



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

(21) PI 1103376-2 A2



* B R P I 1 1 0 3 3 7 6 A 2 *

(22) Data de Depósito: 12/07/2011
(43) Data da Publicação: 21/01/2014
(RPI 2246)

(51) Int.Cl.:
G01V 5/10

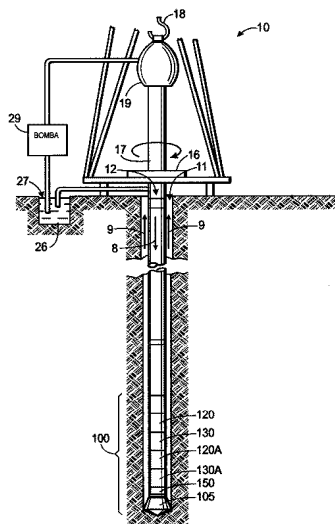
(54) Título: MÉTODO, E FERRAMENTA DENTRO DO POÇO

(30) Prioridade Unionista: 13/07/2010 US 61/363.664,
03/01/2011 US 61/429.237, 03/01/2011 US 61/429.237

(73) Titular(es): Prad Research and Development Limited

(72) Inventor(es): Marie-Laure Mauborgne, Michael Evans

(57) Resumo: MÉTODO, E FERRAMENTA DENTRO DO POÇO. Sistemas, métodos e dispositivos são fornecidos para determinar uma medição de densidade nêutron-gama (NGD) precisa para uma ampla variedade de formações, incluindo formações de baixo índice de hidrogênio ou baixa porosidade e formações com elementos pesados. Por exemplo, essa medição de NGD pode ser obtida emitindo nêutrons para uma formação de modo que alguns dos nêutrons se espalhem inelasticamente para fora dos elementos da formação e gerem raios gama inelásticos. Os nêutrons e os raios gama inelásticos que retornam para a ferramenta dentro do poço podem ser detectados. Acredita-se que algumas características de determinadas formações afetam o transporte de nêutrons rápido das formações. Assim, se uma formação tiver uma ou mais dessas características, se pode aplicar uma correção à taxa de nêutrons contada, a taxa de raios gama inelásticos contada ou a função de correção de transporte de nêutrons, mediante a qual a densidade nêutron-gama (NGD) pode ser determinada.



MÉTODO, E FERRAMENTA DENTRO DO POÇO

A presente comunicação se refere geralmente a perfilagem de poço por densidade de nêutron-gama (NGD) e, mais particularmente, às técnicas para obter uma medição
5 NGD precisa em certas formações.

FUNDAMENTOS

Esta seção se destina a apresentar o leitor aos vários aspectos da arte que podem estar relacionados a diversos aspectos da presente divulgação que são descritos
10 e/ou reivindicados abaixo. Acredita-se que esta discussão seja útil para fornecer ao leitor informações básicas para facilitar uma melhor compreensão dos vários aspectos da presente divulgação. Por conseguinte, deve ser entendido que estas afirmações devem ser lidas a esta luz e não como
15 admissões de técnica anterior.

Densidade de formação é uma medição frequentemente obtida durante perfilagem de poço. Uma maneira de determinar a densidade de formação pode ser denominada como uma medição de densidade gama a qual envolve detectar a
20 extensão até a qual os raios gama se espalham através da formação. Convencionalmente, obter uma medição de densidade gama tem envolvido irradiar a formação com raios gama usando uma fonte radioisotópica (por exemplo, ^{137}Cs ou $^{241}\text{AmBe}$). Estes raios gama podem espalhar por Compton para
25 fora os elétrons presentes na formação. Dependendo da quantidade de espalhamento Compton, alguns destes raios

gama podem ser detectados por um detector de raios gama afastado por alguma distância da fonte de raios gama. Uma vez que a concentração de elétrons na formação é proporcional ao número atômico dos elementos da formação e ao grau ao qual os raios gama espalham por Compton e são detectados pelo detector de raios gama se relaciona à concentração de elétrons, a densidade da formação pode ser determinada com base na taxa de contagem de raios gama detectados.

10 O uso de fontes radioisotópicas em uma ferramenta dentro do poço pode ser indesejável, portanto técnicas têm sido desenvolvidas para gerar fótons para uma medição de densidade de formação sem fontes de raios gama radioisotópicas. Uma dessas técnicas é denominada como uma
15 medição de densidade nêutron-gama (NGD), em distinção a medição de densidade gama-gama (GGD) convencional. Uma medição NGD envolve emitir nêutrons para a formação usando um gerador de nêutrons. Alguns destes nêutrons podem espalhar inelasticamente para de certos elementos na
20 formação, gerando raios gama inelásticos que podem permitir uma determinação de densidade de formação. Embora uma medição NGD baseada nestes raios gama possa ser precisa em algumas formações, a medição NGD pode ser menos precisa em outras formações.

25

SUMÁRIO

Um sumário de certas modalidades divulgadas aqui é definido a seguir. Deve ser entendido que estes aspectos

são apresentados apenas para fornecer ao leitor um breve sumário destas determinadas modalidades e que estes aspectos não são destinados a limitar o escopo desta divulgação. Com efeito, esta divulgação pode abranger uma
5 variedade de aspectos que não podem ser definidos abaixo.

As presentes modalidades referem-se aos sistemas, métodos e dispositivos para determinar uma medição de densidade nêutron-gama (NGD) precisa para uma ampla variedade de formações, incluindo formações baixo índice de
10 hidrogênio ou baixa porosidade e formações com elementos pesados. Por exemplo, uma medição NGD pode ser obtida emitindo nêutrons para uma formação, de modo que alguns dos nêutrons inelasticamente espalhem para fora de elementos da formação e gerem raios gama inelásticos. Os nêutrons e os
15 raios gama inelásticos que retornam para a ferramenta dentro do poço podem ser detectados. Acredita-se que algumas características da formação afetam o transporte de nêutrons rápido da formação. Assim, se a formação tiver essas características, uma correção pode ser aplicada à
20 taxa de contagem de nêutrons, à taxa de contagem de raios gama inelásticos ou à função de correção de transporte de nêutrons, mediante a qual a densidade nêutron-gama (NGD) pode ser determinada.

Em outro exemplo, uma ferramenta dentro do poço
25 pode incluir um gerador de nêutrons, um detector de nêutrons, dois detectores de raios gama e circuitos de processamento de dados. O gerador de nêutrons pode emitir

nêutrons para uma formação a uma energia suficiente para fazer com que alguns dos nêutrons espalhem inelasticamente para fora de elementos da formação, criando raios gama inelásticos. O detector de nêutrons pode detectar uma taxa de contagem de nêutrons que retornam para a ferramenta dentro do poço, enquanto os detectores de raios gama podem detectar primeiras e segundas taxas de contagem de raios gama inelásticos que espalham por Compton através da formação para atingir a ferramenta dentro do poço. Os circuitos de processamento de dados podem receber a taxa de contagem de nêutrons, a primeira taxa de contagem de raios gama inelásticos e a segunda taxa de contagem de raios gama inelásticos, usando-as para determinar uma densidade nêutron-gama que é precisa para formações de baixo índice de hidrogênio ou baixa porosidade e formações com elementos pesados.

A título de exemplo, os circuitos de processamento de dados podem determinar uma porosidade aparente da formação ou uma estimativa de um sinal de nêutrons rápido que seria detectado por um detector de nêutron rápido se tal detector de nêutron rápido estivesse presente na ferramenta dentro do poço. Esta estimativa do sinal de nêutron rápido pode ser determinada com base pelo menos em parte na taxa de contagem de nêutrons, na primeira taxa de contagem de raios gama inelásticos e/ou na segunda taxa de contagem de raios gama inelásticos. Os circuitos de processamento de dados podem aplicar uma correção à taxa de

contagem de nêutrons, à taxa de contagem de raios gama inelásticos, ou e/ou à função de correção de transporte de nêutrons, quando a porosidade aparente da formação for menor do que um limite ou quando a estimativa do transporte de nêutron rápido da formação estiver fora de um limite. Após isso, os circuitos de processamento de dados podem determinar a densidade da formação com base pelo menos em parte na taxa de contagem corrigida de nêutrons, de raios gama inelásticos e/ou na função de correção de transporte de nêutrons.

Efeitos técnicos da presente divulgação incluem a determinação precisa de uma medição de densidade nêutron-gama (NGD) para uma ampla variedade de formações, incluindo formações com baixo índice de hidrogênio ou baixa porosidade e formações com elementos pesados. Estas medições NGD podem permanecer precisas mesmo quando a configuração de uma ferramenta dentro do poço, usada para obter as taxas de contagem de nêutrons e as taxas de contagem de raios gama usadas na medição NGD, não tem uma configuração ideal. Assim, apesar da falta de um detector de nêutron rápido ou apesar de um detector de nêutron poder ser colocado em um espaçamento subótimo da fonte de nêutrons, uma medição NGD precisa ainda pode ser obtida usando os sistemas e as técnicas divulgadas acima.

Vários refinamentos das características acima podem existir em relação a vários aspectos da presente divulgação. Recursos adicionais também podem ser

incorporados nestes vários aspectos. Esses recursos e refinamentos adicionais podem existir individualmente ou em qualquer combinação. Por exemplo, vários recursos discutidos abaixo em relação a uma ou mais das modalidades
5 ilustradas podem ser incorporados em qualquer um dos aspectos supramencionados da presente divulgação sozinhos ou em qualquer combinação. O breve sumário apresentado acima se destina apenas a familiarizar o leitor com certos aspectos e contextos de modalidades da presente divulgação
10 sem limitação da matéria reivindicada.

BREVE DESCRIÇÃO DOS DESENHOS

Vários aspectos desta divulgação podem ser mais bem compreendidos mediante leitura da seguinte descrição detalhada e mediante referência aos desenhos nos quais:

15 A FIG. 1 é um diagrama esquemático de um sistema de local de poço empregando um sistema densidade nêutron-gama (NGD) de acordo com uma modalidade.

As Figuras 2 e 3 são diagramas de blocos esquemáticos representando um sistema NGD capaz de medir
20 com precisão densidade em uma formação de porosidade baixa ou uma formação que inclui elementos pesados de acordo com uma modalidade.

A FIG. 4 é um diagrama esquemático representando a operação de perfilagem de poço usando o sistema NGD das
25 FIGS. 2 e 3 de acordo com uma modalidade.

A FIG. 5 é um fluxograma descrevendo uma modalidade de um método para realizar a operação de perfilagem de poço

da FIG. 4.

A FIG. 6 é um gráfico cruzado comparando densidade de formação conhecida contra densidade de formação obtida sem corrigir taxas de contagem de nêutrons ou raios gama de acordo com uma modalidade.

A FIG. 7 é um fluxograma descrevendo uma modalidade de um método para obter uma medição de densidade de formação precisa em uma formação de baixa porosidade.

A FIG. 8 é um gráfico modelando uma função de ponderação utilizada para determinar uma taxa de contagem de nêutrons corrigida em uma formação de porosidade baixa de acordo com uma modalidade.

A FIG. 9 é um diagrama de blocos esquemático ilustrando uma maneira de visualizar o efeito do processo da FIG. 7 de acordo com uma modalidade.

A FIG. 10 é um gráfico cruzado comparando densidade de formação conhecida contra densidade de formação obtida depois de corrigir as taxas de contagem de nêutrons para formações de baixa porosidade de acordo com uma modalidade.

A FIG. 11 é um fluxograma descrevendo uma modalidade de um método para obter uma medição de densidade formação precisa em uma formação que inclui elementos pesados.

A FIG. 12 é um gráfico modelando uma comparação entre uma razão de correção de nêutron rápido e densidade de elétrons de acordo com uma modalidade.

A FIG. 13 é um gráfico modelando uma comparação

entre uma razão de correção de nêutron rápido e a densidade efetiva de acordo com uma modalidade.

A FIG. 14 é um gráfico modelando uma diferença entre uma razão de correção de nêutron rápido e densidade efetiva de acordo com uma modalidade; e

A FIG. 15 é um gráfico cruzado comparando densidade de formação conhecida contra densidade de formação obtida depois de aplicar correções adicionais para formações de baixa porosidade e formações com elementos pesados, de acordo com uma modalidade.

DESCRIÇÃO DETALHADA

Uma ou mais modalidades específicas da presente divulgação serão descritas abaixo. Estas modalidades descritas são apenas exemplos das técnicas atualmente divulgadas. Além disso, em um esforço para fornecer uma descrição concisa destas modalidades, todas as características de uma implementação real não podem ser descritas no relatório. Deve ser apreciado que no desenvolvimento de qualquer implementação real, como em qualquer projeto de engenharia ou design, inúmeras decisões específicas de implementação podem ser tomadas para atingir objetivos específicos dos desenvolvedores, tal como conformidade com restrições relativas ao sistema e empresariais, que podem variar de uma implementação para outra. Além disso, deve ser apreciado que tal esforço de desenvolvimento pode ser complexo e demorado, mas seria, no entanto, um empreendimento de rotina de projeto, fabricação

e construção para aqueles de habilitados na técnica tendo o(s) benefício(s) desta divulgação.

Ao apresentar elementos de várias modalidades da presente divulgação, os artigos "um", "uma" e "o", "a" são destinados a significar que há um ou mais elementos. Os termos "compreendendo", "incluindo" e "tendo" são destinados a ser inclusivos e significam que pode haver elementos adicionais que não os elementos listados. Adicionalmente, deve ser entendido que as referências a "uma modalidade" ou "a modalidade" da presente divulgação não se destinam a ser interpretadas como excluindo a existência de modalidades adicionais que também incorporam os recursos recitados.

A presente divulgação se refere a sistemas e técnicas para obter uma medição de densidade nêutron-gama (NGD) que é precisa para diversas formações, incluindo formações de baixa porosidade e formações com elementos pesados. Em geral, uma ferramenta dentro do poço para obter essa medição NGD pode incluir uma fonte de nêutrons, pelo menos um detector de nêutrons e dois detectores de raios gama. Embora a ferramenta dentro do poço esteja dentro de um poço de uma formação, a fonte de nêutrons pode emitir nêutrons rápidos de pelo menos 2 MeV para a formação por um breve período de tempo, denominado aqui como uma "porta de arrebatamento", durante o qual os nêutrons podem espalhar inelasticamente para fora de certos elementos na formação (por exemplo, oxigênio) para gerar raios gama. Os

detectores de raios gama da ferramenta dentro do poço podem detectar estes raios gama inelásticos. A medição NGD da formação pode ser uma função de uma taxa de contagem destes raios gama inelásticos, corrigida por uma função de correção de transporte de nêutrons com base em uma taxa de contagem de nêutrons do(s) detector(es) de nêutrons. Tal função de correção de transporte de nêutrons geralmente pode considerar com precisão o transporte de nêutrons da maioria das formações comumente encontradas em um poço de petróleo e/ou gás, resultando em uma medição NGD precisa. Como usada neste documento, uma medição NGD "precisa" pode referir-se a uma medição NGD que está dentro de cerca de $0,03 \text{ g/cm}^3$ da densidade verdadeira de uma formação.

Acredita-se que contagens de nêutrons de algumas configurações de ferramenta dentro do poço não podem levar em conta com precisão o transporte de nêutrons rápidos em certas formações. Por exemplo, quando a ferramenta dentro do poço não inclui um detector de nêutrons rápidos, detectores de nêutrons térmicos ou epitérmicos podem ser utilizados para estimar a distribuição de nêutrons rápidos, mas as taxas de contagem de detectores de nêutrons térmicos ou epitérmicos nem sempre podem refletir com precisão o transporte de nêutrons rápidos de algumas formações da mesma forma que um detector de nêutrons rápidos faria. Além disso, a colocação de tais detectores de nêutrons térmicos e/ou epitérmicos na ferramenta dentro do poço pode envolver uma variedade de considerações para NGD, bem como muitas

outras medições de perfilagem de poço. Como tal, alguns destes detectores de nêutrons térmicos ou epitérmicos podem não estar em um local dentro da ferramenta dentro do poço que é mais adequado para detectar taxas de contagem de nêutrons, a fim de refletir com precisão o transporte de nêutrons de algumas formações, quando aplicadas em uma função de correção de transporte de nêutrons. Estas situações podem surgir quando uma medição NGD é obtida em certas formações incluindo formações com baixa porosidade ou baixo índice de hidrogênio ou formações com elementos pesados além de algum limite de concentração.

A natureza destas formações agora será brevemente descrita. Como deve ser apreciado, uma formação com baixa porosidade tem espaços de poros que são relativamente pequenos. Uma formação de baixa porosidade muitas vezes também terá um baixo índice de hidrogênio, uma vez que os poros de uma formação de baixa porosidade podem ter pouco espaço para hidrogênio (por exemplo, em água, óleo e/ou gás). Algumas formações, tal como folhelhos e argilas, podem conter hidrogênio independente de seus espaços de poros. Para estas formações contendo hidrogênio, a baixa porosidade não necessariamente resultará em um baixo índice de hidrogênio porque hidrogênio em outro lugar dos poros da formação será refletido na determinação do índice de hidrogênio. Acredita-se que formações de baixa porosidade e baixo índice de hidrogênio têm transportes de nêutrons rápidos que diferem em maneiras similares de muitas outras

formações e que podem se beneficiar das técnicas atuais. Como tal, os termos "baixa porosidade" e "baixo índice de hidrogênio" podem ser usados em grande parte de forma intercambiável em toda a presente divulgação. Formações com
5 elementos pesados, tal como arenito com hematita ou alumina, também podem ter transportes de nêutrons rápidos que diferem em maneiras similares de muitas outras formações. Como usado neste documento, o termo "formação com elementos pesados" se refere a uma formação com uma
10 concentração de elementos de massa atômica de 20 ou maior (por exemplo, folhelhos contendo altas concentrações de ferro ou alumínio) além de um limite de concentração.

