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

(11) BR 102014005997-0 B1

(22) Data do Depósito: 14/03/2014

(45) Data de Concessão: 08/09/2021

(54) Título: MÉTODO PARA GERAR UMA IMAGEM DE UMA FORMAÇÃO SUBTERRÂNEA, SISTEMA PARA GERAR UMA IMAGEM DE UMA FORMAÇÃO SUBTERRÂNEA E MEIO LEGÍVEL POR COMPUTADOR

(51) Int.Cl.: G01V 1/48.

(30) Prioridade Unionista: 14/10/2013 US 14/053,264; 15/03/2013 US 61/794,947.

(73) Titular(es): PGS GEOPHYSICAL AS.

(72) Inventor(es): ROALD GUNNAR VAN BORSELEN; ROBERTUS F. HEGGE.

(57) Resumo: MÉTODOS E SISTEMAS PARA INTERPOLAÇÃO DE DADOS SÍSMICOS DE MÚLTIPLOS COMPONENTES COLETADOS EM AMBIENTE MARINHO. A presente invenção refere-se a sistemas e métodos de computação para interpolar um campo de onda de pressão baseado nos dados de campo de onda de pressão e de campo de onda de movimento de partícula. Os campos de ondas de pressão e de movimento de partícula são amostrados em uma taxa de amostra que é menor do que uma ligação inferior para taxas de amostra tipicamente usadas para interpolar o campo de onda de pressão a partir das amostras de campo de onda de pressão sozinhas. O campo de onda de movimento de partícula pode ser um campo de onda de aceleração ou um derivado de tempo de um campo de onda velocidade

Relatório Descritivo da Patente de Invenção para **"MÉTODO PARA GERAR UMA IMAGEM DE UMA FORMAÇÃO SUBTERRÂNEA, SISTEMA PARA GERAR UMA IMAGEM DE UMA FORMAÇÃO SUBTERRÂNEA E MEIO LEGÍVEL POR COMPUTADOR".**

REFERÊNCIA CRUZADA A PEDIDO RELACIONADO

[001] Este pedido reivindica o benefício do Pedido Provisório nº 61/794.947, depositado em 15 de março de 2013.

ANTECEDENTES

[002] Nas últimas décadas, a indústria de petróleo investiu pesadamente no desenvolvimento de técnicas de pesquisa sísmica marinha que rendem conhecimento de formações subterrâneas debaixo de um corpo de água a fim de descobrir e extrair recursos minerais valiosos, tal como petróleo. Imagens sísmicas de alta resolução de uma formação subterrânea são essenciais para a interpretação sísmica quantitativa e monitoramento de reservatório. Para uma pesquisa sísmica marinha típica, um navio de exploração sismológico reboca uma fonte sísmica e o mesmo, ou outro navio, reboca uma ou mais streamers que forma uma superfície de aquisição de dados sísmicos abaixo da superfície da água e acima de uma formação subterrânea para ser pesquisada para depósitos de hidrocarboneto. O navio contém equipamento de aquisição sísmico, tal como controle de navegação, controle de fonte sísmico, controle de receptor sísmico e equipamento de registro. O controle de fonte sísmico ativa a fonte sísmica, que é tipicamente uma série de elementos de fonte, tais como pistolas, para produzir impulsos acústicos em tempos selecionados. Cada impulso acústico é uma onda sonora que percorre para baixo através da água e para dentro da formação subterrânea. Em cada interface entre tipos diferentes de rocha, uma porção da onda sonora é transmitida e outra porção é

