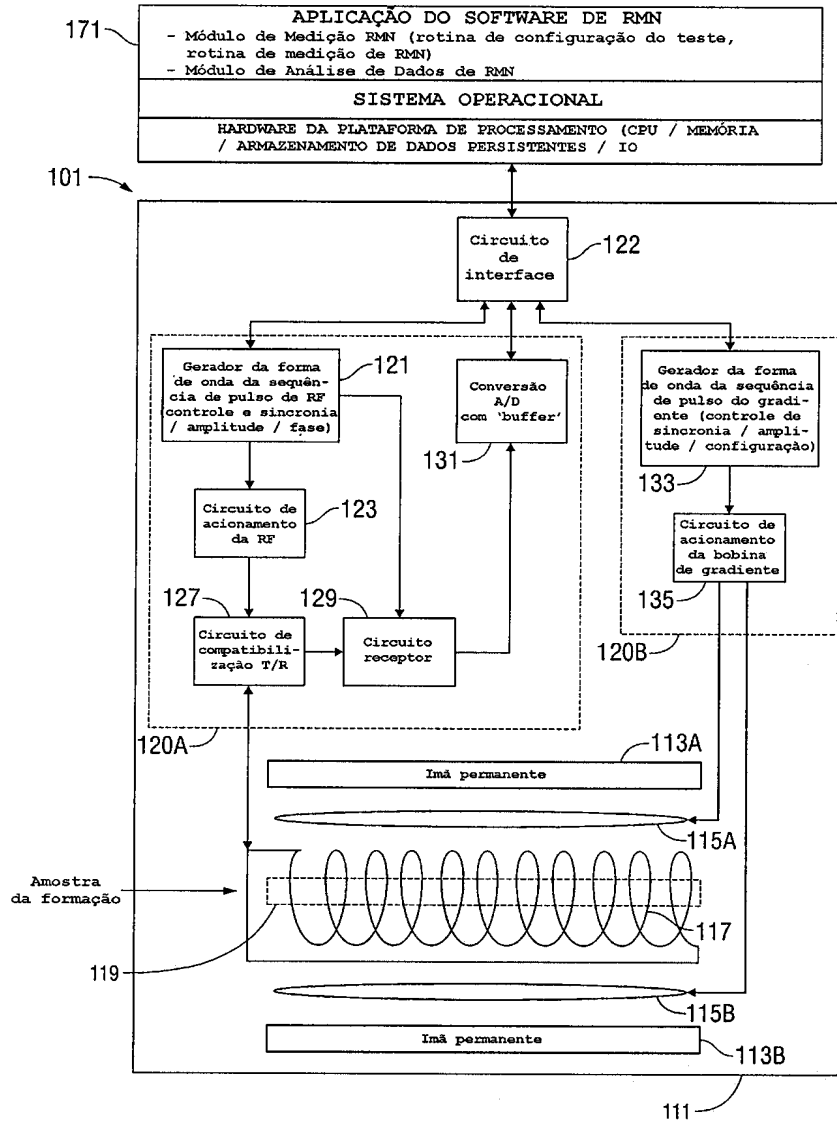


FIG. 4

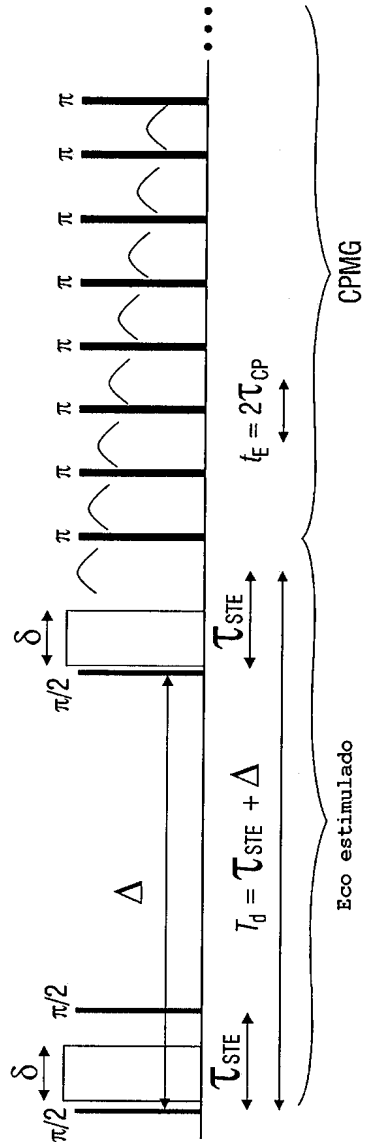
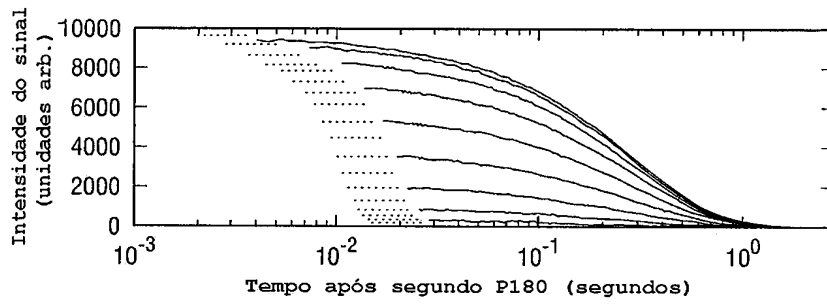
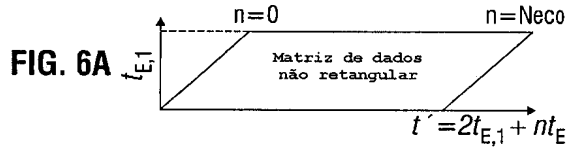