De acordo com modalidades da presente divulgação, quando uma medição NGD é obtida em uma formação, tal como
15 uma formação de baixa porosidade ou baixo índice de hidrogênio, ou uma formação com elementos pesados além de algum limite de concentração, tendo características que afetam de forma detectável o transporte de nêutrons rápidos em uma maneira que difere de outras formações, a(s) taxa(s)
20 de contagem de nêutrons, a(s) taxa(s) de contagem de raios gama usada(s) para a medição NGD, e/ou uma função de correção de transporte de nêutrons podem ser modificadas para levar em conta com mais precisão o transporte de nêutrons rápidos da formação. Estas ou quaisquer outras
25 correções adequadas podem ser aplicadas quando a formação tiver uma ou mais características (por exemplo, baixa porosidade ou concentração de elementos pesados) que são

esperadas fazer com que a taxa de contagem de nêutrons e/ou raios gama induzidos por nêutrons não exatamente correspondam a um transporte de nêutrons rápidos da formação, quando a taxa de contagem de nêutrons e/ou raios gama é aplicada em uma função de correção de transporte de nêutrons.

Com o acima exposto em mente, a FIG. 1 ilustra um sistema de local de poço no qual o sistema NGD divulgado pode ser empregado. O sistema de local poço da FIG. 1 pode ser em terra ou no mar. No sistema de local de poço da FIG. 1, um poço 11 pode ser formado em formações na subsuperfície por perfuração rotativa usando qualquer técnica adequada. Uma coluna de perfuração 12 pode ser suspensa dentro de um poço 11 e pode ter composição de fundo 100 que inclui uma broca de perfuração 105 em sua extremidade inferior. Um sistema de superfície do sistema de local de poço da FIG. 1 pode incluir um conjunto de plataforma e torre 10 posicionado sobre o poço 11, o conjunto de plataforma e torre 10, incluindo uma mesa rotativa 16, kelly 17, gancho 18 e cabeça injetora rotativa 19. A coluna de perfuração 12 pode ser girada pela mesa rotativa 16, energizada por qualquer meio adequado, a qual engata no kelly 17 na extremidade superior da coluna de perfuração 12. A coluna de perfuração 12 pode ser suspensa do gancho 18 fixado a uma catarina (não mostrada) através do kelly 17 e da cabeça injetora rotativa 19, o que permite rotação da coluna de perfuração 12 relativa ao gancho 18.

Um sistema de top drive como alternativa poderia ser usado, o qual pode ser um sistema de top drive bem conhecido daqueles versados na técnica.

No sistema de local de poço da FIG. 1, o sistema de superfície pode também incluir fluido ou lama de perfuração 26 armazenada em um tanque 27 formado no local do poço. Uma bomba 29 pode distribuir o fluido de perfuração 26 para o interior da coluna de perfuração 12 através de uma abertura na cabeça giratória 19, fazendo com que o fluido de perfuração escoe para baixo através da coluna de perfuração 12 conforme indicado pela seta direcional 8. O fluido de perfuração 26 pode sair da coluna de perfuração 12 através de aberturas na broca de perfuração 105 e circular para cima através da região anular entre o exterior da coluna de perfuração 12 e a parede do poço 11, como indicado pelas setas direcionais 9. Desta maneira bem conhecida, o fluido de perfuração 26 lubrifica a broca de perfuração 105 e transporta fragmentos e cascalhos da formação até à superfície quando o fluido 26 é retornado para o tanque 27 para recirculação.

A composição de fundo 100 do sistema de local de poço da FIG. 1 pode incluir um módulo de perfilagem durante perfuração (LWD) 120 e/ou um módulo de medição durante perfuração (MWD) 130, um sistema e motor roto-orientável 150 e a broca 105. O módulo LWD 120 pode ser alojado em um tipo especial de colar de perfuração, como é conhecido na arte, e pode conter um ou mais tipos conhecidos de

ferramentas de perfilagem. Será também entendido que mais de um módulo LWD pode ser empregado, como geralmente representado no numeral 120A. Como tal, referências ao módulo LWD 120 alternativamente podem significar um módulo na posição de 120A também. O módulo LWD 120 pode incluir recursos para medir, processar e armazenar informações, bem como para comunicar com equipamentos de superfície. O módulo LWD 120 pode ser empregado para obter uma medição de densidade nêutron-gama (NGD), como será discutido mais adiante.

O módulo MWD 130 também pode ser alojado em um tipo especial de colar de perfuração, como é conhecido na arte, e pode conter um ou mais dispositivos para medir características da coluna de perfuração e broca de perfuração. Será também entendido que mais de um MWD pode ser empregado, como geralmente representado no numeral 130A. Como tal, referências ao módulo MWD 130 alternativamente podem significar um módulo na posição 130A também. O módulo MWD 130 também pode incluir um aparelho para gerar energia elétrica para o sistema dentro do poço. Tal um gerador elétrico pode incluir, por exemplo, um gerador de turbina de lama alimentado pelo fluxo do fluido de perfuração, mas outros sistemas de energia e/ou bateria podem ser empregados adicionalmente ou alternativamente. No sistema de local de poço da FIG. 1, o módulo MWD 130 pode incluir um ou mais dos seguintes tipos de dispositivos de medição: um dispositivo de medição de peso na broca, um

dispositivo de medição de torque, um dispositivo de medição de vibração, um dispositivo de medição de choque, um dispositivo de medição de calço de controle, um dispositivo de medição de direção e/ou um dispositivo de medição de
5 inclinação.

O módulo LWD 120 pode ser usado em um sistema de densidade nêutron-gama (NGD), como mostrado nas FIGS. 2 e 3, que pode medir com precisão uma densidade em formações incluindo formações de baixa porosidade ou de baixo índice
10 de hidrogênio e/ou formações com elementos pesados. Em particular, as FIGS. 2 e 3 apresentam diagramas de blocos esquemáticos, vistas laterais do módulo LWD 120 respectivamente girado 90 graus de uma para outra. Deve ser entendido que o módulo LWD 120 se destina a representar um
15 exemplo de uma configuração geral de uma ferramenta NGD e que outras ferramentas NGD adequadas podem incluir mais ou menos componentes e podem ser configuradas para outros meios de transporte. De fato, outras modalidades de ferramentas NGD empregando a configuração geral do módulo
20 LWD 120 estão previstas para uso com qualquer meio adequado de transporte, tal como cabo, tubulação bobinada, perfilagem durante a perfuração (LWD) e assim por diante. O sistema NGD das FIGS. 2 e 3 pode incluir o módulo LWD 120 e circuitos de processamento de dados associados 200. Embora
25 o módulo LWD 120 e os circuitos de processamento de dados 200 sejam representados como elementos independentes na FIG. 2, deve ser apreciado que os circuitos de

processamento de dados 200 podem ser implementados inteiramente dentro do módulo LWD 120, na superfície remota ao módulo LWD 120, ou parcialmente dentro do módulo LWD 120 e parcialmente na superfície. A título de exemplo, o módulo
5 LWD 120 pode representar um modelo da ferramenta EcoScope™ da Schlumberger.

O módulo LWD 120 pode estar contido em um colar de perfuração 202 que circunda um chassi 204 e um canal de lama 205. O chassi 204 pode incluir uma variedade de
10 componentes usados para emitir e detectar radiação para obter uma medição NGD. Por exemplo, um gerador de nêutrons 206 pode servir como uma fonte de nêutrons que emite nêutrons a pelo menos 2 MeV que se acredita ser aproximadamente a energia mínima para criar raios gama
15 através de espalhamento inelástico com elementos de formação. A título de exemplo, o gerador de nêutrons 206 pode ser uma fonte de nêutrons eletrônica, tal como um Minitron™ de Schlumberger Technology Corporation, que pode produzir pulsos de nêutrons através de reações deutério-deutério (d-D) e/ou deutério-trítio (d-T). Assim, o gerador
20 de nêutrons 206 pode emitir nêutrons em torno de 2 MeV ou 14 MeV, por exemplo. Um monitor de nêutrons 208 pode monitorar as emissões de nêutrons do gerador de nêutrons 206. A título de exemplo, o monitor de nêutrons 208 pode
25 ser um cintilador plástico e fotomultiplicador que principalmente detecta nêutrons não espalhados emitidos diretamente do gerador de nêutrons 206 e, assim, pode

fornecer um sinal de taxa de contagem proporcional à taxa de saída de nêutrons do gerador de nêutrons 206. Blindagem contra nêutrons 210, que pode incluir chumbo, por exemplo, pode em grande medida impedir que nêutrons do gerador de nêutrons 206 passem internamente através do módulo LWD 120 em direção a vários componentes de detecção de radiação do outro lado da blindagem 210.

Como ilustrado nas FIGS. 2 e 3, o módulo LWD 120 pode incluir dois detectores de nêutrons próximos, ou seja, um detector de nêutrons térmico 212 e um detector de nêutrons epitérmico 214. Dois detectores de nêutrons térmicos distantes 216A e 216B podem estar localizados a um espaçamento mais distante do gerador de nêutrons 206 do que os detectores de nêutrons 212 e 214. Por exemplo, os detectores de nêutrons próximos 212 e 214 podem ser espaçados de aproximadamente 10 a 14 polegadas do gerador de nêutrons 206, e os detectores de nêutrons distantes 216A e 216B podem ser espaçados de 18 a 28 polegadas do gerador de nêutrons 206. Um detector de raios gama de curto espaçamento (SS) 218 pode estar localizado entre os detectores de nêutrons próximos 212 e 214 e detectores de nêutrons distantes 216A e 216B. Um detector de raios gama de espaçamento longo (LS) 220 pode ser localizado além dos detectores de nêutrons distantes 216A e 216B em um espaçamento maior do gerador de nêutrons 206 do que o detector de raios gama 218. Por exemplo, os detectores de

raios gama SS 218 podem ser espaçados a aproximadamente 16 a 22 polegadas do gerador de nêutrons 206 e o detector de raios gama LS 220 pode ser espaçado a aproximadamente 30 a 38 polegadas do gerador de nêutrons 206. Modalidades alternativas do módulo LWD 120 podem incluir mais ou menos de tais detectores de radiação, mas geralmente podem incluir pelo menos dois detectores de raios gama e pelo menos um detector de nêutrons.

Os detectores de nêutrons 212, 214, 216A e/ou 216B pode ser quaisquer detectores de nêutrons adequados, tal como detectores de nêutrons ^3He . Para detectar primariamente nêutrons epitérmicos, o detector de nêutrons epitérmicos 214 pode ser cercado por blindagem de nêutrons térmicos, enquanto os detectores de nêutrons térmicos 212, 216A e/ou 216B não podem. Em geral, a detecção de substancialmente apenas nêutrons epitérmicos pode permitir que o detector de nêutrons epitérmicos 214 meça a extensão de uma distribuição de nêutrons rápidos através da maioria das formações e, assim, uma tal taxa de contagem de nêutrons pode ser utilizada para contabilizar o transporte de nêutrons rápidos através das formações em uma medição NGD. No entanto, em formações com baixo índice de hidrogênio (HI) ou baixa porosidade, os detectores de nêutrons 212, 214, 216A e/ou 216B podem não ser espaçados suficientemente longe do gerador de nêutrons 206 para diretamente levar em conta o transporte de nêutrons rápidos de tais formações. Como será discutido abaixo, para tais

formações de baixa porosidade e/ou baixo índice de hidrogênio, uma medição NGD obtida usando o módulo LWD 120 pode ser corrigida para se aproximar daquela que seria esperada se os detectores de nêutrons 212, 214, 216A e/ou 5 216B fossem localizados em um espaçamento ou em espaçamentos mais apropriados para tais formações.

Além disso, em formações com elementos pesados, tal como folhelhos com altas concentrações de ferro ou alumínio, os detectores de nêutrons 212, 214, 216A e/ou 10 216B geralmente podem não fornecer uma taxa de contagem de nêutrons que reflita com precisão o transporte de nêutrons rápidos de tais formações. Embora se acredite que esta deficiência poderia ser abordada usando um detector de nêutrons rápidos no módulo LWD 120, pode ser difícil 15 implementar um tal detector de nêutrons rápidos em uma ferramenta dentro do poço. Por exemplo, pode ser difícil encontrar um sensor adequado capaz de trabalhar dentro do poço que tenha alta sensibilidade e que seja compacto o suficiente para caber dentro do módulo LWD 120. Como será 20 discutido abaixo, para essas formações com elementos pesados, uma medição NGD obtida usando o módulo LWD 120 pode ser corrigida para se aproximar daquela que seria de se esperar se os detectores de nêutrons 212, 214, 216A e/ou 216B fossem detectores de nêutrons rápidos.

25 Os detectores de raios gama 218 e/ou 220 podem ser detectores cintiladores rodeados por blindagem de nêutrons. A blindagem de nêutrons pode incluir, por exemplo, ${}^6\text{Li}$,

tais como carbonato de lítio (Li_2CO_3), que pode blindar substancialmente os detectores de raios gama 218 e/ou 220 de nêutrons térmicos sem produzir raios gama de captura de nêutrons térmicos. Os detectores de raios gama 218 e 220 5 podem detectar raios gama inelásticos gerados quando nêutrons rápidos do gerador de nêutrons 206 inelasticamente espalham para fora de certos elementos de uma formação circundante. Como será discutido abaixo, uma medição de densidade nêutron-gama (NGD) pode ser uma função das 10 contagens de raios gama inelásticos obtidas dos detectores de raios gama 218 e 220, corrigidas para o transporte de nêutrons rápidos da formação por uma função de correção de nêutrons rápidos. Usando os sistemas e as técnicas divulgadas aqui, uma tal medição NGD pode permanecer 15 substancialmente precisa independentemente se a formação é uma formação de baixo índice de hidrogênio ou de baixa porosidade ou uma formação com uma alta concentração de elementos pesados ou uma formação que tem uma ou mais características que podem fazer com que a taxa de contagem 20 de nêutrons não corresponda precisamente a um transporte de nêutrons rápidos da formação.

As taxas de contagem de raios gama dos detectores de raios gama 218 e 220 e as taxas de contagem de nêutrons dos detectores de nêutrons 212, 214, 216A e/ou 216B podem 25 ser recebidas pelos circuitos de processamento de dados 200 como dados 222. Os circuitos de processamento de dados 200 podem receber os dados 222 e executar determinado

processamento para determinar uma ou mais propriedades da formação circundante, tal como densidade da formação. Os circuitos de processamento de dados 200 podem incluir um processador 224, memória 226 e/ou armazenamento 228. O

5 processador 224 pode ser acoplado operavelmente à memória 226 e/ou ao armazenamento 228 para realizar as técnicas atualmente divulgadas. Estas técnicas podem ser efetuadas pelo processador 224 e/ou outros circuitos de processamento de dados com base em certas instruções executáveis pelo

10 processador 224. Tais instruções podem ser armazenadas usando qualquer artigo de fabricação adequado que pode incluir um ou mais meios tangíveis, legíveis por computador, para pelo menos coletivamente armazenar estas instruções. O artigo de fabricação pode incluir, por

15 exemplo, a memória 226 e/ou o armazenamento não volátil 228. A memória 226 e o armazenamento não volátil 228 podem incluir quaisquer artigos de fabricação adequados para armazenar dados e instruções executáveis, tal como memória de acesso aleatório, memória de leitura somente, memória

20 instantânea regravável, discos rígidos e discos óticos.

O módulo LWD 120 pode transmitir os dados 222 para os circuitos de processamento de dados 200 através de, por exemplo, conexões internas dentro da ferramenta, um enlace ascendente de comunicação de sistema de telemetria e/ou um

25 cabo de comunicação. Os circuitos de processamento de dados 200 podem determinar uma ou mais propriedades da formação circundante. A título de exemplo, essas propriedades podem

incluir uma medição de densidade nêutron-gama (NGD) da formação. Após isso, os circuitos de processamento de dados 200 podem emitir um relatório 230 indicando a medição NGD da formação. O relatório 230 pode ser armazenado na memória 5 ou pode ser fornecido para um operador através de um ou mais dispositivos de saída, tal como um mostrador eletrônico.