refletida de volta em direção ao corpo de água para propagar em direção à superfície. Os streamers rebocados atrás do navio são estruturas semelhantes a cabo alongadas. Cada streamer pode incluir um número de receptores sísmicos ou múltiplos sensores de computador que registram os campos de onda de pressão e de movimento de partícula associados com as ondas sonoras refletidas de volta para dentro da água a partir da formação subterrânea. Os campos de onda de pressão e de movimento de partícula são transmitidos ao longo dos streamers para o vaso de pesquisa onde os campos de onda são armazenados e podem ser processados a bordo do navio de pesquisa usando o equipamento de aquisição. Devido aos campos de onda de pressão e de movimento de partícula serem tipicamente coletados sobre as áreas de pesquisa grandes usando numerosos streamers, cada um equipado com uma grande variedade de receptores, os dados de pressão e de movimento de partícula coletados podem ser extremamente grandes e caros para armazenar e processar. Os que trabalham na indústria de petróleo continuam a buscar métodos e sistemas que reduzem a quantidade total de dados coletados em uma pesquisa marinha enquanto não comprometendo a qualidade dos resultados produzidos a partir de quantidades reduzidas de dados sísmicos.

BREVE DESCRIÇÃO DOS DESENHOS

[003] As figuras 1A-1B mostram vistas em elevação lateral e de topo, respectivamente, de um sistema de aquisição de dados sísmicos marinhos.

[004] A figura 2 mostra uma vista em elevação lateral do sistema de aquisição de dados sísmicos marinhos com uma vista ampliada de um receptor.

[005] A figura 3 mostra caminhos de raios que representam caminhos de uma saída de impulso acústico a partir de uma fonte para

uma interface subterrânea.

[006] As figuras 4A-4C mostram traçados em gráfico de coletores exemplares.

[007] A figura 5 mostra um traçado em gráfico de domínio de tempo de um sinal contínuo dependente de tempo exemplar.

[008] A figura 6 mostra um traçado em gráfico de domínio espectral de um espectro de frequência exemplar.

[009] As figuras 7A-7B mostram eixos horizontais que representam domínios de amostra de frequência e de tempo.

[0010] A figura 8 mostra um traçado em gráfico de três amostras de velocidade exemplares consecutivas.

[0011] A figura 9 mostra um fluxograma de um método para interpolar um campo de onda de pressão no domínio de tempo.

[0012] A figura 10 mostra um exemplo de um sistema de computador generalizado que executa métodos eficazes para interpolar o campo de onda de pressão no domínio de tempo.

DESCRIÇÃO DETALHADA

[0013] Esta descrição apresenta sistemas e métodos de computação para interpolar um campo de onda de pressão baseado em dados de campo de onda de pressão e de campo de onda de movimento de partícula registrados em uma pesquisa sísmica marinha. Os campos de onda de pressão e de movimento de partícula são amostrados a uma taxa simples que é menor do que uma ligação inferior para taxas de amostra tipicamente usadas para interpolar o campo de onda de pressão a partir das amostras de campo de onda de pressão sozinhas. O campo de onda de movimento de partícula pode ser um campo de onda de aceleração ou um derivado de tempo de um campo de onda de velocidade.

Sistemas de Aquisição de Dados Sísmicos Marinhos

[0014] A figura 1A-1B mostram vistas em elevação lateral e de

topo, respectivamente, de um sistema de aquisição de dados sísmicos marinho compostos de um navio de pesquisa sismológico de exploração 102 rebocando uma fonte 104 e seis streamers separados 106-111 debaixo de uma superfície livre 112 de um corpo de água. O corpo de água pode ser uma região de um oceano, um mar, um lago ou um rio. Neste exemplo, cada streamer é anexado a uma extremidade ao navio de pesquisa 102 através de um cabo de transmissão de dados dos streamers. Os streamers 106-111 formam uma superfície de aquisição de receptor horizontal planar com respeito à superfície livre 112. No entanto, na prática, a superfície de aquisição de receptor pode variar suavemente devido às correntes marinhas ativas e às condições do tempo. Em outras palavras, embora os streamers 106-111 sejam ilustrados nas figuras 1A e 1B como sendo retos, na prática, os streamers rebocados podem ondular como um resultado de condições dinâmicas do corpo de água em que os streamers são submergidos. Deve ser notado que uma superfície de aquisição de receptor não é limitada para ter uma orientação horizontal planar com respeito à superfície livre 112. Os streamers podem ser rebocados a profundidades que orientam a superfície de orientação de receptor a um ângulo com respeito à superfície livre 112 ou de forma que um ou mais dos streamers sejam rebocados a profundidades diferentes. Deve ser notado também que uma superfície de aquisição de receptor não é limitada a seis streamers como mostrado na figura 1B. Na prática, o número de receptores usados para formar uma superfície de aquisição de receptor pode estar na faixa de tão poucos quanto um streamer para tanto quanto 20 ou mais streamers.