FIG. 5



**FIG. 7**

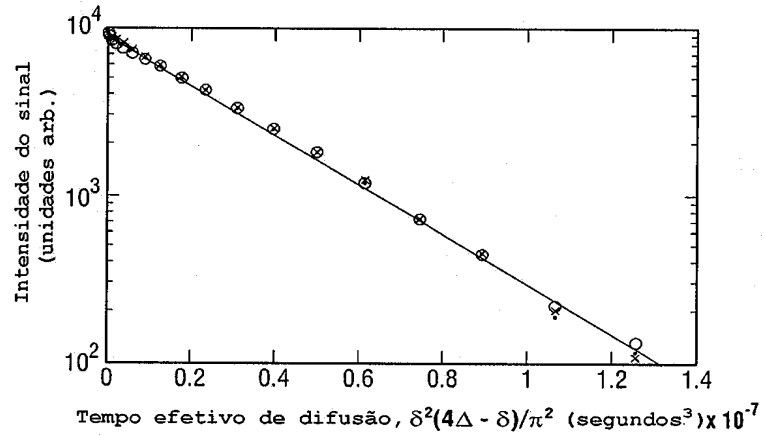


FIG. 8

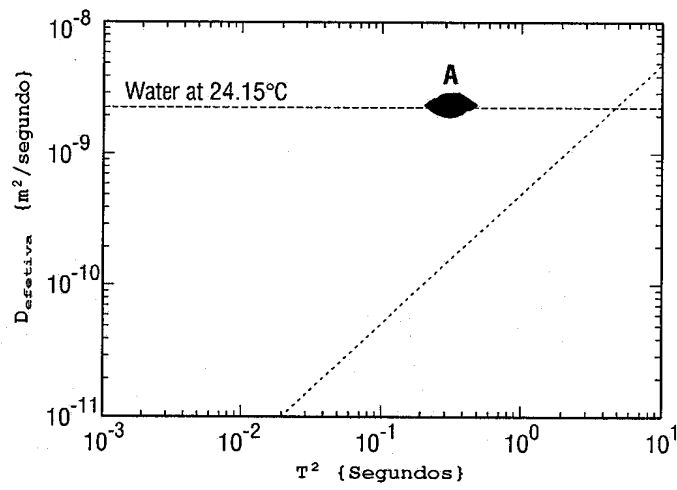


FIG. 9

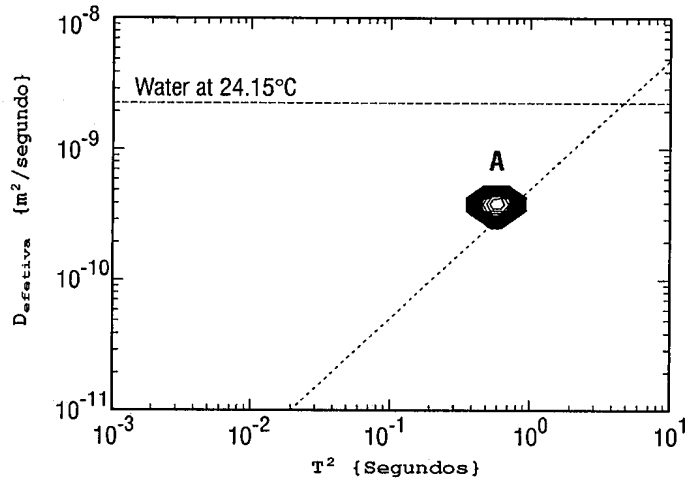


FIG. 10

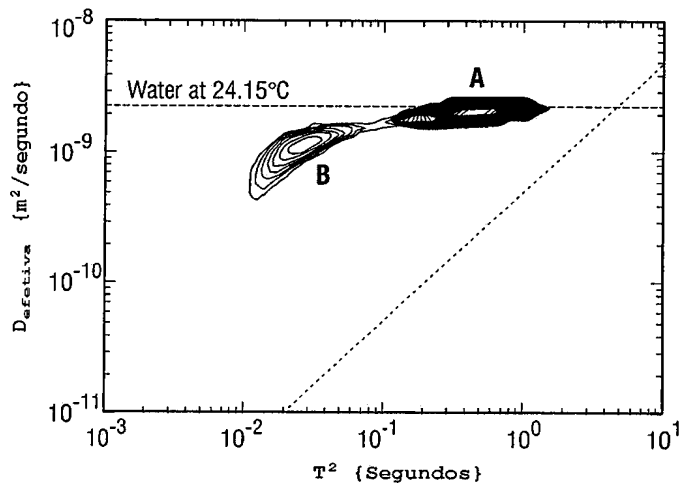


FIG. 11

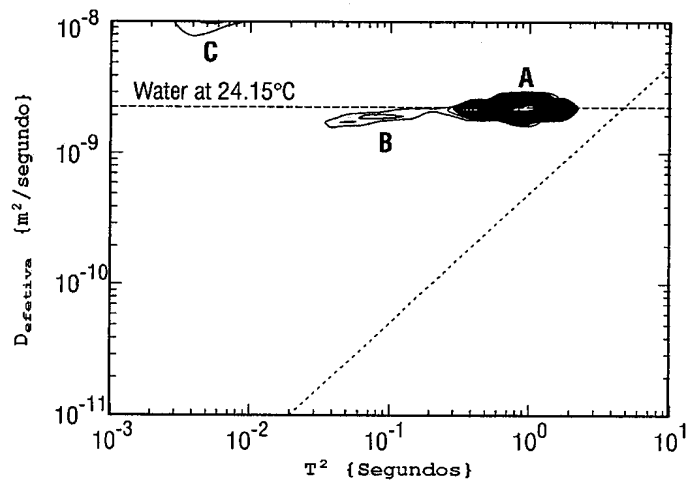


FIG. 12

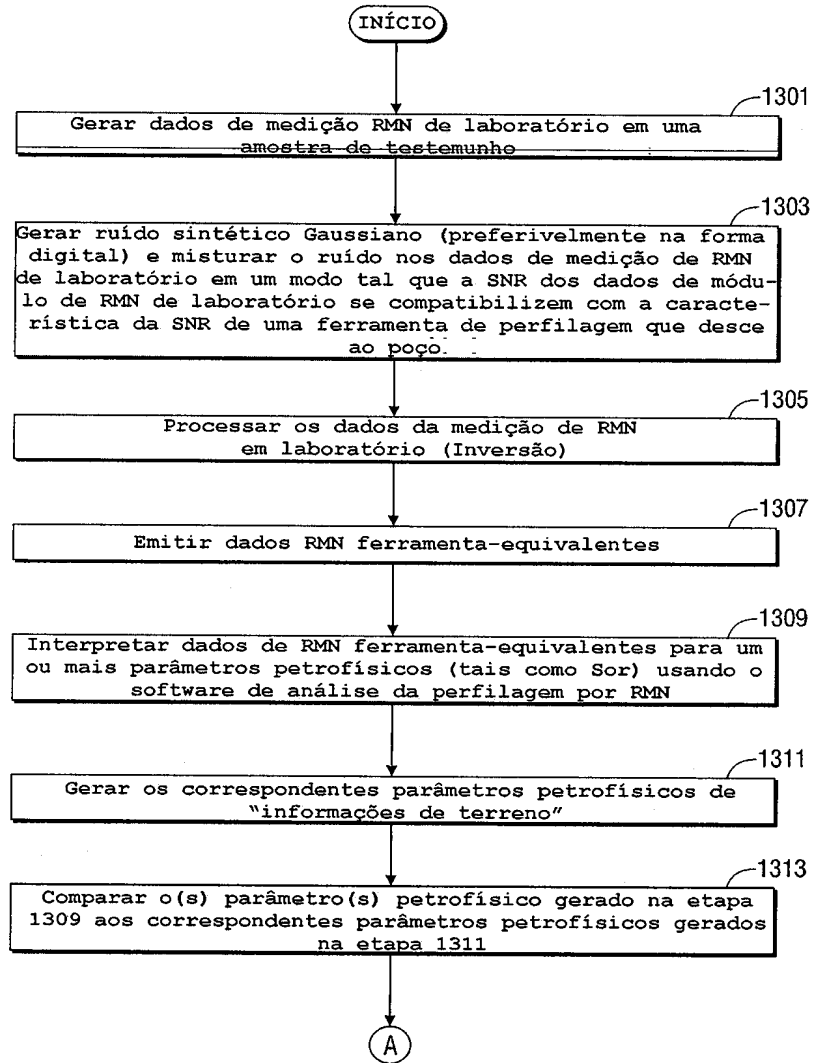


FIG. 13A

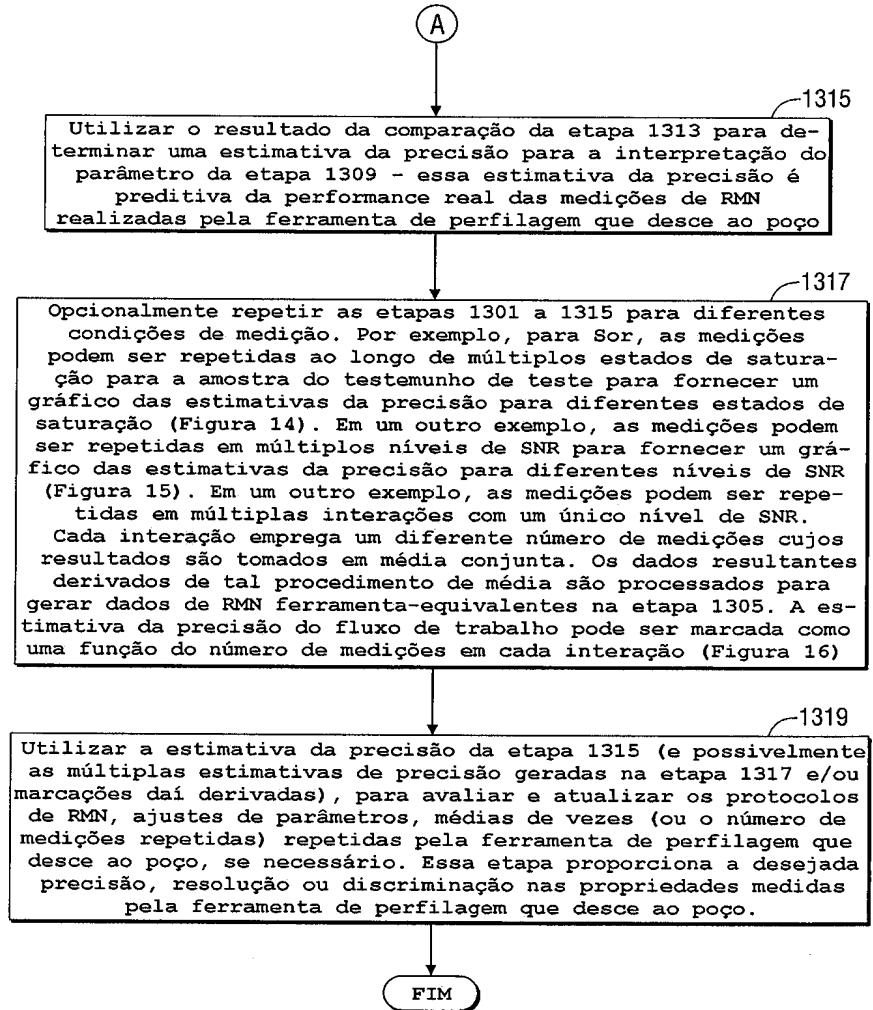


FIG. 13B

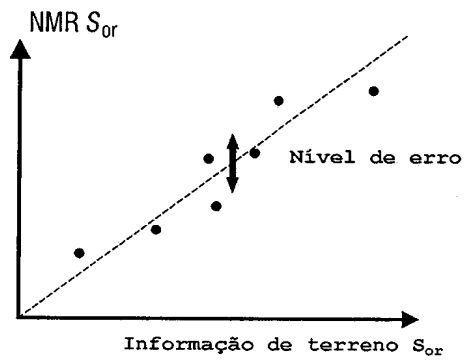


FIG. 14

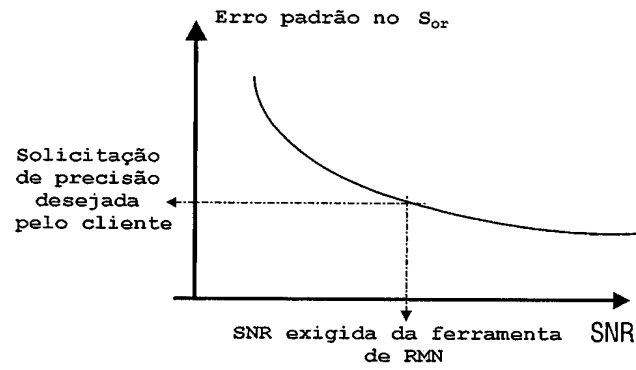