Como mostrado em uma operação de perfilagem de poço de densidade nêutron-gama (NGD) 240 da FIG. 4, o módulo LWD 10 120 pode ser usado para obter uma medição de densidade nêutron-gama (NGD) que permanece precisa em uma variedade de formações 242, incluindo formações de baixo índice de hidrogênio ou baixa porosidade e/ou formações com elementos pesados. Como visto na Figura 4, a operação de perfilagem 15 de poço NGD 240 pode envolver abaixar o módulo LWD 120 para a formação 242 através de um poço 244. No exemplo da Figura 4, o módulo LWD 120 pode ser abaixado para o poço 244 durante a perfuração e, assim, nenhum revestimento pode estar presente no poço 244. No entanto, em outras 20 modalidades, um revestimento pode estar presente. Embora tal revestimento pudesse atenuar uma ferramenta de densidade gama-gama que utilizasse uma fonte de raios gama em vez de um gerador de nêutrons 206, a presença de revestimento no poço 244 não impedirá a determinação de uma 25 medição NGD porque nêutrons 246 emitidos pelo gerador de nêutrons 206 podem passar através do revestimento sem atenuação significativa.

O gerador de nêutrons 206 pode emitir um arrebetamento de nêutrons 246 por um período de tempo relativamente curto (por exemplo, 10 μ s ou 20 μ s ou tal) suficiente para substancialmente apenas permitir que
5 espalhamento inelástico ocorra, aqui denominado "porta de arrebetamento". O arrebetamento de nêutrons 246 durante a porta de arrebetamento pode ser distribuído através da formação 242, cuja extensão pode variar dependendo do transporte de nêutrons rápidos da formação 242. Para
10 algumas formações 242, contagens de nêutrons 246 obtidas pelos detectores de nêutrons 212, 214, 216A e/ou 216B geralmente pode refletir com precisão o transporte de nêutrons de tais formações 242. No entanto, para outras formações 242, tal como formações com baixo índice de
15 hidrogênio ou formações de baixa porosidade e/ou formações com elementos pesados, uma correção adicional pode ser necessária para levar em conta com mais precisão o transporte de nêutrons rápidos das formações 242.

Muitos dos nêutrons rápidos 246 emitidos pelo
20 gerador de nêutrons 206 podem espalhar inelasticamente 248 contra alguns dos elementos da formação 242. Este espalhamento inelástico 248 pode produzir raios gama inelásticos 250 os quais podem ser detectados pelos detectores de raios gama 218 e/ou 220. Determinando a
25 densidade de uma formação tomando uma razão de raios gama inelásticos 250 detectados usando os dois detectores de raios gama 218 e 220 em diferentes espaçamentos do gerador

de nêutrons 206, efeitos de litologia podem ser eliminados na maioria das vezes.

Das taxas de contagem dos raios gama inelásticos 250, uma ou mais taxas de contagem de nêutrons 246 e uma
 5 determinação da saída de nêutrons do gerador de nêutrons 206, os circuitos de processamento de dados 200 determinar uma densidade de elétrons $\rho_{electron}$ da formação 242. Em geral, a densidade de elétrons $\rho_{electron}$ pode ser calculada de acordo com uma relação que envolve uma função de uma taxa de
 10 contagem inelástica líquida CR_{γ}^{inel} corrigida por uma correção de transporte de nêutrons e uma correção de calibração de ferramenta dentro do poço, as quais podem ser funções de uma ou mais taxas de contagem de nêutrons $CR_{neutron}$ e a saída de nêutrons N_S do gerador de nêutrons 206,
 15 respectivamente. Por exemplo, o calculo da densidade de elétrons $\rho_{electron}$ pode ter a seguinte forma:

$$\frac{\log(CR_{\gamma}^{inel}) - f(CR_{neutron}) - \log(C_{cal} \cdot N_S)}{c_1} = \rho_{electron} \quad (1),$$

onde CR_{γ}^{inel} é a taxa de contagem de raios gama inelásticos líquida (isto é, a taxa de contagem de raios
 20 gama após subtração de raios gama surgindo de captura de nêutrons térmicos e epitérmicos), $CR_{neutron}$ representa uma taxa de contagem de nêutrons 246 dos detectores de nêutrons 212, 214, 216A e/ou 216B, $f(CR_{neutron})$ representa uma correção de transporte de nêutrons que pode ser qualquer função

adequada da taxa de contagem de nêutrons 246 que pode corrigir para o transporte de nêutrons rápidos da formação 242, C_{ca1} é uma constante de calibração determinada experimentalmente usando medições no formações de teste de
 5 composição, porosidade e densidade conhecidas e N_s é a saída de nêutrons do gerador de nêutrons 206. O coeficiente c_1 pode ser determinado através de medições de caracterização e modelagem nuclear.

Por exemplo, a função de correção de transporte de
 10 nêutrons $f(CR_{neutron})$ pode assumir a forma geral seguinte:

$$f(CR_{neutron}) = d_1 + d_2 CR_{neutron} + d_3 CR_{neutron}^2,$$

onde os coeficientes d_1 , d_2 , e d_3 representam coeficientes determinados, por exemplo, através de medições de caracterização e modelagem nuclear.

15 Em algumas modalidades, a função de correção de transporte de nêutrons pode ser descrita da seguinte forma:

$$f(CR_{neutron}) = e_1 \log(CR_{neutron}^{e_2} + e_3) \quad (2),$$

onde o coeficientes e_1 , e_2 e e_3 são determinados através de medições de caracterização e modelagem nuclear.

20 Para algumas formações 242, a Equação (1) pode resultar em uma medição de densidade precisa. No entanto, para outras formações, incluindo formações de baixo índice de hidrogênio ou de baixa porosidade 242 e/ou formações 242 com relativamente altas concentrações de elementos pesados
 25 (por exemplo, formações 242 tendo concentrações de

elementos pesados que podem fazer com que uma medição NGD seja inexata sem correção adicional), a taxa de contagem de nêutrons de um ou mais dos detectores de nêutrons 212, 214, 216A e/ou 216B é considerada como não levando em contra
 5 adequadamente o transporte de nêutrons rápidos de tais formações 242. Assim, quando uma medição NGD está sendo determinada para tais formações 242, a taxa de contagem de nêutrons $CR_{neutron}$, a taxa de contagem de raios gama inelásticos CR_{γ}^{inel} e/ou a função de correção de transporte
 10 de nêutrons $f(CR_{neutron})$ pode ser corrigidas conforme descrito por um fluxograma 260 da FIG. 5.

O fluxograma 260 da FIG. 5 representa uma modalidade de um método para realizar a operação de perfilagem de poço 240 da FIG. 4. Enquanto o módulo LWD 120
 15 está no poço 244, o gerador de nêutrons 206 pode emitir um arrebitamento de nêutrons 246 para a formação 242 (bloco 262). Os nêutrons 246 podem espalhar inelasticamente 248 para fora de certos elementos da formação 242, gerando raios gama inelásticos 250. Taxa(s) de contagem de nêutrons
 20 246, bem como taxa(s) de contagem de raios gama inelásticos 250 podem ser obtidas (bloco 264). Como discutido acima com referência à Equação (1), essa(s) taxa(s) de contagem de nêutrons 246 geralmente pode(m) relacionar poço ao
 25 transporte de nêutrons rápidos da formação 242 para algumas formações 242 encontradas em um poço de petróleo e/ou gás.

Em outras formações 242, no entanto, acredita-se

que a(s) taxa(s) de contagem de nêutrons 246 e/ou a(s) taxa(s) de contagem de raios gama 250 podem não levar em conta adequadamente o transporte de nêutrons de tais formações 242. Assim, se os circuitos de processamento de dados 200 determinarem, usando qualquer técnica adequada, que a formação 242 tem uma ou mais características que implicam uma necessidade de correção adicional (por exemplo, baixo índice de hidrogênio, baixa porosidade e/ou contendo uma relativamente alta concentração de elementos pesados) (bloco de decisão 266), os circuitos de processamento de dados 200 podem levar a cabo uma correção adequada da(s) taxa(s) de contagem de nêutrons 246, da(s) taxa(s) de contagem de raios gama inelásticos 250, e/ou da função de correção de transporte de nêutrons $f(CR_{neutron})$, ou podem fornecer uma correção global que se aplica a alguns ou todos estes termos (bloco 268). Isto é, deve ser entendido que modificando qualquer um dos termos no numerador da Equação (1) se poderia mudar a determinação de NGD resultante. Assim, no bloco 268, os circuitos de processamento de dados 200 podem efetuar qualquer correção apropriada de qualquer um dos termos da Equação (1), incluindo a introdução de um ou mais termos adicionais de correção que podem fazer com que a medição NGD seja geralmente precisa para a formação 242. Como será discutido abaixo, algumas destas modificações podem ser modificações relativamente específicas para as taxas de contagem de nêutrons 246, que podem ser ajustadas de acordo com uma

função linear em partes da porosidade da formação 242 (por exemplo, ver Equação (3) abaixo), ou modificações na taxa de contagem de raios gama 250 quando uma taxa de contagem de nêutrons rápidos inferida excede um limite, indicando
5 uma alta concentração de elementos pesados na formação 242. No entanto, deve ser entendido que as modalidades presentes não se destinam a ser limitadas somente a estas modificações. Na verdade, as presentes modalidades destinam-se a cobrir quaisquer modificações adequadas na
10 determinação de uma NGD que é geralmente precisa para algumas formações 242, as modificações ocorrendo na presença de formações 242 tendo algumas outras características que fazem com que a determinação NGD geral não seja precisa nestas formações 242.

15 Se os circuitos de processamento de dados 200 não determinam que a formação 242 tem essas características (bloco de decisão 266), os circuitos de processamento de dados 200 podem não aplicar essa correção. Em qualquer caso, os circuitos de processamento de dados 200
20 posteriormente podem determinar uma medição NGD da formação 242 usando a(s) taxa(s) de contagem determinadas (corrigidas ou não corrigidas) de nêutrons 246, taxa(s) de contagem de raios gama inelásticos 250 (bloco 270) e/ou a função de correção de transporte de nêutrons $f(CR_{neutron})$. A
25 título de exemplo, os circuitos de processamento de dados 200 podem determinar a medição NGD baseada na relação representada pela Equação (1).

Como mencionado acima, embora uma medição NGD, tal como determinada usando a Equação (1), possa representar precisamente uma medição de densidade para algumas formações 242, uma tal medição NGD pode não ser precisa para outras formações 242, tal como formações tendo baixo índice de hidrogênio, baixa porosidade e/ou uma relativamente alta concentração de elementos pesados. Este efeito é aparente em um gráfico cruzado 280 da FIG. 6 que representa um gráfico cruzado modelando a densidade conhecida de uma variedade de tipos de formações 242 contra uma medição NGD para as formações 242 obtida usando a Equação (1) para a qual, por exemplo, a(s) taxa(s) de contagem de nêutrons 246, a(s) taxa(s) de contagem de raios gama inelásticos 250 e/ou a função de correção de transporte de nêutrons $f(CR_{neutron})$ não foram corrigidas na presença de, por exemplo, baixo índice de hidrogênio, baixa porosidade ou uma alta concentração de elementos pesados. No gráfico cruzado 280, uma ordenada 282 representa o logaritmo de uma taxa de contagem de raios gama corrigida para transporte de nêutrons como detectada pelo detector de raios gama LS 218 e uma abcissa 284 representa a densidade de elétrons da formação 242 em unidades de g/cm^3 . Uma legenda indica vários tipos de formações 242 que foram modeladas no gráfico cruzado 280, incluindo calcário, arenito, dolomita, arenito com poros cheios de ar, alumina, arenito com hematita e gás simulado. Uma linha 286 representa uma correlação precisa entre a taxa de contagem

de raios gama corrigida para transporte de nêutrons e a densidade de formação conhecida.

Como pode ser visto no gráfico cruzado 280, para certas formações 242, apesar das variações nas densidades das formações 242, o logaritmo calculado de taxas de contagem de raios gama corrigida para transporte de nêutrons se situa ao longo da linha 286 e precisamente corresponde à densidade conhecida. Estes pontos representam a precisão geral da determinação NGD para estas formações 242. No entanto, para formações 242 que têm baixa porosidade 288 ou elementos pesados 290, o logaritmo calculado de taxas de contagem de raios gama corrigidas para transporte de nêutrons se situa abaixo e acima da linha de 286, respectivamente. Uma vez que o logaritmo calculado de taxas de contagem de raios gama corrigidas para transporte de nêutrons destas formações 242 com baixa porosidade 288 ou elementos pesados 290 não segue a mesma função de mudar com a densidade como as outras formações 242 (não caindo ao longo da linha 286), medições NGD para as formações de baixa porosidade 288 ou elementos pesados 290 obtidas usando os mesmos cálculos (não corrigidos) que as outras formações 242 podem ser imprecisas.

Acredita que correção de transporte de nêutrons rápidos insuficiente possa ser responsável pelos cálculos imprecisos para estas formações de baixa porosidade 288 e formações com elementos pesados 290. Embora também se acredite que esta correção de transporte de nêutrons

rápidos insuficiente possa ser tratada colocando os detectores de nêutrons 212, 214, 216A e/ou 216B em um local diferente dentro do módulo LWD 120, na ausência de tal opção, outras correções para transporte de nêutrons podem ser obtidas modificando, por exemplo, a(s) taxa(s) de contagem de nêutrons 246, a(s) taxa(s) de contagem de raios gama inelásticos 250 e/ou a função de correção de transporte de nêutrons $f(CR_{neutron})$ de uma forma adequada, de modo que o logaritmo calculado de taxas de contagem de raios gama corrigidas para transporte de nêutrons das formações 242 que têm baixa porosidade 288 ou elementos pesados 290 seja deslocado para sua colocação adequada ao longo da linha 286.

Um fluxograma 300 da FIG. 7 representa uma maneira de determinar uma medição densidade nêutron-gama (NGD) que pode corrigir determinações de densidade de outra forma imprecisas para formações de baixa porosidade 288. O fluxograma 300 pode começar enquanto o módulo LWD 120 está no poço 244, como visto na FIG. 4. O gerador de nêutrons 206 pode emitir um arrebatamento de nêutrons 246 para a formação 242 (bloco 302) que podem inelasticamente espalhar 248 para fora de certos elementos da formação 242, gerando raios gama inelásticos 250. Taxa(s) de contagem de nêutrons 246, bem como taxa(s) de contagem destes raios gama inelásticos induzidos por nêutrons podem ser obtidas (bloco 304).

Bloco 306 e bloco de decisão 308 do fluxograma 300

geralmente envolvem determinar se a formação 242 é uma formação de baixa porosidade 288. Como particularmente mostrado na FIG. 7, os circuitos de processamento de dados 200 podem determinar uma porosidade aparente da formação 242 usando qualquer técnica adequada (bloco 306), e se a porosidade aparente estiver fora de um limite definido (bloco de decisão 308), os circuitos de processamento de dados 200 podem aplicar uma correção para a(s) taxa(s) de contagem de nêutrons 246, a(s) taxa(s) de contagem de raios gama inelásticos 250 e/ou a função de correção de transporte de nêutrons $f(CR_{neutron})$ (bloco 310). O limite definido pode ser determinado experimentalmente ou através de modelagem em computador e pode ser predefinido ou determinado pelos circuitos de processamento de dados 200.

Como mencionado acima, os circuitos de processamento de dados 200 podem levar a cabo qualquer correção apropriada de qualquer um dos termos da Equação (1), incluindo a introdução de um ou mais termos de correção adicionais que podem fazer com que a medição NGD seja geralmente precisa para a formação 242. Como será discutido abaixo, algumas destas modificações podem ser modificações específicas relativamente às taxas de contagem de nêutrons 246, que podem ser ajustadas de acordo com uma função linear em partes da porosidade da formação 242 (por exemplo, ver Equação (3) abaixo). No entanto, deve ser entendido que as modalidades presentes não se destinam a ser limitadas somente a essa modificação na taxa de contagem de nêutrons

246. Na verdade, as presentes modalidades se destinam a cobrir quaisquer modificações adequadas para uma determinação NGD que é geralmente precisa para algumas formações 242, mas pode ser menos precisa na presença de
 5 formações com baixa porosidade e/ou baixo índice de hidrogênio.

Se os circuitos de processamento de dados 200 não determinam que a porosidade aparente da formação 242 está fora do limite definido (bloco de decisão 308), os
 10 circuitos de processamento de dados 200 podem não aplicar essa correção. Em qualquer caso, os circuitos de processamento de dados 200 posteriormente podem determinar uma medição NGD da formação 242 usando a(s) taxa(s) de contagem determinadas (corrigidas ou não corrigidas) 246,
 15 a(s) taxa(s) de contagem de raios gama inelásticos 250 e/ou a função de correção de transporte de nêutrons $f(CR_{neutron})$ (bloco 312). Por exemplo, como observado acima, os circuitos de processamento de dados 200 podem determinar a medição NGD baseada na relação representada pela Equação
 20 (1).

No bloco de 306, os circuitos de processamento de dados 200 podem determinar a porosidade aparente de acordo com qualquer técnica adequada, tal como:

- Usando uma medição de porosidade aparente obtida
 25 diretamente de outras técnicas usadas pelo módulo LWD 120.
- Usando uma taxa de contagem de um detector de nêutrons epitérmicos ou rápidos para inferir porosidade

aparente.

- Usando uma razão de taxa de contagem entre taxas de contagem de dois detectores de nêutrons (de preferência detectores de nêutrons epitérmicos ou rápidos) para inferir a presença de baixa porosidade.