[0015] A figura 1A inclui um plano x_1x_3 114 e a figura 1B inclui um plano x_1x_2 116 do mesmo sistema de coordenadas cartesianas tendo três eixos de coordenadas espaciais ortogonais. O sistema de coordenadas é usado para especificar orientações e locais de

coordenadas dentro de um corpo de água. A direção x_1 especifica a posição de um ponto em uma direção paralela ao comprimento os streamers e é referida como a direção "em linha". A direção x_2 especifica as posições de um ponto em uma direção perpendicular à direção x_1 e substancialmente paralela à superfície livre 112 e é referida como a direção de "linha transversal". A direção x_3 especifica a posição de um ponto perpendicular ao plano x_1x_2 (isto é, perpendicular à superfície livre 112) com a direção x_3 positiva apontando para baixo longe da superfície livre 112. A profundidade dos streamers abaixo da superfície livre 112 pode ser estimada em vários locais ao longo dos streamers usando dispositivos de medição de profundidade anexada aos streamers. Por exemplo, os dispositivos de medição de profundidade podem medir a pressão hidrostática ou utilizar medições de distância acústicas. Os dispositivos de medição de profundidade podem ser integrados com controladores de profundidade, tais como paravanes ou pipas d'água, que controlam e mantêm a profundidade e a posição dos streamers na medida em que os streamers são rebocados através de um corpo de água. Os dispositivos de medição de profundidade são tipicamente colocados em intervalos (por exemplo, intervalos de cerca de 300 metros) ao longo de cada streamer. Notar que em outras modalidades bóias podem ser usadas para manter a orientação e a profundidade dos streamers abaixo da superfície livre 112.

[0016] Nas figuras 1A-1B, os retângulos sombreados 118 representam receptores ou sensores que são espaçados ao longo do comprimento de cada streamer. Os streamers 106-111 são cabos longos contendo linhas de energia e de transmissão de dados que conectam os receptores 118 a equipamento de aquisição sísmico localizado a bordo do navio de pesquisa 102. Cada receptor pode ser um sensor duplo incluindo um sensor de movimento de partícula que

detecta deslocamento vertical dentro do corpo de água com o passar do tempo detectando movimento de partícula, velocidades ou acelerações, e um sensor de pressão que detecta variações na pressão de água ao longo do tempo.

[0017] A figura 1A mostra uma vista em seção transversal do navio de pesquisa 102 rebocando a fonte 104 e os streamers acima de uma formação subterrânea 120. A curva 122 representa uma superfície da formação subterrânea 120. A formação subterrânea 120 é composta de um número de camadas subterrâneas de sedimento e rocha. As curvas 124, 126 e 128 representam interfaces entre as camadas subterrâneas de composições diferentes. Uma região sombreada 130, ligada ao topo por uma curva 132 e ao fundo por uma curva 134, representa um depósito subterrâneo rico em hidrocarboneto, a profundidade e coordenadas posicionais do qual podem ser determinadas por análise de dados sísmicos coletados durante uma pesquisa sísmica marinha. Como o navio de pesquisa 102 move-se sobre a formação subterrânea 120, a fonte 104 produz um impulso acústico a intervalos especiais e temporais. Em outras modalidades, a fonte 104 pode ser rebocada ou um número de fontes pode ser rebocado por um número de navios diferentes. A fonte 104 pode ser uma pistola de ar, vibrador marinho, ou uma série de pistolas de ar e/ou vibradores marinhos. A figura 1A ilustra um impulso acústico expandindo-se para fora a partir da fonte 104 como um campo de onda de pressão 136 representado por semicírculos de raio crescente centralizados na fonte 104. As frentes de onda são, na verdade, mostrados em seção transversal plana vertical na figura 1A. A porção expandindo-se para fora e para baixo do campo de onda de pressão 136 é denominado o "campo de onda primário", que eventualmente alcança a superfície 122 da formação subterrânea 120, em cujo ponto o comprimento de onda primário é parcialmente refletido a partir da