FIG. 15

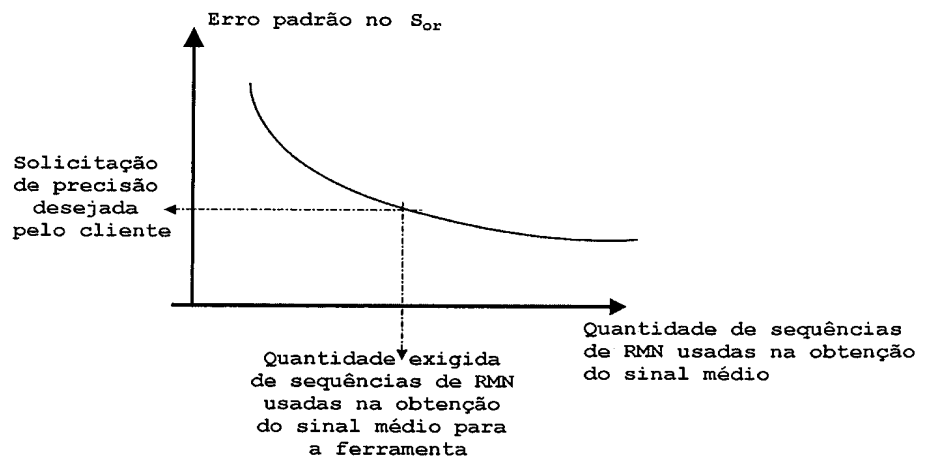


FIG. 16

## - RESUMO -

MÉTODO PARA USO EM CONJUNTO COM UM EQUIPAMENTO DE LABORATÓRIO QUE DEFINE UM VOLUME AMOSTRAL, EQUIPAMENTO DE LABORATÓRIO, E MÉTODO PARA USO EM CONJUNTO COM UM EQUIPAMENTO DE LABORATÓRIO QUE DEFINE UM VOLUME AMOSTRAL

Uma metodologia de RMN em laboratório (e equipamentos laboratoriais correspondentes) define um volume amostral. O método armazena dados da ferramenta que desce ao poço correspondentes a uma amostra portadora de hidrocarboneto coletada de uma dada formação subterrânea. Os dados da ferramenta que desce ao poço incluem parâmetros relativos a campos magnéticos utilizados por uma ferramenta que desce ao poço durante um conjunto de medições por RMN da dada formação subterrânea. A amostra é posicionada no volume amostral do equipamento de laboratório, que aplica um campo magnético estático ao volume amostral. Além disso, o equipamento de laboratório aplica um conjunto de medições por RMN ao volume amostral para desse modo determinar uma propriedade da amostra. As medições por RMN do conjunto de medições incluem uma sequência de pulsos do campo magnético oscilante em conjunto com um campo gradiente de modo pulsado. O campo gradiente de modo pulsado se baseia nos dados armazenados da ferramenta que desce ao poço correspondentes à amostra. Uma metodologia de RMN de laboratório para otimizar as medições de RMN no interior do poço é também descrita.