- Usando uma razão entre taxas de contagem de captura de nêutrons de dois detectores de raios gama para inferir porosidade aparente.

- Usando uma razão entre as taxas de contagem inelástica de dois detectores de raios gama para inferir porosidade aparente.

- Usando uma razão de taxas de contagem de um detector de nêutrons e um detector de raios gama para inferir porosidade aparente.

- Usando uma função de taxas de contagem de nêutrons e/ou raios gama para inferir porosidade aparente.

Como deve ser entendido, as taxas de contagem usadas para determinar a porosidade aparente da formação talvez tenham que ser normalizadas para a saída de nêutrons do gerador de nêutrons se as taxas de contagem forem usadas sozinhas. Uma vez que razões de taxas de contagem levam em conta variações na saída de nêutrons, normalização para a saída de nêutrons do gerador de nêutrons pode não ser necessária quando razões de taxas de contagem são usadas para determinar porosidade aparente.

Uma maneira específica de realizar os blocos 306, 308 e 310 do fluxograma 300 da FIG. 7 pode envolver a

corrigir a taxa de contagem de nêutrons $CR_{neutron}$ usada na
 função de correção de transporte de nêutrons $f(CR_{neutron})$. Em
 particular, a porosidade aparente da formação 242 pode ser
 determinada da taxa de contagem (normalizada) do detector
 5 de nêutrons epitérmico 214 $CR_{neutron}$ (bloco 306). A condição
 de baixa porosidade da formação 242 pode ser indicada se a
 taxa de contagem de nêutrons epitérmicos $CR_{neutron}$ exceder um
 determinado valor CR_{limit} ou cair dentro de uma determinada
 faixa de valores (bloco de decisão 308). Nesse caso, a taxa
 10 de contagem de nêutrons na correção de transporte de
 nêutrons $CR_{neutron}$ pode ser corrigida (bloco 310). A taxa de
 contagem corrigida de nêutrons epitérmicos $CR_{neutron,corrected}$ pode
 ter a seguinte forma:

$$CR_{neutron,corrected} = CR_{neutron} \left(1 + g(CR_{limit}, CR_{neutron}) \cdot F(CR_{neutron}, CR_{inel}^{\gamma}) \right) \quad (3).$$

15 Usando a Equação (3), a taxa de contagem corrigida
 de nêutrons epitérmicos $CR_{neutron,corrected}$ pode ser determinada com
 base em uma função de correção de taxa de contagem de
 nêutrons $F(CR_{neutron}, CR_{inel}^{\gamma})$, ponderada por uma função de
 ponderação $g(CR_{limit}, CR_{neutron})$. Neste exemplo, a função de
 20 correção de taxa de contagem de nêutrons $F(CR_{neutron}, CR_{inel}^{\gamma})$ é
 uma função da taxa de contagem de nêutrons epitérmicos do
 detector de nêutrons epitérmicos 214 e uma taxa de contagem
 de raios gama inelásticos de um ou mais dos detectores de

raios gama 218 e 220. A intensidade da função de correção de taxa de contagem de nêutrons $F(CR_{neutron}, CR_{inel}^{\gamma})$ é ponderada pela função de ponderação $g(CR_{limit}, CR_{neutron})$ que pode ser um valor constante, uma função afim ou qualquer função
 5 apropriada derivada de dados modelados e/ou medidos. A função de correção de taxa de contagem de nêutrons $F(CR_{neutron}, CR_{inel}^{\gamma})$ pode assumir qualquer forma adequada, incluindo uma constante ou a seguinte forma:

$$F(CR_{neutron}, CR_{inel}^{\gamma}) = a_1 + a_2 CR_{neutron} + a_3 CR_{neutron}^2 + b_1 + b_2 CR_{inel}^{\gamma} + b_3 CR_{inel}^{\gamma 2},$$

10 onde os coeficientes a_1 , a_2 e a_3 e b_1 , b_2 , e b_3 representam coeficientes determinados, por exemplo, através de medições de caracterização e modelagem nuclear.

Em algumas modalidades, a função de ponderação $g(CR_{limit}, CR_{neutron})$ pode ser uma função linear em partes composta
 15 por duas ou mais linhas retas entre limites de taxa de contagem diferentes CR_{limit} , dependendo da taxa de contagem de nêutrons $CR_{neutron}$ que precisa ser corrigida. Por exemplo, a função de ponderação $g(CR_{limit}, CR_{neutron})$ pode ser uma função linear em partes, como ilustrado por um gráfico 320 da FIG.
 20 8. No gráfico 320, uma ordenada 322 representa um coeficiente de correção resultante de 0 a 1 e uma abcissa 324 representa a taxa de contagem de nêutrons $CR_{neutron}$.

Uma curva em trechos 326 no gráfico 320 ilustra várias funções de ponderação lineares que podem ser

aplicadas em limites de taxa de contagem diferentes CR_{limite} ,
 mostrados nos numerais 328, 330, 332 e 334. Assim, no
 gráfico 320, quando a taxa de contagem de nêutrons $CR_{neutron}$ é
 menor do que o primeiro limite 328, o coeficiente de
 5 correção pode ser 0 e nenhuma correção para a taxa de
 contagem de nêutrons $CR_{neutron}$ pode ser aplicada na taxa de
 contagem de nêutrons epitérmicos corrigida resultante
 $CR_{neutron,corrected}$. Entre o primeiro limite 328 e o segundo limite
 330, o coeficiente de correção pode aumentar rapidamente de
 10 0 a 0,5, com subseqüentes funções lineares entre os outros
 limites 332 e 334 lentamente se nivelando. Acima do quarto
 limite 334, o coeficiente de correção pode ser 1 e, assim,
 a função de correção de taxa de contagem de nêutrons
 inteira $F(CR_{neutron}, CR_{inel}^y)$ pode ser aplicada na taxa de contagem
 15 de nêutrons epitérmicos corrigida resultante $CR_{neutron,corrected}$.

Tal correção de taxa de contagem de nêutrons pode
 ser considerada como uma adição de contagens de nêutrons
 para $CR_{neutron}$. Uma maneira de visualizar o efeito desta
 correção aparece na FIG. 9, na qual o ponto de medição do
 20 detector de nêutrons epitérmicos 214 pode ser virtualmente
 movido para um espaçamento mais distante do gerador de
 nêutrons 206. Note-se que o detector de nêutrons epitérmico
 214 é virtualmente movido para o espaçamento mais distante
 do gerador de nêutrons 206 porque o detector de raios gama
 25 218 e/ou 220 que obtém a taxa de contagem de raios gama

inelásticos CR_{inel}^{γ} , usada na função de correção de taxa de contagem de nêutrons $F(CR_{neutron}, CR_{inel}^{\gamma})$, está em um espaçamento mais distante do que o espaçamento verdadeiro do detector de nêutrons epitérmico 214. Movendo efetivamente o ponto de
5 medição virtual do detector de nêutrons epitérmico 214 em baixas porosidades, a sensibilidade da taxa de contagem de nêutrons epitérmicos $CR_{neutron}$ virtualmente pode aumentar em baixas porosidades para levar em conta com mais precisão o transporte de nêutrons rápidos de formações de baixo índice
10 de hidrogênio ou baixa porosidade 242.

Deve ser apreciado que em poços maiores 244, a taxa de contagem de nêutrons também pode ser afetada por standoff e pode ter que ser corrigida conforme para esse standoff. Essa correção para standoff pode ser baseada em
15 um standoff conhecido de uma medição diferente. Além disso, pelo menos em poços desviados, pode ser vantajoso usar a taxa de contagem de nêutrons do quadrante inferior como uma entrada, em vez da taxa média de contagem, uma vez que o quadrante inferior pode ser menos afetado pelo standoff.
20 Para standoffs pequenos a moderados (até 1 polegada) o standoff também pode ser determinado do tempo de redução de nêutrons medido por um detector epitérmico conforme descrito pela patente US 4.760.252, que é cedida a Schlumberger Technology Corporation e incorporada por
25 referência neste documento na íntegra.

Quando corrigidos para transporte de nêutrons de acordo com o fluxograma 300 da FIG. 7, as medições NGD de

formações de baixa porosidade 288 podem combinar com mais precisão com aquelas de outras formações 242. Um gráfico cruzado 340 da FIG. 10 representa um gráfico cruzado modelando a densidade conhecida de uma variedade de tipos de formações 242 contra uma medição NGD para as formações 242 obtida usando a Equação (1) para a qual a(s) taxa(s) de contagem de nêutrons 246 foi(ram) corrigida(s) na presença de baixo índice de hidrogênio ou baixa porosidade. Como o gráfico cruzado 280 da FIG. 6, no gráfico cruzado 340 da FIG. 10, uma ordenada 342 representa o logaritmo de uma taxa de contagem de raios gama corrigida para transporte de nêutrons como detectada pelo detector de raios gama LS 218 e uma abcissa 344 representa a densidade de elétrons da formação 242 em unidades de g/cm^3 . Uma legenda indica vários tipos de formações 242 que foram modeladas na gráfico cruzado 340 que combinam com aquelas do gráfico cruzado 280, incluindo calcário, arenito, dolomita, arenito com poros cheios de ar, alumina, arenito com hematita e gás simulado. A linha 286 representa uma correlação precisa entre a taxa de contagem de raios gama corrigida para transporte de nêutrons e a densidade conhecida das formações 242.

Como pode ser visto no gráfico cruzado 340, quando a taxa de contagem de nêutrons usada na correção de transporte de nêutrons é ajustada em baixas porosidades (por exemplo, de acordo com a Equação (3)), as taxas de contagem de raios gama corrigidas para transporte de

nêutrons para as formações de baixa porosidade 288 podem se mover para alinhamento com a maioria das outras formações 242 ao longo da linha 286. Uma vez que, no gráfico 340 da FIG. 10, as taxas de contagem de raios gama corrigidas para transporte de nêutrons não foram corrigidas para levar em conta o transporte de nêutrons rápidos das formações com elementos pesados 290, as taxas de contagem de raios gama corrigidas para transporte de nêutrons das formações com elementos pesados 290 se situam acima da linha 286 e permanecem imprecisas. Como deve ser entendido, pode ser utilizada qualquer forma alternativa adequada de fazer com que as taxas de contagem de raios gama corrigidas para transporte de nêutrons das formações baixa porosidade 288 se movam para alinhamento com a linha 286. Ou seja, ao obter uma medição NGD quando a formação 242 é uma formação de baixo índice de hidrogênio ou uma formação baixa porosidade 288, os circuitos de processamento de dados 200 podem aplicar qualquer correção adequada para a(s) taxa(s) de contagem de nêutrons 246, a(s) taxa(s) de contagem de raios gama inelásticos 250 e/ou a função de correção de transporte de nêutrons $f(CR_{neutron})$ para fazer com que as taxas de contagem de raios gama corrigidas para transporte de nêutrons das formações baixa porosidade 288 se movam para alinhamento com a linha de 286.

Como mencionado acima e como visto no gráfico 340 da FIG. 10, acredita-se que correção de transporte de nêutrons rápidos insuficiente também pode ser responsável

pelos cálculos imprecisos para as formações com elementos pesados 290. Também se acredita que esta correção de transporte de nêutrons rápidos insuficiente pode ser tratada usando um detector de nêutrons rápidos no lugar do

5 detector de nêutrons epitérmico 214. No entanto, embora um detector de nêutrons rápidos possa ser desejável, pode não ser fácil implementar esse dispositivo em uma ferramenta dentro do poço, tal como o módulo LWD 120. Por exemplo, pode ser difícil encontrar um detector de nêutrons rápidos

10 apropriado que seja capaz de trabalhar dentro do poço. Um detector de nêutrons rápidos pode se beneficiar de alta sensibilidade, ser compacto o suficiente para caber no módulo LWD 120 e ser insensível à presença de raios gama 250. Adicionalmente, uma vez que o módulo LWD 120 em

15 particular, e a maioria das ferramentas dentro do poço nucleares em geral, não podem ser limitados ao seu uso para obter apenas uma única medição, múltiplos tipos diferentes de detectores de radiação podem ser empregados em tal ferramenta (por exemplo, detectores de nêutrons 212, 214,

20 216A e/ou 216B e os detectores de raios gama 218 e 220). Aumentar o número de detectores de radiação pode não só aumentar o custo do módulo LWD 120 e/ou o comprimento do módulo LWD 120, ou outra ferramenta dentro do poço, mas estes múltiplos detectores de radiação podem competir pela

25 mesma posição física dentro do módulo LWD 120, ou outra ferramenta dentro do poço (por exemplo, múltiplos detectores de radiação podem se beneficiar de espaçamento

semelhante do gerador de nêutrons 206 e posições radiais similares). Em vez disso, o módulo LWD 120 pode usar o detector de nêutrons epitérmicos 214 como um proxy para determinar a extensão da distribuição de nêutrons rápidos, uma vez que o detector de nêutrons epitérmicos 214 também pode contribuir para respostas de ferramenta adicionais como porosidade de nêutrons, tempo de retardo e assim por diante.

Quando o módulo LWD 120 não contém nenhum detector de nêutrons rápidos, um sinal de nêutrons rápidos pode ser estimado ou derivado de respostas existentes de outros detectores de nêutrons 212, 214, 216A e/ou 216B e/ou detectores de raios gama 218 e/ou 220. Uma vez que as reações de espalhamento inelástico ocorrem somente a altas energias de nêutrons (por exemplo, maiores que 2 MeV), um sinal de alta energia de nêutron plausível pode ser derivado da seguinte razão:

$$Fastn = \frac{CR_{net-inelastic}^{SSn}}{CR_{net-inelastic}^{LSn}} \quad (4),$$

onde $CR_{net-inelastic}^{SSn}$ representa a taxa de contagem de raios gama inelásticos líquida obtida do detector de raios gama de espaçamento curto (SS) 218, e $CR_{net-inelastic}^{LSn}$ representa a taxa de contagem de raios gama inelásticos líquida do detector de raios gama de espaçamento longo (LS) 220.

As taxas de contagem de raios gama inelásticos líquidas $CR_{net-inelastic}^{SSn}$ e $CR_{net-inelastic}^{LSn}$ geralmente podem ser

computadas da mesma forma, por exemplo, da seguinte forma:

$$CR_{net-inelastic} = CR_{burst} - CR_{ec} - \alpha CR_{ic} \quad (5),$$

onde CR_{burst} , CR_{ec} , e CR_{ic} representam taxas de contagem de raios gama do arrebitamento, captura inicial e portas de tempo posterior, respectivamente, dos detectores de raios gama 218 e/ou 220, e α é uma constante. Como deve ser apreciado em algumas modalidades a porta de arrebitamento pode representar um período de tempo enquanto o gerador de nêutrons 206 está emitindo nêutrons (por exemplo, 10 μ s), a porta de captura inicial pode representar um segundo período de tempo após a porta de arrebitamento (por exemplo, 5 μ s) e a porta de tempo posterior pode representar um terceiro período de tempo em seguida à porta de captura inicial (por exemplo, 20 μ s).

Como mencionado acima, a computação da taxa de contagem inelástica líquida para ambos o detector de raios gama SS 218 e o detector de raios gama LS 220, pode ser realizada usando qualquer técnica adequada, incluindo a computação ilustrada pela Equação (5). Por exemplo, adicionalmente ou alternativamente, as taxas de contagem de raios gama inelásticos podem ser determinadas de acordo com as técnicas divulgadas pelo Pedido de Patente Provisional norte Americano US N.º de Série 61/180.547, intitulado "Optimization of Neutron-Gamma Tools for Inelastic Gamma ray Logging" e depositado em 22 de maio de 2009, que está incorporado por referência neste documento na íntegra. Além disso, deve ser entendido que coeficientes ou funções

adicionais podem modificar os termos CR_{ec} e CR_{lc} da Equação (5). Esses coeficientes podem ser constantes ou podem depender de outras medições da formação 242, tal como porosidade ou sigma.

5 A razão $Fastn$ mostrada acima é apenas uma maneira de obter uma medição do grau do fluxo de nêutrons rápidos através da formação 242. Outras maneiras para obter tal medição relacionada ao fluxo de nêutrons rápidos podem incluir, por exemplo, usar as razões de uma das taxas de
10 contagem de raios gama inelásticos de um dos detectores de raios gama 218 ou 220 e a taxa de contagem de nêutrons de um dos detectores de nêutrons 212, 214, 216A e/ou 216B para chegar a $Fastn$. Deve-se entender que o detector de nêutrons 212, 214, 216A e/ou 216B do qual a taxa de contagem de
15 nêutrons é obtida poderia ser um detector de nêutrons rápidos ou de nêutrons epitérmicos.

O sinal $Fastn$ pode indicar quando aplicar uma correção à(s) taxa(s) de contagem de nêutrons 246, à(s) taxa(s) de contagem de raios gama inelásticos 250 e/ou a
20 função de correção de transporte de nêutrons $f(CR_{neutron})$ para gerar uma medição NGD precisa para as formações com elementos pesados 290, como mostrado por um fluxograma 350 da FIG. 11. O fluxograma 350 pode começar enquanto o módulo LWD 120 está no poço 244, como visto na FIG. 4. O gerador
25 de nêutrons 206 pode emitir um arrebatamento de nêutrons 246 para a formação 242 (bloco 352), que podem espalhar inelasticamente 248 para fora de certos elementos da

formação 242, gerando raios gama inelásticos 250. A(s) taxa(s) de contagem de nêutrons 246, bem como taxa(s) de contagem destes raios gama inelásticos induzidos por nêutrons 250, podem ser obtidas (bloco 354).