superfície 122 e parcialmente transmitido para baixo para dentro da formação subterrânea 120, tornando-se ondas elásticas dentro da formação subterrânea 120. Em outras palavras, no corpo de água, o impulso acústico é composto de ondas de pressão de compressão, ou ondas P, enquanto na formação subterrânea 120, as ondas incluem tanto ondas P como ondas transversais, ou ondas S. Dentro da formação subterrânea 120, em cada interface entre tipos diferentes de materiais ou em descontinuidades em densidade ou em um ou mais de várias outras características físicas ou parâmetros, ondas propagando-se para baixo são parcialmente refletidas e parcialmente refratadas. Como um resultado, cada ponto da superfície 122 e cada ponto das interfaces dentro da formação subterrânea 120 subjacente tornam-se uma fonte de ponto secundário potencial a partir da qual a energia de onda acústica e elástica, respectivamente, pode emanar para cima em direção aos receptores 118 em resposta ao impulso acústico gerado pela fonte 104 e ondas elásticas propagando-se para baixo, geradas a partir do impulso de pressão. Como mostrado na figura 1A, ondas secundárias de amplitude significativa são geralmente emitidas a partir de pontos em ou próximos à superfície 122, tal como o ponto 138, e a partir de pontos em ou muito próximos a interfaces na formação subterrânea 120, tais como pontos 140 e 142. Ondas terciárias denominadas "fantasmas receptores" são produzidas por ondas secundárias que são refletidas a partir da superfície livre 112 de volta em direção aos streamers 106-111 e à formação subterrânea 120.

[0018] As ondas secundárias são geralmente emitidas em tempos diferentes dentro de uma faixa de tempos seguindo o impulso acústico inicial. Um ponto na superfície 122, tal como o ponto 138, recebe um distúrbio de pressão correspondendo ao impulso acústico inicial mais rapidamente do que um ponto dentro da formação subterrânea 120,

tais como pontos 140 e 142. Similarmente, um ponto sobre a superfície 122 diretamente debaixo da fonte 104 recebe o impulso acústico mais cedo do que um ponto estando mais distante sobre a superfície 122. Assim, os tempos em que ondas de ordem secundária ou mais alta são emitidas a partir de vários pontos dentro da formação subterrânea 120 são relacionados à distância, no espaço tridimensional, dos pontos a partir da fonte 104.

[0019] As ondas acústicas e elásticas, no entanto, percorrem em velocidades diferentes dentro de materiais diferentes bem como dentro do mesmo material sob pressões diferentes. Portanto, os tempos de percurso do comprimento de onda primário e do comprimento de onda secundário emitidos em resposta ao primeiro comprimento de onda são funções de distância a partir da fonte 104 bem como os materiais e características físicas dos materiais através dos quais a primeira onda percorre. Além disso, as frentes de onda em expansão secundárias podem ser alteradas uma vez que as frentes de onda cruzam as interfaces e uma vez que a velocidade do som varia nos meios que são atravessados pela onda. A sobreposição de ondas emitidas dentro da formação subterrânea 120 em resposta ao campo de onda primário é um comprimento de onda geralmente complicado que inclui informação sobre as formas, tamanhos e características de materiais da formação subterrânea 120, incluindo informação sobre as formas, tamanhos e localizações dos vários aspectos refletindo dentro da formação subterrânea 120 de interesse para explorações sismológicas.