5 Usando qualquer técnica adequada, tal como fornecida pela Equação (4), os circuitos de processamento de dados 200 podem determinar uma razão de correção de nêutrons rápidos $Fastn$ (bloco 356). Se o sinal $Fastn$ cair fora de um limite definido (bloco de decisão 358), os
10 circuitos de processamento de dados 200 podem aplicar uma correção à(s) taxa(s) de contagem 246, à(s) taxas de contagem de raios gama inelásticos 250 e/ou à função de correção de transporte de nêutrons $f(CR_{neutron})$ (bloco 360). O limite definido pode ser determinado experimentalmente ou
15 através de modelagem em computador e pode ser predefinido ou determinado pelos circuitos de processamento de dados 200. Se os circuitos de processamento de dados 200 não determinarem que o sinal $Fastn$ está fora do limite definido (bloco de decisão 308), os circuitos de processamento de
20 dados 200 podem não aplicar essa correção. Em qualquer caso, os circuitos de processamento de dados 200 posteriormente podem determinar uma medição NGD da formação 242 usando a(s) taxa(s) de contagem determinada(s) (corrigidas ou não corrigidas) de nêutrons 246, a(s)
25 taxa(s) de contagem de raios gama inelásticos 250 e/ou a função de correção de transporte de nêutrons $f(CR_{neutron})$ (bloco 362). Por exemplo, como observado acima, os

circuitos de processamento de dados 200 podem determinar a medição NGD baseada na relação representada pela Equação (1).

A correção para a(s) taxa(s) de contagem de nêutrons 246, a(s) taxa(s) de contagem de raios gama inelásticos 250 e/ou a função de correção de transporte de nêutrons $f(CR_{neutron})$ que é aplicada no bloco 360 pode depender da razão de correção de nêutrons rápidos *Fastn*. No entanto, a relação entre a razão de correção de nêutrons rápidos *Fastn* e as formações com elementos pesados 290 pode não ser imediatamente aparente. Na verdade, em um gráfico 370 na FIG. 12, que plota a razão de correção de nêutrons rápidos *Fastn* contra a densidade de elétrons para uma variedade de formações 242, os resultados para as formações com elementos pesados 290 parecem ser muito semelhantes aos de outras formações 242.

No gráfico 370 da FIG. 12, uma ordenada 372 representa o logaritmo da razão de correção de nêutrons rápidos *Fastn* e uma abcissa 374 representa a densidade de elétrons da formação 242 em unidades de g/cm^3 . Uma legenda indica vários tipos de formações 242 que foram modelados no gráfico 370, que coincidem com aquelas dos gráficos cruzados respectivos 280 e 340 das FIGS. 6 e 10, incluindo calcário, arenito, dolomita, arenito com poros cheios de ar, alumina, arenito com hematita e gás simulado. Situados ao longo de uma linha 376 estão os resultados para formações 242 com índice de hidrogênio relativamente baixo,

enquanto a coleção de resultados indicada pelo numeral 378 está associada com formações 242 com índice de hidrogênio relativamente elevado. Uma vez que os resultados para as formações com elementos pesados 290 aparecem entre a coleção de resultados indicados pelo numeral 378, a razão de correção de nêutrons rápidos $Fastn$ não parece diferenciar as formações com elementos pesados 290 de outras formações 242 indicadas pelo numeral 378.

No entanto, uma relação surge quando os dados da FIG. 12 são replotados de acordo com a densidade efetiva das formações 242, onde eficaz densidade $\rho_{effective}$ é definida da seguinte forma:

$$\rho_{effective} = \rho_{electron} + k \cdot HI \quad (6),$$

onde HI representa índice de hidrogênio e k representa uma constante. Em uma modalidade, o valor do índice de hidrogênio HI pode ser estimado através de uma razão de taxas de contagem de nêutrons de um ou mais dos detectores de nêutrons próximos 212 e/ou 214 para um ou mais dos detectores de nêutrons distantes 216A e/ou 216B (Próximos/Distantes). Assim, a densidade efetiva $\rho_{effective}$ computada na forma da Equação (6) inclui os efeitos de atenuação tanto de nêutrons quanto de raios gama na formação 242. A densidade efetiva $\rho_{effective}$ assim representa uma densidade que inclui no primeiro termo efeitos de espalhamento gama (densidade de elétrons) e no segundo termo efeitos de índice de hidrogênio (nêutrons lentos).

Esta correção pode levar em conta a dependência do índice de hidrogênio restante na computação da razão de correção de nêutrons rápidos $Fastn$ e, daí, também na medição NGD.

Em um gráfico 390 da FIG. 13, que replota os dados da FIG. 12 de acordo com a densidade efetiva em vez de densidade de elétrons, as formações com elementos pesados 290 são claros "estranhos". No gráfico 390 da FIG. 13, uma ordenada 392 representa o logaritmo da razão de correção de nêutrons rápidos $Fastn$, e uma abcissa 394 representa a densidade efetiva das formações 242 em unidades de g/cm^3 , conforme determinado através da Equação (6). Uma legenda indica vários tipos de formações 242 que foram modeladas no gráfico 390, incluindo calcário, arenito, dolomita, arenito com poros cheios de ar, alumina, arenito com hematita e gás simulado. Situados ao longo de uma linha de referência 396 estão os resultados para todas as formações 242 exceto as formações com elementos pesados 290. Ou seja, a maioria dos pontos cai na ou muito perto da linha de referência 396, independentemente do conteúdo dos espaços de poros das formações 242. Ou seja, os resultados tanto para formações cheias de líquido quanto formações secas (isentas de hidrogênio) 242 caem na mesma linha, a exceção sendo as formações com elementos pesados 290 que contêm alumínio e/ou ferro. Como claramente visto no gráfico 390, há muito boa diferenciação entre as formações 242 que não contêm alumínio ou ferro e aqueles que contêm.

Do gráfico 390 da FIG. 13, deve ficar aparente que

a correção do bloco 360 da FIG. 11 pode ser determinada computando a diferença entre os pontos nos quais as formações com elementos pesados 290 estão localizadas e o valor na linha de referência 396 (para a mesma densidade efetiva). Um gráfico 400 da FIG. 14 replota os dados mostrados na FIG. 13 para tornar esta relação mais clara, tendo uma ordenada 402 representando a correção de nêutrons rápidos no espaço $\log(Fastn)$ e uma abcissa 404 representando a densidade efetiva. Como tal, a distância dos resultados das formações com elementos pesados 290 da linha de referência 396 pode ser vista mais claramente. Assim, a correção do bloco 360 da FIG. 11 pode ser qualquer correção da(s) taxa(s) de contagem de nêutrons 246, da(s) taxa(s) de contagem de raios gama inelásticos 250 e/ou da função de correção de transporte de nêutrons $f(CR_{neutron})$ de modo a fazer com que as formações com elementos pesados 290 alinhem ao longo da linha de referência 396.

Deve ser apreciado que, além de permitir uma medição NGD mais precisa para formações com elementos pesados 290, a razão de correção de nêutrons rápidos $Fastn$ também pode ser usada como um indicador de folhelho. Ou seja, como a razão de correção de nêutrons rápidos $Fastn$ pode ser usada para indicar a presença de alumínio e/ou ferro, por exemplo, a razão de correção de nêutrons rápidos $Fastn$ pode ser usada em conjunto com outros indicadores de folhelho (por exemplo, raio gama natural, espectroscopia de raio gama natural, espectroscopia de captura e inelástica,

ativação de nêutrons, sigma e assim por diante) para refinar a análise da litologia da formação.

Seguindo as técnicas acima descritas, as várias formações 242 plotadas nos gráficos cruzados 280 e 340
5 acima podem todas ser corrigidas e substancialmente precisas, apesar das variações em transporte de nêutrons rápidos em formações de baixo índice de hidrogênio e/ou de baixa porosidade 288 e formações com elementos pesados 290, como representado por um gráfico cruzado 410 da FIG. 15. No
10 gráfico cruzado 410, uma ordenada 412 representa o logaritmo de uma taxa de contagem de raios gama corrigida para transporte de nêutrons como detectada pelo detector de raios gama LS 218, e uma abcissa 414 representa a densidade de elétrons das formações 242 em unidades de g/cm^3 . Uma
15 legenda indica vários tipos de formações 242 que foram modelados no gráfico cruzado 410, incluindo calcário, arenito, dolomita, arenito com poros cheios de ar, alumina, arenito com hematita e gás simulado. Notadamente, substancialmente todos os resultados para as formações 242
20 modeladas no gráfico cruzado 410 caem ao longo da linha 286, que representa uma correlação precisa entre a taxa de contagem de raios gama corrigida para transporte de nêutrons e a densidade de formação conhecida. Embora nem todos os resultados para as formações com elementos pesados
25 290 possam cair exatamente ao longo da linha 286, os resultados para as formações com elementos pesados 290 são melhorados aplicando a correção.

Efeitos técnicos da presente divulgação incluem a determinação exata de uma medição de densidade nêutron-gama (NGD) para uma ampla faixa de formações, incluindo formações com baixo índice de hidrogênio ou baixa porosidade e formações com elementos pesados. Estas medições NGD podem permanecer precisas mesmo quando a configuração de uma ferramenta dentro do poço usada para obter as taxas de contagem de nêutrons e as taxas de contagem de raios gama usadas na medição NGD não tem uma configuração ideal. Assim, apesar da falta de um detector de nêutrons rápidos ou apesar de um detector de nêutrons pode ser colocado em um espaçamento subótimo da fonte de nêutrons, uma medição NGD precisa ainda pode ser obtida usando os sistemas e as técnicas divulgadas acima.

As modalidades específicas descritas acima foram mostradas a título de exemplo e deve-se entender que estas modalidades são susceptíveis a várias modificações e formas alternativas. Deve ser ainda entendido que as reivindicações não se destinam a ser limitadas às formas particulares divulgadas, mas sim a cobrir todas as modificações, equivalentes e alternativas caindo dentro do espírito e do escopo desta divulgação.

- REIVINDICAÇÕES -

1. MÉTODO, caracterizado por compreender:

emitir nêutrons para uma formação usando um gerador de nêutrons de uma ferramenta dentro do poço, de modo que
5 alguns dos nêutrons espalhem inelasticamente para fora da formação e gerem raios gama inelásticos;

detectar uma taxa de contagem de nêutrons que retornam para a ferramenta dentro do poço usando um detector de nêutrons da ferramenta dentro do poço;

10 detectar uma taxa de contagem de raios gama inelásticos usando um detector de raios gama da ferramenta dentro do poço;

determinar se a formação tem uma característica que é esperada fazer com que a taxa de contagem de nêutrons
15 resulte em uma determinação de densidade nêutron-gama que não é precisa sem uma correção adicional, em que a correção adicional não é aplicada quando a formação não tem a característica;

quando a formação tem a característica, aplicar a
20 correção adicional aplicando uma correção à taxa de contagem de nêutrons, a taxa de contagem de raios gama inelásticos ou a função de correção de transporte de nêutrons, ou uma combinação das mesmas e determinar uma densidade da formação com base pelo menos em parte na taxa
25 de contagem corrigida de nêutrons, na taxa de contagem corrigida de raios gama inelásticos ou a função de correção de transporte de nêutrons corrigida, ou uma combinação das

mesmas; e

quando a formação não tem a característica, determinar uma densidade da formação com base pelo menos em parte na taxa de contagem detectada de nêutrons, na taxa de
5 contagem detectada de raios gama inelásticos ou na função de correção de transporte de nêutrons ou uma combinação das mesmas.

2. Método, de acordo com a reivindicação 1, caracterizado por a característica compreender uma
10 porosidade que é mais baixa do que um valor predeterminado.

3. Método, de acordo com a reivindicação 1, caracterizado por a característica compreender uma concentração de elementos pesados que faz com que a taxa de contagem de nêutrons não corresponda precisamente a um
15 transporte de nêutrons rápido da formação quando aplicada na função de correção de transporte de nêutrons.

4. Método, de acordo com a reivindicação 1, caracterizado por a densidade da formação ser determinada com base pelo menos em parte na função de correção de
20 transporte de nêutrons, em que a função de correção de transporte de nêutrons é uma função da taxa de contagem de nêutrons que corresponde precisamente a um transporte de nêutrons rápido de pelo menos algumas formações que não têm a característica.

25 5. Método, de acordo com a reivindicação 1, caracterizado por a densidade da formação ser determinada pelo menos em parte com base em uma função da taxa de

contagem de raios gama inelásticos menos um valor obtido pela função de correção de transporte de nêutrons e uma função de calibração, em que a função de calibração considera a saída de nêutrons do gerador de nêutrons.

5 6. Método, de acordo com a reivindicação 1, caracterizado por a densidade da formação ser determinada pelo menos em parte com base na seguinte relação:

$$\frac{\log(CR_{\gamma}^{inel}) - f(CR_{neutron}) - \log(C_{cal} \cdot N_S)}{c_1} = \rho_{electron}$$

10 onde $\rho_{electron}$ representa a densidade da formação, CR_{γ}^{inel} representa a taxa de contagem de raios gama inelásticos, $CR_{neutron}$ representa a taxa de contagem de nêutrons, $f(CR_{neutron})$ representa a função de correção de transporte de nêutrons, C_{cal} representa uma constante de calibração, N_S representa uma saída do gerador de nêutrons, e c_1 representa um
15 coeficiente obtido experimentalmente ou através de modelagem nuclear ou por uma combinação de ambos.

20 7. Método, de acordo com a reivindicação 6, caracterizado por a função de correção de transporte de nêutrons $f(CR_{neutron})$ ser determinada de acordo com a seguinte relação:

$$f(CR_{neutron}) = e_1 \log(CR_{neutron}^{e_2} + e_3),$$

 onde e_1 , e_2 e e_3 representam coeficientes determinados através de medições experimentais ou modelagem nuclear ou uma combinação destes.

8. FERRAMENTA DENTRO DO POÇO, caracterizada por compreender:

um gerador de nêutrons configurado para emitir nêutrons para uma formação a uma energia suficiente para
5 fazer com que alguns dos nêutrons se espalhem inelasticamente para fora dos elementos da formação, criando raios gama inelásticos;

um detector de nêutrons configurado para detectar uma taxa de contagem de nêutrons que retornam para a
10 ferramenta dentro do poço;

um primeiro detector de raios gama configurado para detectar uma primeira taxa de contagem de raios gama inelásticos que se espalham por Compton através da formação para atingir a ferramenta dentro do poço, em que o primeiro
15 detector de raios gama está afastado a uma primeira distância do gerador de nêutrons;

um segundo detector de raios gama configurado para detectar uma segunda taxa de contagem de raios gama que se espalham por Compton através da formação para atingir a
20 ferramenta dentro do poço, em que o segundo detector de raios gama é afastado a uma segunda distância do gerador de nêutrons; e

circuitos de processamento de dados configurados para:

25 receber a taxa de contagem de nêutrons, a primeira taxa de contagem de raios gama inelásticos e a segunda taxa de contagem de raios gama inelásticos;

determinar uma porosidade aparente da formação ou uma estimativa de um sinal de nêutrons rápido que seria detectado por um detector de nêutrons rápido caso o detector de nêutrons rápido estivesse presente na ferramenta dentro do poço, em que a estimativa do sinal de nêutrons rápido é determinada pelo menos em parte com base na taxa de contagem de nêutrons, na primeira taxa de contagem de raios gama inelásticos ou na segunda taxa de contagem de raios gama inelásticos, ou uma combinação das mesmas;

aplicar uma correção à taxa de contagem de nêutrons, à primeira taxa de contagem de raios gama inelásticos, à segunda taxa de contagem de raios gama inelásticos ou a uma função de correção de transporte nêutrons relativa à taxa de contagem de nêutrons para o transporte de nêutrons rápido da formação, ou uma combinação das mesmas, quando a porosidade aparente da formação é menor do que um limite ou quando a estimativa do transporte de nêutrons rápido da formação está fora de um limite; e

determinar uma densidade da formação com base pelo menos em parte na taxa de contagem corrigida de nêutrons, na primeira taxa de contagem corrigida de raios gama inelásticos, na segunda taxa de contagem corrigida de raios gama inelásticos ou na função de correção de transporte de nêutrons, ou uma combinação destes.

9. Ferramenta dentro do poço, de acordo com a

reivindicação 8, caracterizada por o detector de nêutrons compreender um detector de nêutrons epitérmico, em que a taxa de contagem de nêutrons compreende uma taxa de contagem de nêutrons epitérmicos.

5 10. Ferramenta dentro do poço, de acordo com a reivindicação 8, caracterizada por os circuitos de processamento de dados serem configurados para determinar a porosidade aparente com base pelo menos em parte:

na taxa de contagem de nêutrons;

10 em uma razão entre a taxa de contagem de nêutrons e outra taxa de contagem de nêutrons;

em uma razão entre duas taxas de contagem de raios gama de captura de nêutron;

15 uma razão entre a primeira taxa de contagem de raios gama inelásticos e a segunda taxa de contagem de raios gama inelásticos;

20 uma razão entre a taxa de contagem de nêutrons e a primeira taxa de contagem de raios gama inelásticos, a segunda taxa de contagem de raios gama inelásticos ou uma combinação das mesmas;

uma função da taxa de contagem de nêutrons e da primeira taxa de contagem de raios gama inelásticos, da segunda taxa de contagem de raios gama inelásticos ou uma combinação das mesmas; ou

25 outras técnicas utilizadas pela ferramenta dentro do poço; ou

uma combinação dos mesmos.

11. Ferramenta dentro do poço, de acordo com a reivindicação 8, caracterizada por os circuitos de processamento de dados serem configurados para aplicar a correção de modo a fazer com que a taxa de contagem de nêutrons, a primeira taxa de contagem de raios gama inelásticos, a segunda taxa de contagem de raios gama inelásticos ou a função de correção de transporte de nêutrons, ou a combinação das mesmas, para relacionar mais precisamente à verdadeira densidade da formação.

10 12. Ferramenta dentro do poço, de acordo com a reivindicação 8, caracterizada por os circuitos de processamento de dados serem configurados para aplicar a correção incluindo uma correção de taxa de contagem de nêutrons à taxa de contagem de nêutrons, em que a correção de taxa de contagem de nêutrons adiciona uma quantidade à taxa de contagem de nêutrons que considera uma variação no transporte de nêutrons rápido que ocorre em formações tendo uma porosidade abaixo do limite de porosidade aparente.

20 13. Ferramenta dentro do poço, de acordo com a reivindicação 8, caracterizada por os circuitos de processamento de dados serem configurados para aplicar a correção adicionando uma correção de taxa de contagem de nêutrons à taxa de contagem de nêutrons em uma quantidade que varia com base pelo menos em parte na porosidade aparente da formação.

25 14. Ferramenta dentro do poço, de acordo com a reivindicação 8, caracterizada por os circuitos de

processamento de dados serem configurados para aplicar a correção adicionando uma correção de taxa de contagem de nêutrons à taxa de contagem de nêutrons, em que a correção de taxa de contagem de nêutrons é determinada com base pelo menos em parte em uma função de correção de transporte de nêutrons secundária e uma função de ponderação, em que a função de correção de transporte de nêutrons secundária é dependente da taxa de contagem de nêutrons e da primeira taxa de contagem de raios gama inelásticos, da segunda taxa de contagem de raios gama inelásticos, ou uma combinação das mesmas, e a função de ponderação é dependente da taxa de contagem de nêutrons e do limite.

15. Ferramenta dentro do poço, de acordo com a reivindicação 14, caracterizada por a função de ponderação ser uma função linear em pedaços compreendendo duas ou mais linhas retas entre diferentes valores da taxa de contagem de nêutrons, um valor constante ou uma função afim, ou uma combinação destes.

16. Ferramenta dentro do poço, de acordo com a reivindicação 8, caracterizada por os circuitos de processamento de dados serem configurados para aplicar a correção determinando uma taxa de contagem corrigida de nêutrons, em que a taxa de contagem corrigida de nêutrons é determinada de acordo com a seguinte relação:

$$25 \quad CR_{neutron,corrected} = CR_{neutron} \left(1 + g(CR_{limit}, CR_{neutron}) \cdot F(CR_{neutron}, CR_{inel}^{\gamma}) \right),$$

onde $CR_{neutron,corrected}$ representa a taxa de contagem

corrigida de nêutrons, $CR_{neutron}$ representa a taxa de contagem de nêutrons, CR_{limit} representa um limite de taxa de contagem de nêutrons correspondente ao limite de porosidade aparente, CR_{inel}^{γ} representa a primeira taxa de contagem de raios gama inelásticos ou a segunda taxa de contagem de raios gama inelásticos, ou uma combinação de ambas, $F(CR_{neutron}, CR_{inel}^{\gamma})$ representa uma função de correção de transporte de nêutrons, e $g(CR_{limit}, CR_{neutron})$ representa uma função de ponderação.

10 17. Ferramenta dentro do poço, de acordo com a reivindicação 8, caracterizada por os circuitos de processamento de dados serem configurados para determinar a estimativa do sinal de nêutrons rápido com base pelo menos em parte em uma razão da primeira taxa de contagem de raios
15 gama inelásticos e da segunda taxa de contagem de raios gama inelásticos.

 18. Ferramenta dentro do poço, de acordo com a reivindicação 8, caracterizada por os circuitos de processamento de dados serem configurados para determinar a
20 estimativa do sinal de nêutrons rápido com base pelo menos em parte na seguinte relação:

$$Fastn = \frac{CR_{net-inelastic}^{SSn}}{CR_{net-inelastic}^{LSn}},$$

onde $Fastn$ representa o sinal de nêutrons rápido, $CR_{net-inelastic}^{SSn}$ representa a primeira taxa de contagem de raios

gama inelásticos, e $CR_{net-inelastic}^{LSn}$ representa a segunda taxa de contagem de raios gama inelásticos.

19. Ferramenta dentro do poço, de acordo com a reivindicação 8, caracterizada por a primeira taxa de contagem de raios gama inelásticos, ou a segunda taxa de contagem de raios gama inelásticos, ou ambas a primeira taxa de contagem de raios gama inelásticos e a segunda taxa de contagem de raios gama inelásticos serem determinadas com base pelo menos em parte nas taxas de contagem de raios gama respectivamente obtidas durante as aberturas de tempo de arrebentamento, captura inicial e posterior.

20. Ferramenta dentro do poço, de acordo com a reivindicação 8, caracterizada por os circuitos de processamento de dados serem configurados para determinar a primeira taxa de contagem de raios gama inelásticos, ou a segunda taxa de contagem de raios gama inelásticos ou ambas a primeira taxa de contagem de raios gama inelásticos e a segunda taxa de contagem de raios gama inelásticos com base pelo menos em parte na seguinte relação:

$$20 \quad CR_{net-inelastic} = CR_{burst} - CR_{ec} - \alpha CR_{lc},$$

em que $CR_{net-inelastic}$ representa a primeira taxa de contagem de raios gama inelásticos, ou a segunda taxa de contagem de raios gama inelásticos ou ambas a primeira taxa de contagem de raios gama inelásticos e a segunda taxa de contagem de raios gama inelásticos, CR_{burst} representa um taxa de contagem de raios gama obtida durante uma porta de

tempo de arrebatamento, CR_{ec} representa um taxa de contagem de raios gama obtida durante uma porta de tempo de captura inicial, CR_{ic} representa um taxa de contagem de raios gama obtida durante uma porta de tempo posterior, e α representa uma constante.

21. Ferramenta dentro do poço, de acordo com a reivindicação 8, caracterizada por os circuitos de processamento de dados serem configurados para determinar a estimativa do sinal de nêutrons rápido com base pelo menos em parte em uma razão entre a primeira taxa de contagem de raios gama inelásticos ou a segunda taxa de contagem de raios gama inelásticos e a taxa de contagem de nêutrons.

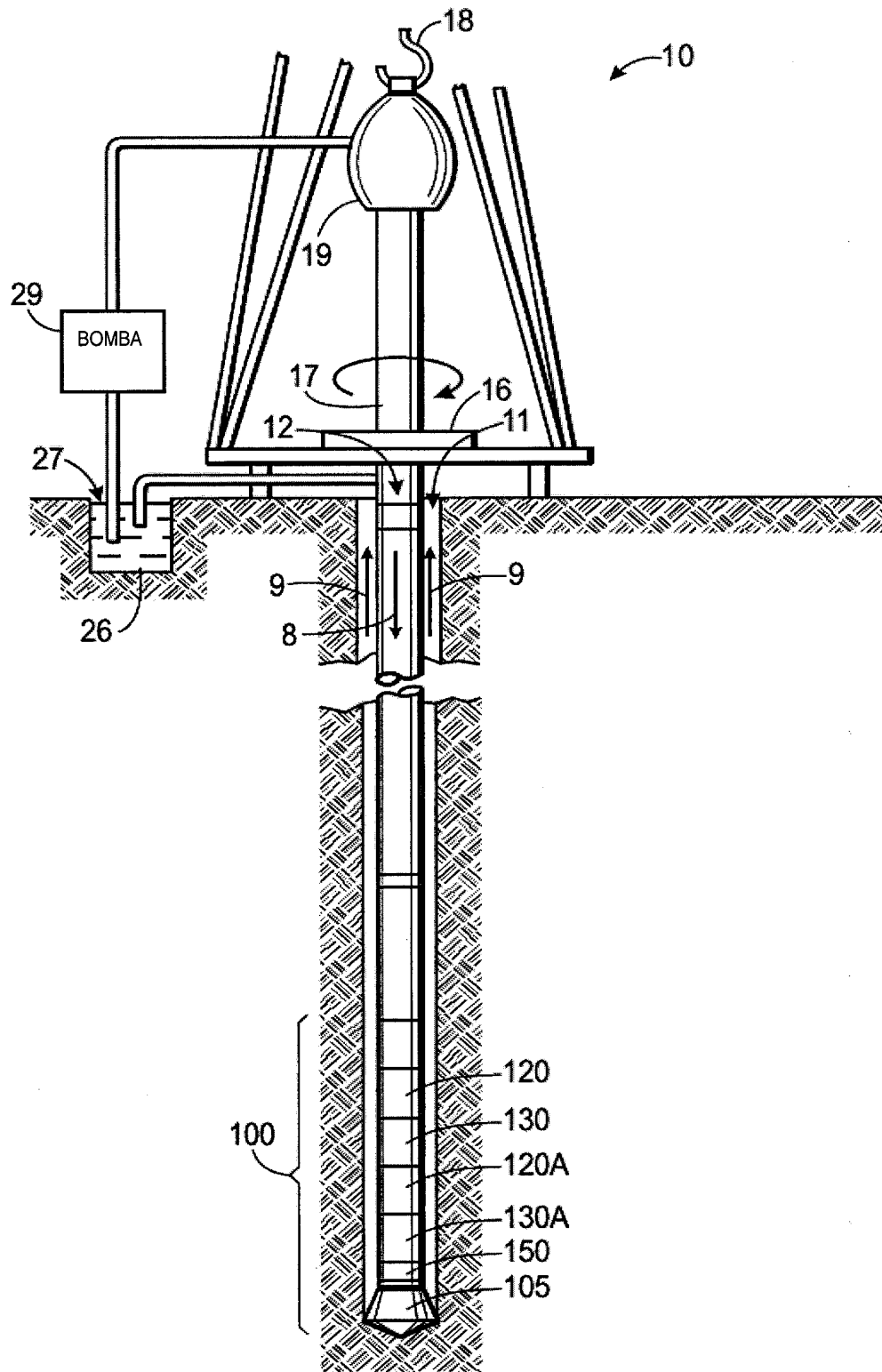


FIG. 1

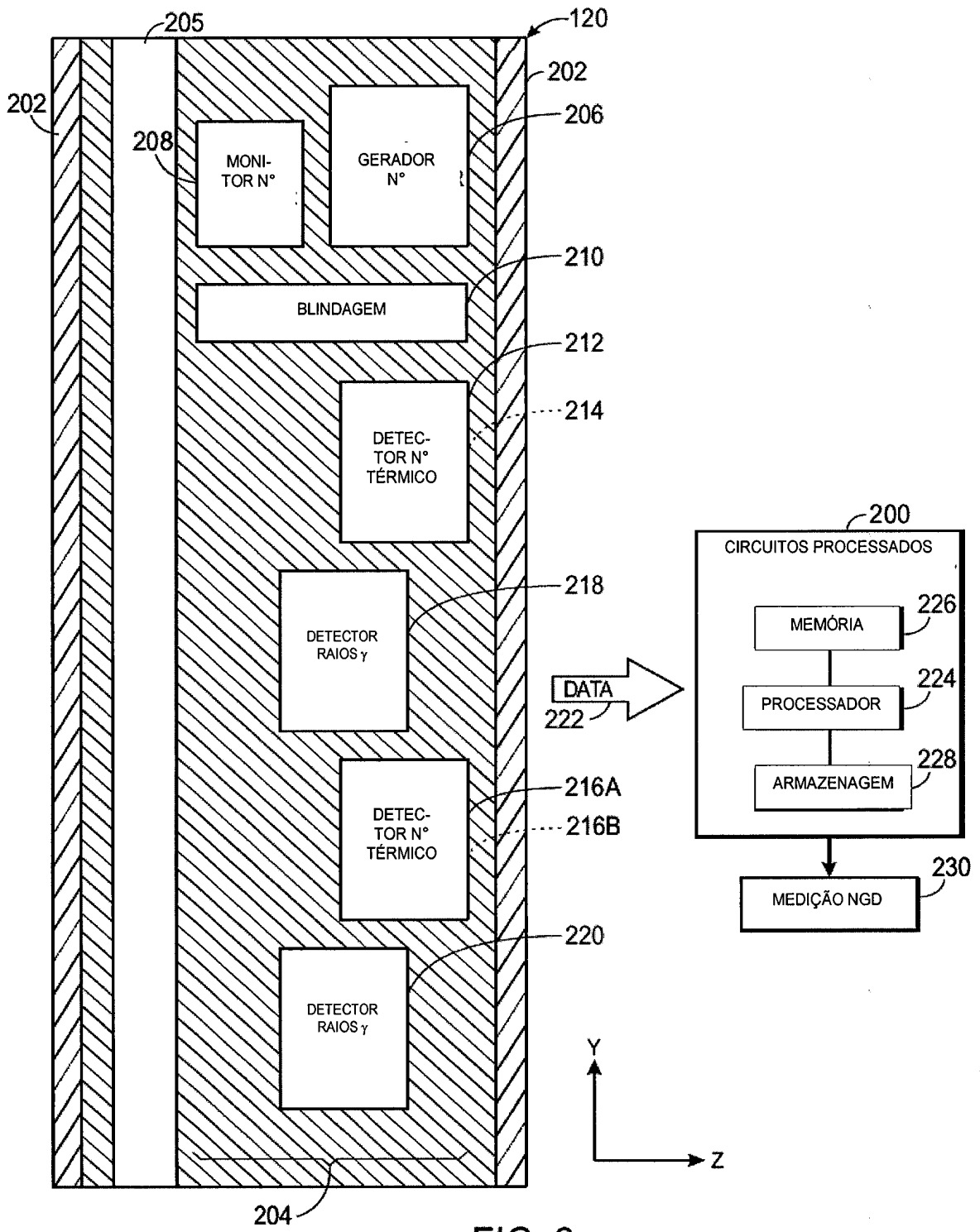
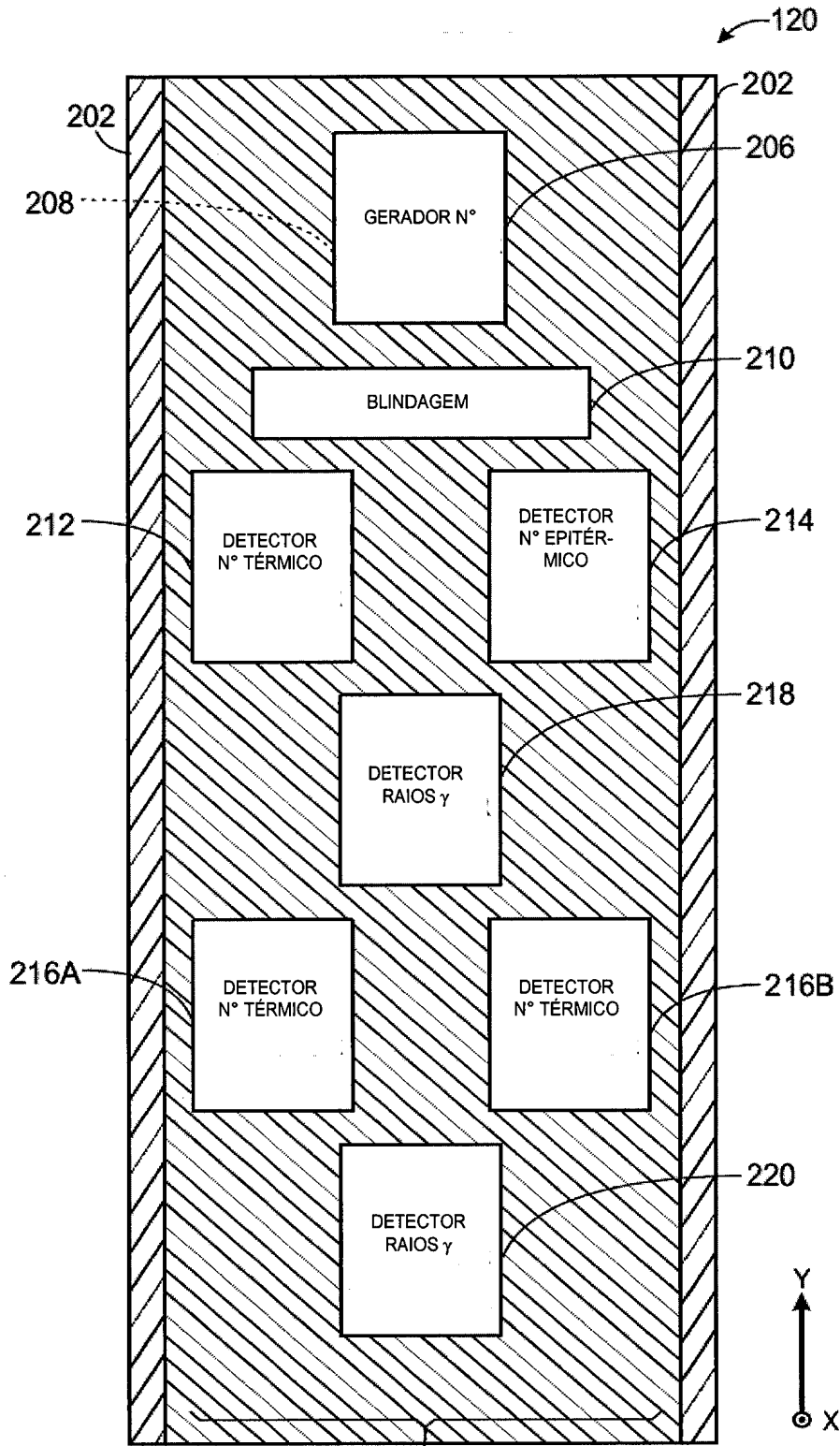