[0020] A figura 2 mostra uma vista em elevação lateral do sistema de aquisição de dados sísmicos marinhos com uma vista ampliada 202 do receptor 118. A vista ampliada 202 revela que o receptor 118 pode ser um sensor de múltiplos componentes composto de um sensor de pressão 204 e três sensores de movimento de partícula 206. O sensor

de pressão pode ser um hidrofone. O sensor de pressão 204 mede as trocas de pressão ao longo do tempo e registra dados de campo de onda de pressão indicados por $P(\vec{x}_r, t)$, onde o subscrito *r* é um índice de receptor, $\vec{x}_r$ são as coordenadas do receptor, e *t* representa tempo. Os sensores de movimento 206 são receptivos ao movimento de água em direções diferentes. Por exemplo, como mostrado na vista ampliada 202, três sensores de movimento de partícula 206 são colocados no streamer 109 com o sensor de pressão 204 para registrar campos de onda de movimento de partícula nas direções x_1-, x_2- e x_3-. Os sensores de movimento de partícula podem ser receptivos ao deslocamento das partículas, à velocidade das partículas ou à aceleração das partículas na água. Por exemplo, quando os sensores de movimento 206 são receptivos à posição, os dados de sensor de movimento podem ser diferenciados para obter dados de campo de onda de velocidade, e quando os sensores de movimento são receptivos à aceleração (isto é, acelerômetros MEMS), os dados de aceleração de partícula podem ser integrados para obter dados de campo de onda de velocidade. No exemplo da figura 2, os dados de campo de onda resultantes produzidos pelos sensores de movimento 206 são campos de onda de velocidade ortogonais indicados por $V_{x1}(\vec{x}_r, t), V_{x2}(\vec{x}_r, t)\ e\ V_{x3}(\vec{x}_r, t)$, que correspondem a campos de onda de velocidade de movimento de partícula nas direções x_1-, x_2- e x_3-, respectivamente, no receptor *r* e são indicados coletivamente por $(V_{x1}, V_{x2}, V_{x3})_r$. Os streamers 106-111 e o navio de pesquisa 102 podem incluir eletrônica de sensoriamento e instalações de processamento de dados que permitem que medições de cada receptor sejam correlacionadas com posições absolutas na superfície livre 112 e posições tridimensionais absolutas com respeito a um sistema de coordenadas tridimensional arbitrário. Os dados de pressão e os dados de movimento de partícula representam campos de onda de

pressão e de movimento de partícula.

[0021] Na figura 2, a seta direcional 208 representa a direção de um campo de onda indo para cima, detectado por um receptor 210, e setas tracejadas 212 representam um campo de onda indo para baixo produzido pela reflexão de campo de onda indo para cima a partir da superfície livre 112 antes de alcançar o receptor 210. Em outras palavras, o campo de onda de pressão $P(\vec{x}_r, t)$ medido em um receptor é composto de um componente de campo de onda de pressão indo para cima e um componente de campo de onda de pressão indo para baixo, e o componente x_3- ou campo de onda de velocidade vertical $V_{x3}(\vec{x}_r, t)$ medido em um sensor de movimento de partícula é composto de um componente de campo de onda de velocidade indo para cima e um componente de campo de onda de velocidade indo para baixo. O campo de onda indo para baixo é denominado um fantasma receptor que contamina os dados de velocidade de pressão e de movimento de partícula e cria chanfros no domínio espectral. A filtragem é feita para remover os campos de onda indo para cima a partir dos dados de velocidade de pressão e de movimento de partícula deixando os campos de onda indo para cima que são usados para gerar imagens da formação subterrânea.

[0022] Cada sensor de pressão e de movimento de partícula gera dados sísmicos na forma de uma série de tempo que consiste de um número de valores medidos consecutivos denominados amplitudes separadas no tempo por um período de amostra. A série de tempo registrada por um sensor de pressão ou de movimento é denominada um "traço", que pode consistir em milhares de amostras com uma taxa de amostra de cerca de 1 a 5 amostras/ms. Um traço é um registro de uma resposta da formação subterrânea à energia acústica que passa a partir da fonte 104, através de camadas subterrâneas, e é por último registrado por um sensor. Um traço registra variações em uma

amplitude dependente de tempo que representa energia acústica na porção do campo de onda secundário medida pelo sensor. Um campo de onda secundário tipicamente chega primeiro nos receptores localizados mais próximos da fonte 104. A distância a partir da fonte 104 para um receptor é denominada o deslocamento de fonte-receptor, que cria um retardo no tempo de chegada de um campo de onda secundário a partir de uma interface substancialmente horizontal dentro da formação subterrânea.

[0023] A figura 3 mostra os caminhos de raios 301-305 que representam caminhos de um impulso acústico 300 produzido a partir da fonte 104 para a interface 124. Os raios 306-310 representam os caminhos de energia acústica refletidos a partir da interface 124 (isto é, campos de ondas secundários) para os receptores localizados ao longo do streamer 109. Cada sensor de pressão mede o campo de onda de pressão $P(\vec{x}_r, t)$ e os sensores de movimento em cada receptor medem os campos de onda de velocidade de movimento de partícula $V_{x1}(\vec{x}_r, t), V_{x2}(\vec{x}_r, t)\ e\ V_{x3}(\vec{x}_r, t)$ da energia acústica refletida a partir da interface 124. O campo de onda de pressão $P(\vec{x}_r, t)$ e os campos de onda de velocidade $(V_{x1}, V_{x2}, V_{x3})_r$ medidos em cada receptor *r* são amostrados no tempo como em maior detalhe abaixo, e registrados como quatro traços separados. Um número de traços juntos tanto a partir do mesmo streamer ou através os streamers pode ser usado para formar um colhedor, que representa uma porção de um campo de onda medido. Por exemplo, os traços associados com o campo de onda de pressão $P(\vec{x}_r, t)$ medido nos cinco sensores de pressão localizados ao longo do streamer 109 podem ser usados para formar um colhedor de receptor de lançamento que representa um campo de onda de pressão em linha, e os traços associados com o campo de onda de velocidade $V_{x3}(\vec{x}_r, t)$ medido nos cinco sensores de movimento de partícula localizados ao longo do streamer 109 podem

ser usados para formar um colhedor de receptor de lançamento que representa um campo de onda de velocidade vertical. Outros tipos de colhedores podem ser formados a partir da pressão e da velocidade incluindo colhedores de receptor comuns e colhedores de ponto médio comum.

[0024] A figura 4A mostra um traçado em gráfico de um colhedor de fontereceptor de traços exemplares 401-405 da energia acústica refletida a partir da interface 124 e registrada pelos cinco receptores localizados ao longo do streamer 109 mostrado na figura 3. O eixo vertical 406 representa tempo e eixo horizontal 408 representa números d traços com o traço "1" representando os dados sísmicos gerados pelo receptor localizado mais próximo da fonte 104 e o traço "5" representando os dados sísmicos gerados pelo receptor localizado Laís afastado a partir da fonte 104. Os traços 401-405 podem representar variação na amplitude do campo de onda de pressão $P(\vec{x}_r, t)$ ou variação na amplitude de qualquer um dos componentes de campo de onda de velocidade $V_{x1}(\tilde{x}_r, t), V_{x2}(\tilde{x}_r, t), e\ V_{x3}(\tilde{x}_r, t)$. Os traços exemplares incluem pequenas ondas ou pulsos 410-414 que representam a energia acústica refletia a partir da interface 124. Picos, coloridos de preto, e canaletas de cada traço representam trocas na amplitude medida pelos sensores de pressão ou sensores de movimento. As distâncias ao longo dos traços 401-405 a partir do eixo 408 de número de traço para as pequenas ondas 410-414 representam o tempo de percurso da energia acústica produzida a partir da fonte 104 para a interface 124 e por último para os receptores. A amplitude do pico ou canaleta das pequenas ondas 410-414 indica a magnitude da energia acústica registrada pelo sensor de pressão ou sensor de movimento. Notar que os tempos de chegada versus deslocamento de fonte-receptor são mais longos com o deslocamento de fonte-receptor e, neste exemplo, tem uma forma

hiperbólica 416.