FIG. 2



204 FIG. 3

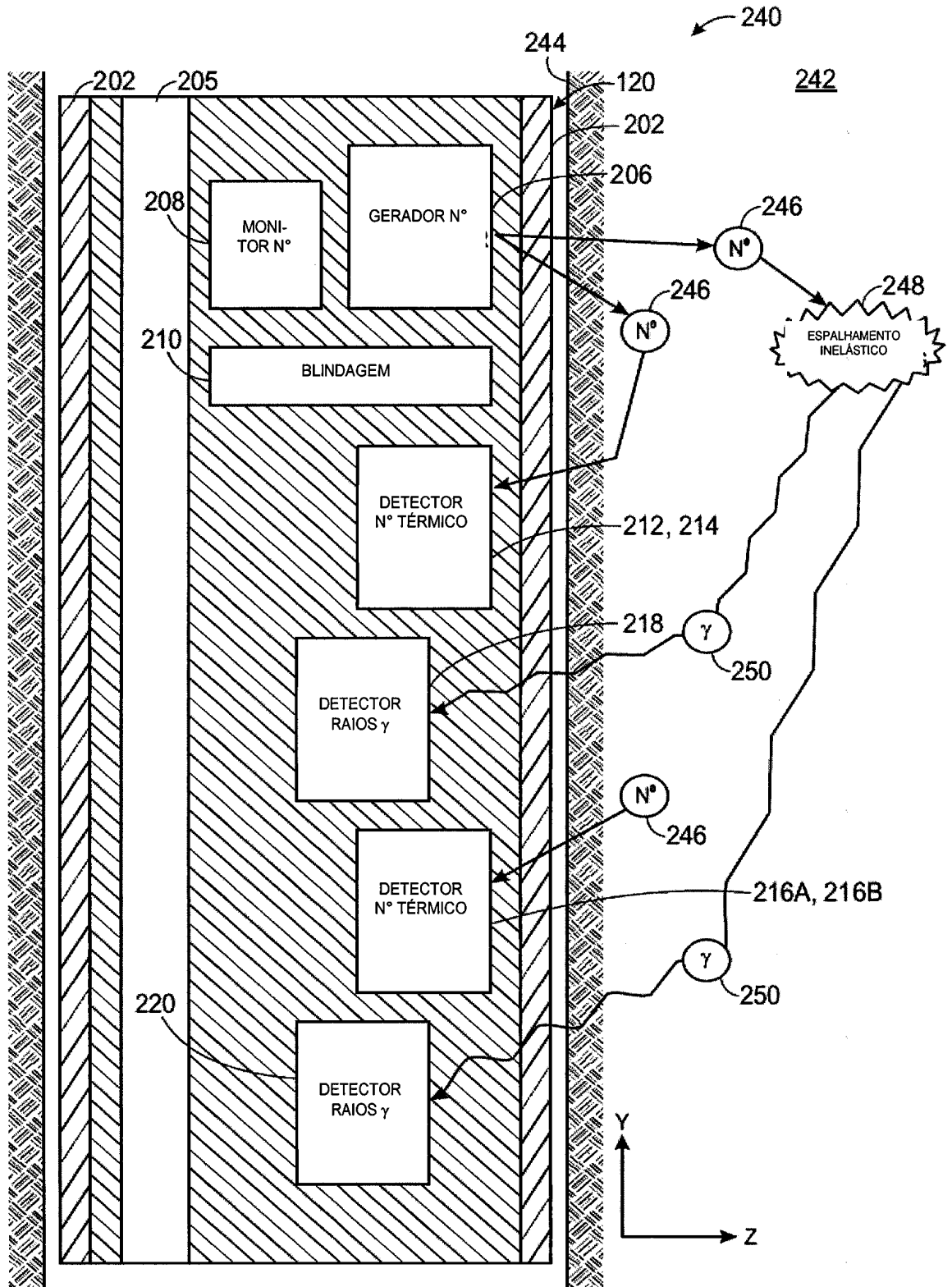


FIG. 4

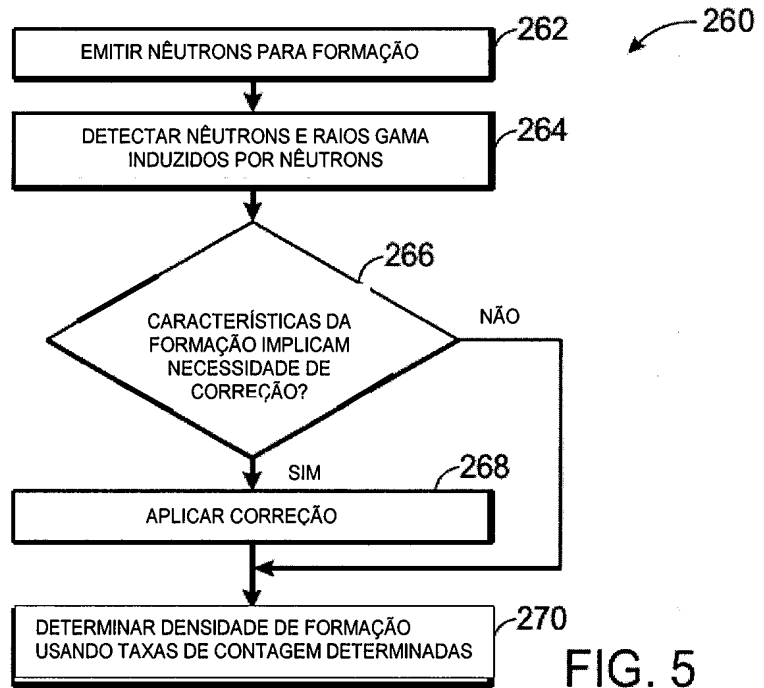


FIG. 5

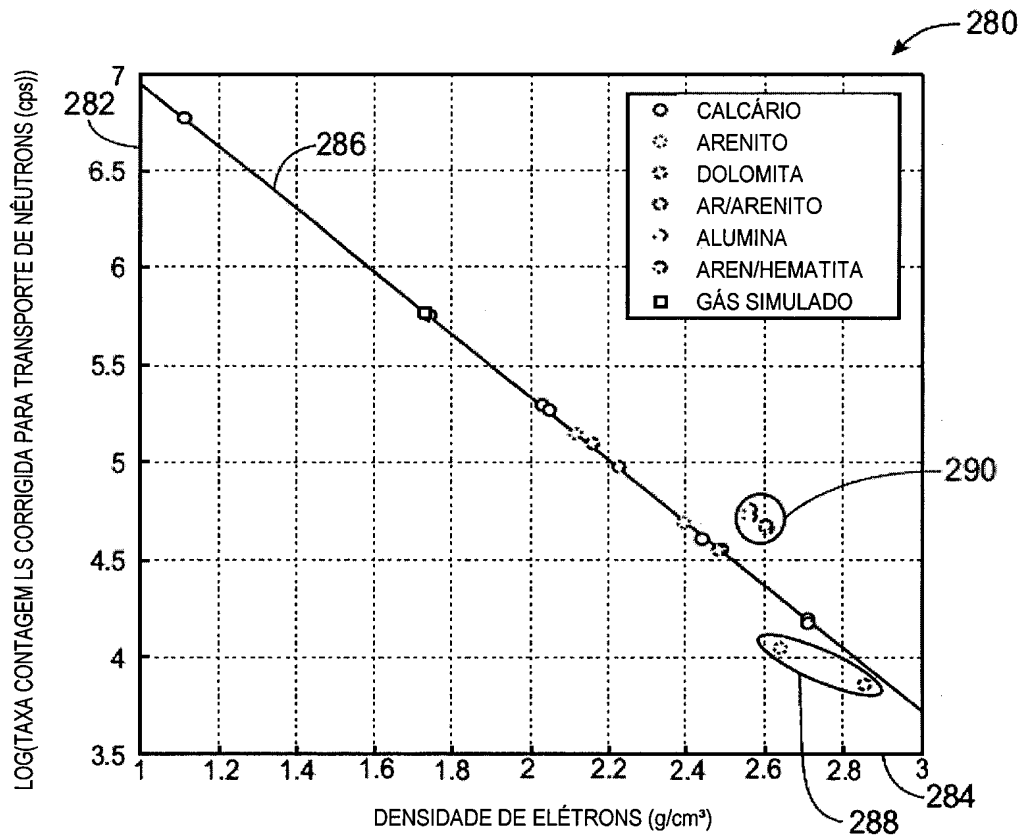
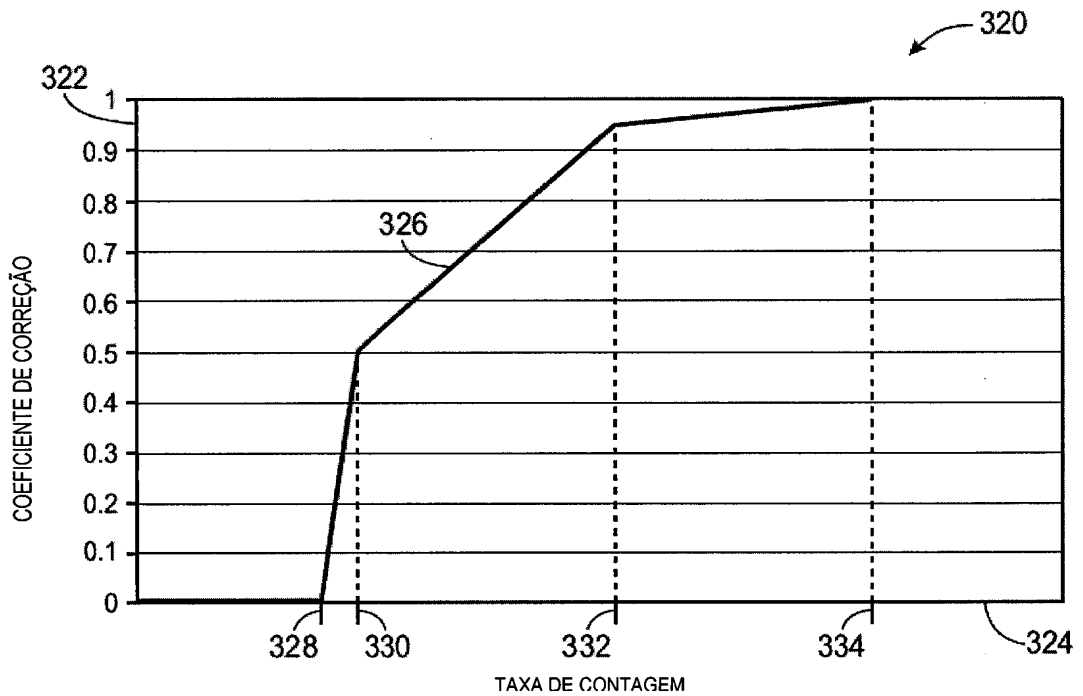
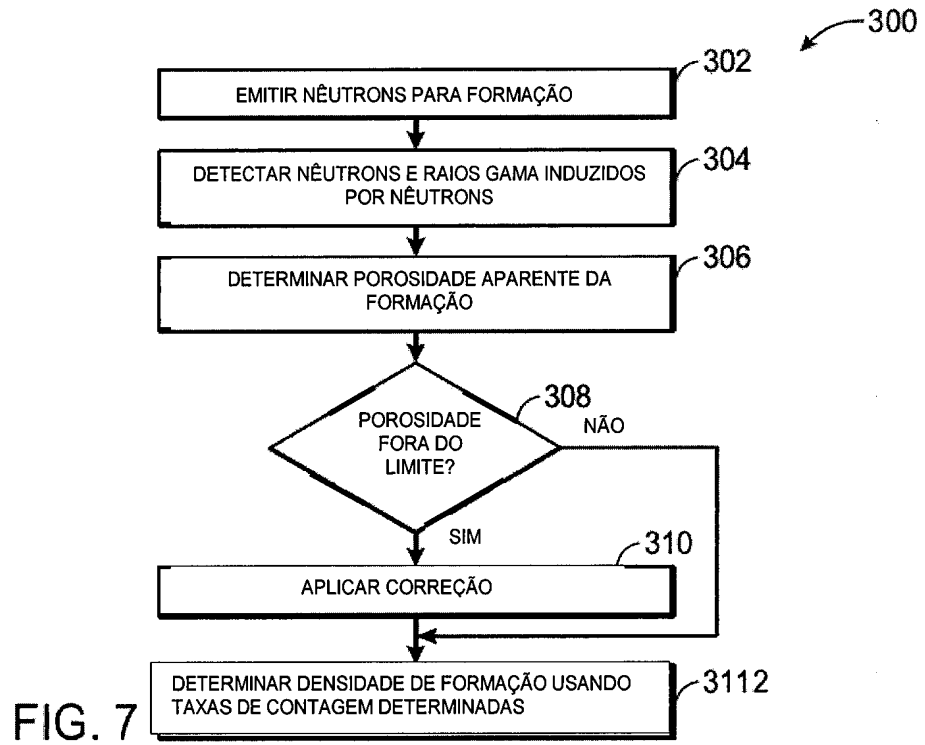
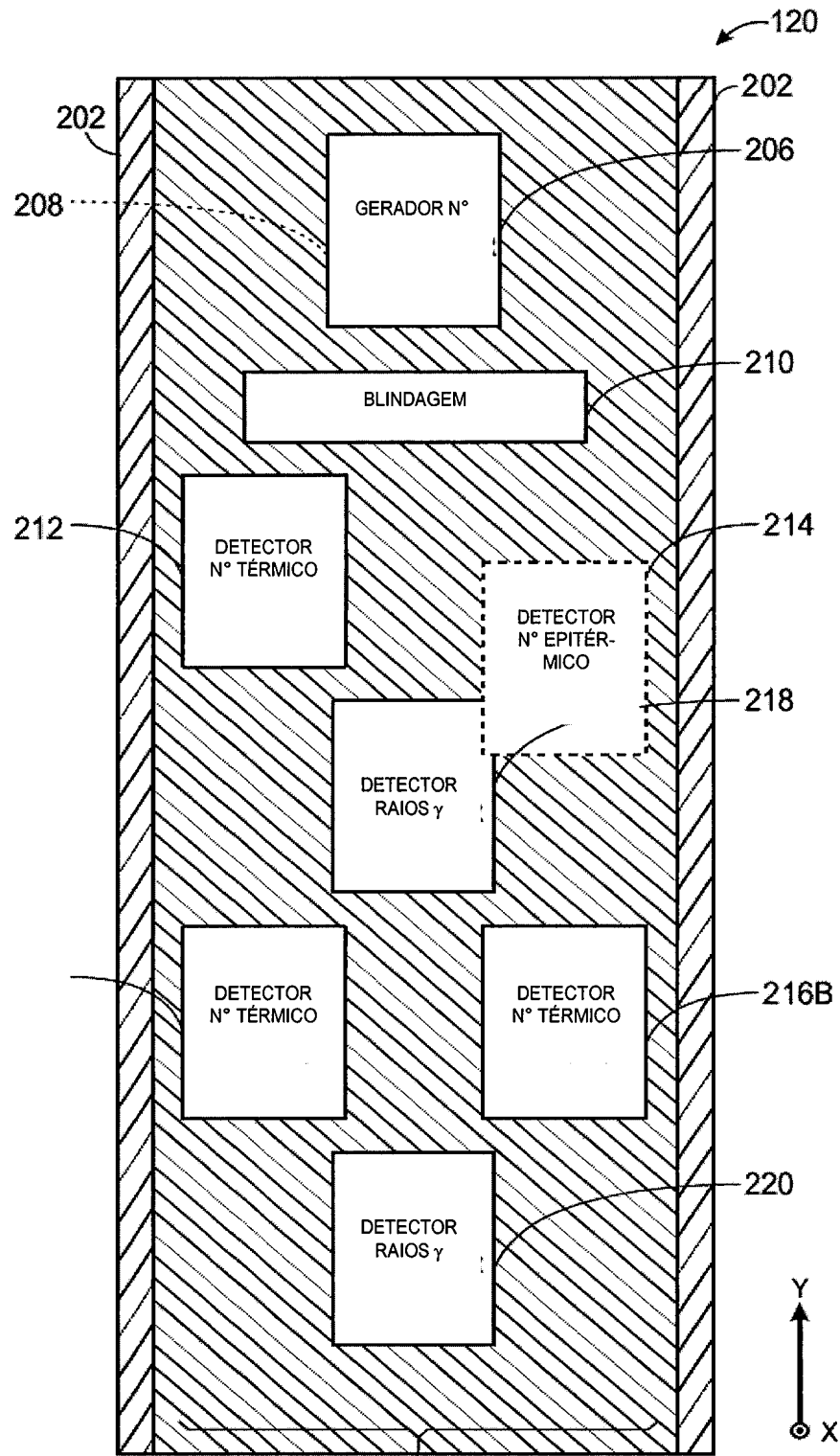


FIG. 6





204
FIG. 9

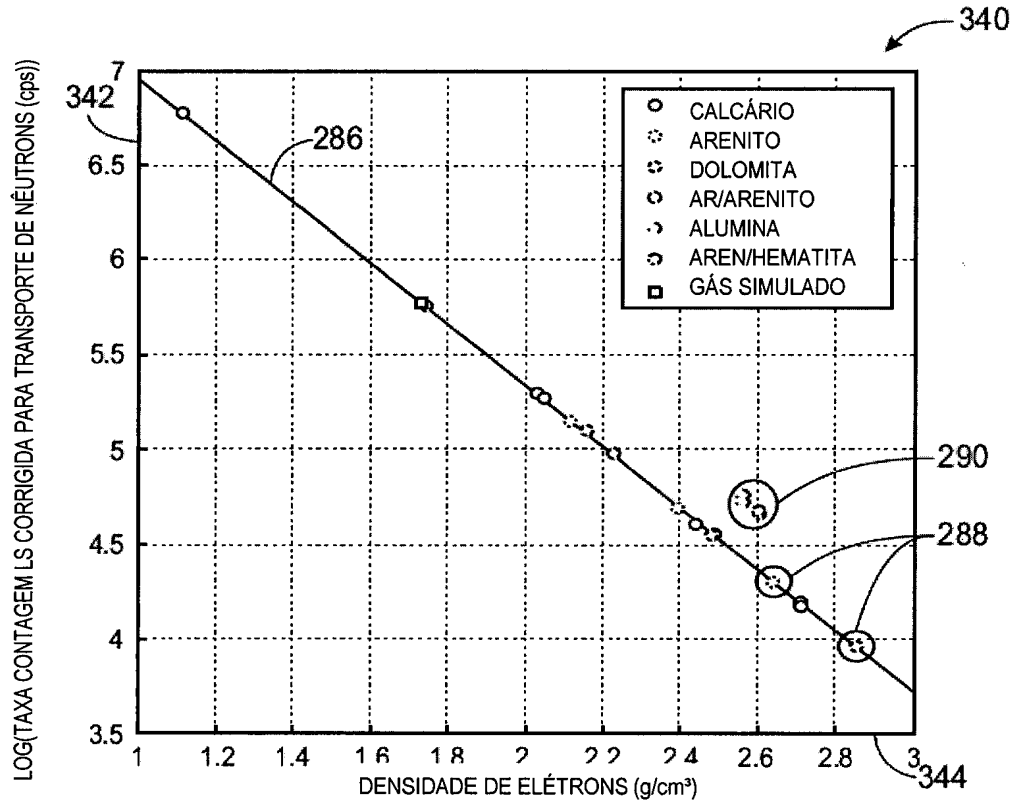


FIG. 10

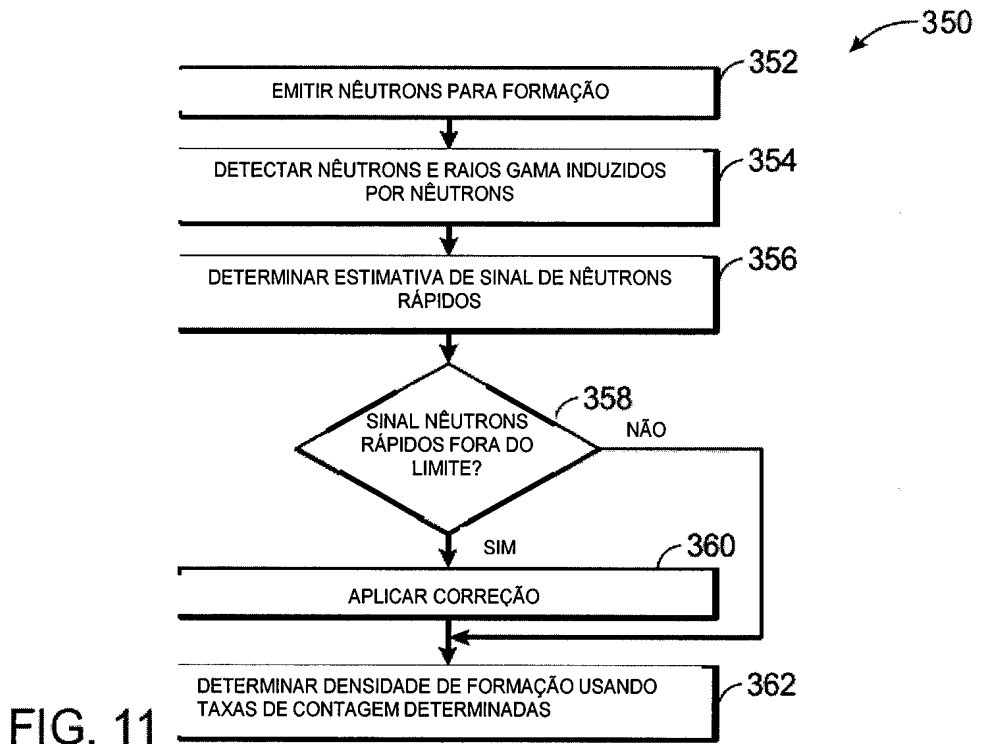


FIG. 11

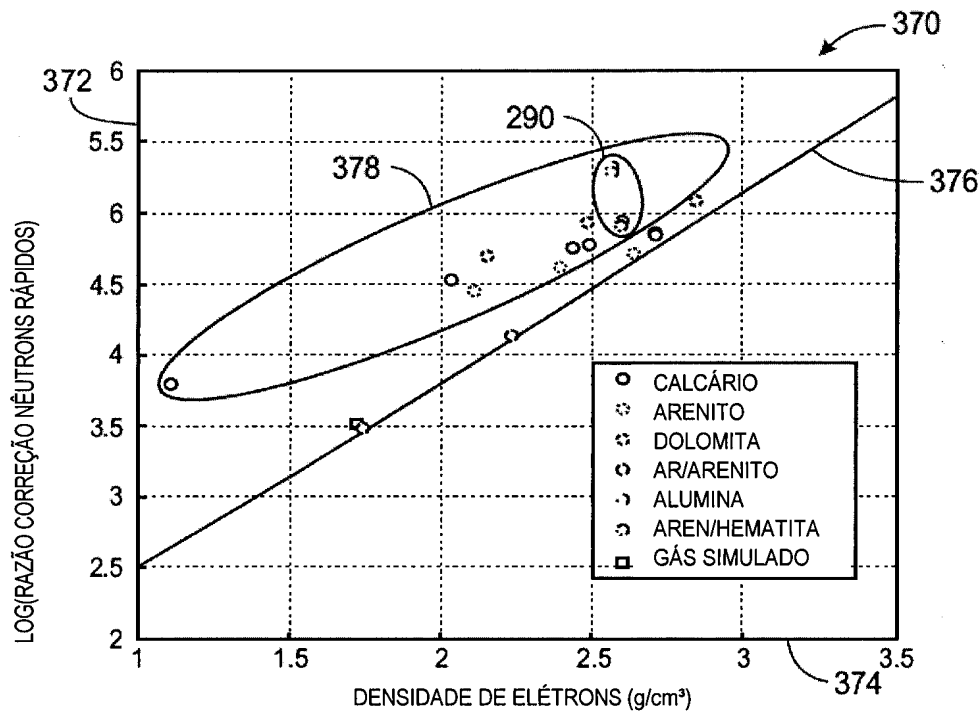


FIG. 12

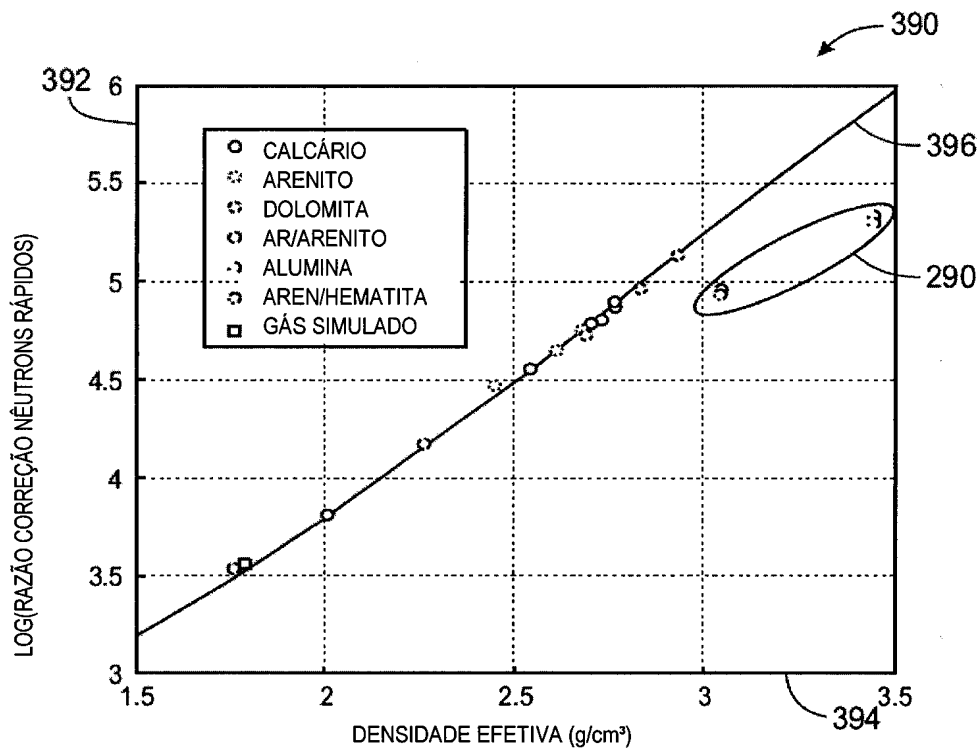


FIG. 13

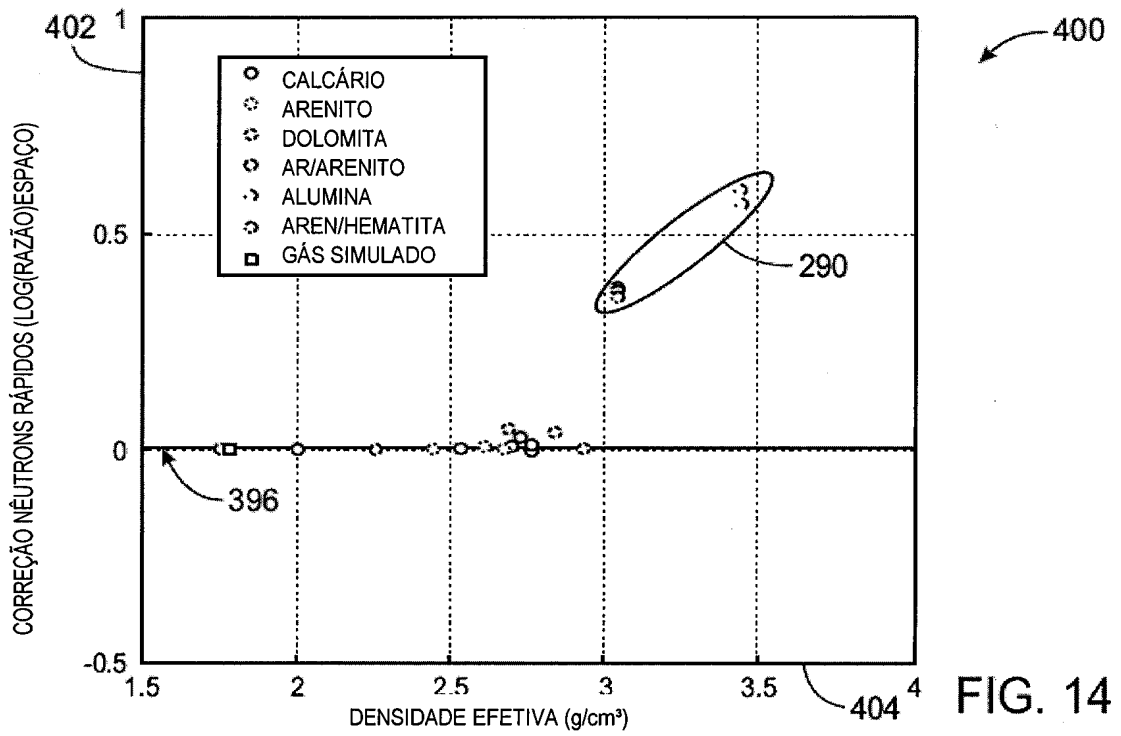


FIG. 14

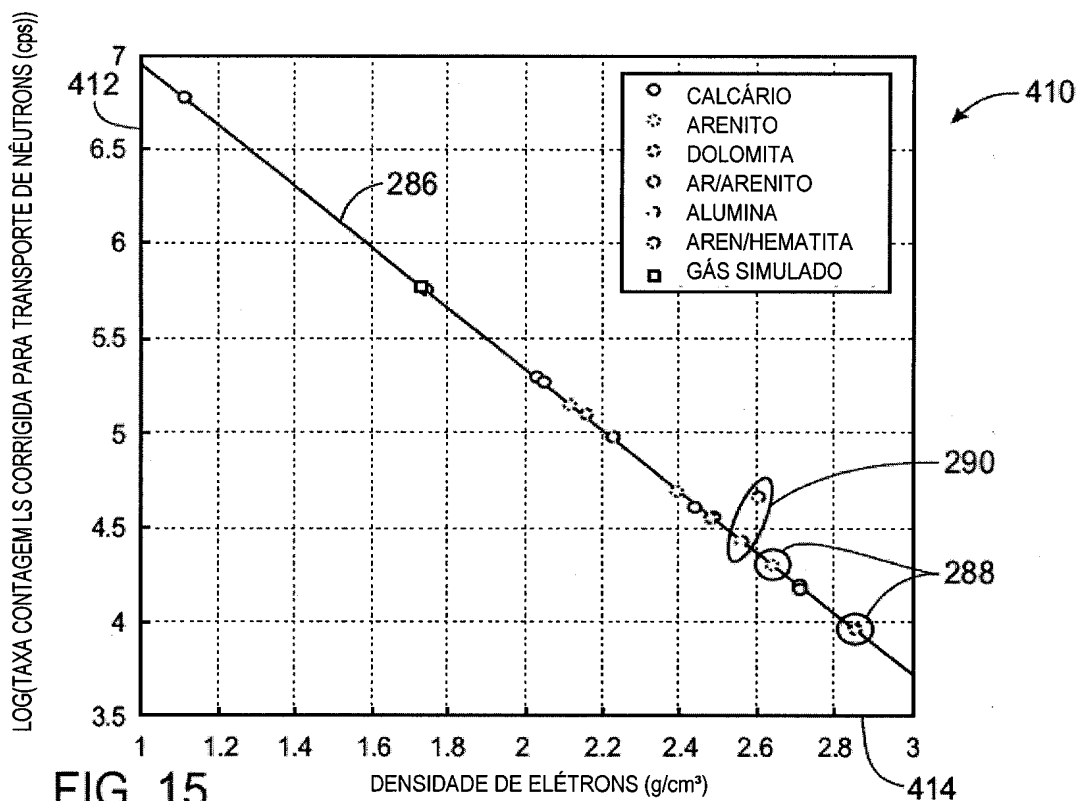


FIG. 15

RESUMO

MÉTODO, E FERRAMENTA DENTRO DO POÇO

Sistemas, métodos e dispositivos são fornecidos para determinar uma medição de densidade nêutron-gama (NGD) precisa para uma ampla variedade de formações, incluindo formações de baixo índice de hidrogênio ou baixa porosidade e formações com elementos pesados. Por exemplo, essa medição de NGD pode ser obtida emitindo nêutrons para uma formação de modo que alguns dos nêutrons se espalhem inelasticamente para fora dos elementos da formação e gerem raios gama inelásticos. Os nêutrons e os raios gama inelásticos que retornam para a ferramenta dentro do poço podem ser detectados. Acredita-se que algumas características de determinadas formações afetam o transporte de nêutrons rápido das formações. Assim, se uma formação tiver uma ou mais dessas características, se pode aplicar uma correção à taxa de nêutrons contada, a taxa de raios gama inelásticos contada ou a função de correção de transporte de nêutrons, mediante a qual a densidade nêutron-gama (NGD) pode ser determinada.