[0025] Os traços de pares de fonte-receptor diferentes podem ser corrigidos durante o processamento de dados sísmicos para remover os efeitos de deslocamentos de fonte-receptor diferentes em um processo denominado "saída normal" ("NMO"). A figura 4B mostra um colhedor dos traços 410-414 após NMO ter sido aplicado para alinhar os pulsos no tempo como representado pela linha horizontal 418. Após as correções de NMO, traços de registros de lançamento diferentes com um ponto de reflexão comum podem ser empilhados para formar um traço único durante processamento de dados sísmicos. O empilhamento melhora a relação de sinal para ruído, reduz o ruído, melhora a qualidade de dados sísmicos, e reduz a quantidade de dados.

[0026] Um traço típico não representa uma reflexão única de uma interface única como representado nas figuras 4A-4B. Na prática, um traço representa a amplitude dependente de tempo de energia acústica associada com numerosas reflexões de energia acústica de dentro da formação subterrânea. A figura 4C mostra um colhedor de 15 traços registrados durante um período de tempo. Cada traço, tal como o traço 420, varia em amplitude ao longo do tempo e representa a energia acústica refletida a partir de um número de interfaces diferentes dentro de uma formação subterrânea como medido por um sensor de pressão ou um sensor de movimento. O colhedor mostrado na figura 4C pode representar um campo de onda de pressão ou um campo de onda de velocidade e pode ser um colhedor de fonte-receptor, um colhedor de receptor comum, ou colhedor de ponto médio comum.

Sistemas e Métodos para Interpolação Dependente de Tempo

[0027] A figura 5 mostra um traçado em gráfico de domínio de tempo de um sinal continuo dependente de tempo exemplar indicado

por *x(t)*. O eixo horizontal 502 representa tempo indicado por *t*, o eixo vertical 504 representa a amplitude de sinal, e a curva 506 representa o sinal *x(t)*. O sinal *x(t)* pode representar variações dependentes de tempo no campo de onda de pressão *P(t)*, no campo de onda de movimento de partícula, ou variações dependentes de tempo nos campos de onda de velocidade $V_{x1}(t)$, $V_{x2}(t)$, e $V_{x3}(t)$ medidos em um receptor *r*, onde na seguinte descrição as coordenadas de receptor $\vec{x}_r$ são suprimidas. O sinal *x(t)* é tipicamente amostrado e registrado em tempos espaçados regularmente separados por intervalos de tempo denominados "períodos de amostra" indicados por T_s. A figura 5 inclui uma vista ampliada 508 de um segmento do sinal *x(t)*. A linha tracejada 510 representa o sinal contínuo *x(t)* e os pontos sólidos 512 representam a amplitude do sinal *x(t)* registrado a intervalos de tempo espaçados regularmente iguais ao período de amostra T_s. O recíproco ou inverso do período de amostra T_s é a taxa de amostra ou frequência de amostra indicada por f_s (isto é, $f_s = 1/T_s$), que é o número de amostras registradas por unidade de tempo do sinal contínuo *x(t)* para formar um sinal discreto indicado por $x(nT_s)$, onde *n* é um índice de amostra de tempo completo. A notação $x(nT_s)$ também pode ser usada para representar as amostras compreendendo o sinal discreto. Por exemplo, a vista ampliada 508 inclui amostras de tempo $x((n-1)T_s)$, $x(nT_s)$ e $x((n+1)T_s)$ que são registradas em tempos espaçados regularmente $(n-1)T_s$, nT_s e $(n+1)T_s$ separados pelo menos período de amostra T_s. Devido ao sinal discreto $x(nT_s)$ poder representar um comprimento de onda de pressão de amostra de tempo registrado por um sensor de pressão ou comprimento de onda de velocidade registrado por um sensor de movimento, o sinal discreto $x(nT_s)$ é um traço como descrito acima.

[0028] O sinal *x(t)* é limitado na banda eficazmente devido a vários fatores ambientes, fatores de fonte e de registro que limitam o

conteúdo de frequência do sinal. O sinal *x(t)* é denominado limitado na banda *B* quando sua energia associada é finita e sua transformada de Fourier *X(ω)* desaparece fora do intervalo *(-B, B)*:

$$X(\omega) = 0, \text{ para } |\omega| \geq B \quad (1)$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} |x(t)|^2 \, dt = \frac{1}{2\pi} \int_{-B}^{B} |X(\omega)|^2 \, d\omega < \infty \quad (2)$$

[0029] Em outras palavras, o sinal *x(t)* e sua transformada de Fourier X(ω) são funções retangulares integráveis com uma transformada de Fourier inversa.

$$x(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-B}^{B} X(\omega) e^{j\omega t} \, d\omega \quad (3)$$

[0030] O limite de banda de um traço é revelado quando o traço é transportado ao domínio espectral. Por exemplo, uma transformação Fourier ("FT") pode ser usada para transportar o traço $x(nT_s)$ ao domínio espectral:

$$x(nT_s) \underset{\rightarrow}{FT} X(\omega_k) \quad (4)$$

onde

$X(\omega_k)$ é o espectro de frequência de $x(nT_s)$;

$\omega_k = fk$ é a amostra de frequência *kth*;

k é um índice de amostra de frequência completo;

$f = 2\pi/NT_s$ é o intervalo de amostragem de frequência; e

N é o número de amostras de tempo ou de frequência.

[0031] Na prática, uma transformada de Fourier rápida ("FFT") pode ser usada para eficácia e velocidade computacionais. A figura 6 mostra um traçado em gráfico de domínio espectral de um espectro de frequência exemplar resultante do transporte do traço $x(nT_s)$ representado na figura 5 para o domínio espectral. O eixo horizontal 602 representa a amplitude espectral, e a curva 606 dentada representa o espectro de frequência limitado na banda *B* $X(\omega_k)$ do traço $x(nT_s)$. O ponto *B* ao longo do eixo de frequência 602 representa uma frequência finita além da qual o espectro $X(\omega_k)$ é essencialmente

zero. Qualquer sinal que tem uma transformação Fourier, ou espectro de frequência, que é essencialmente zero para frequências maiores do que uma frequência finita *B* é denominado "limitado na banda" e a frequência *B* é denominada o "limite de banda".

[0032] O sinal *x(t)* pode ser interpolado ou reconstruído a partir de suas amostras $x(nT_s)$ quando cada amostra é considerada como especificando a escalação e localização de uma função de sincronização. Em outras palavras, a partir da teoria de amostragem, a interpolação pode ser usada para interpolar o sinal *x(t)* em termos de amostra de tempo $x(nT_s)$ como a seguir:

$$x(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty}[x(nT_s)sinc\,(B(t-nT_s))] \qquad (5)$$

onde

$T_s = \pi/B$; e

$$sinc(B(t-nT_s)) = \frac{sen\,B(t-nT_s)}{B(t-nT_s)}$$

[0033] A equação (5) é denominada "o teorema de amostragem". A fim de evitar aliasing temporal (isto é, perder informação de sinal como um resultado de amostragem), o sinal *x(t)* deve ser limitado na banda para menos do que a metade da taxa de amostra f_s. Em outras palavras, pode não haver nenhuma energia no sinal *x(t)* em frequências maiores do que $f_N/2$, que é a frequência limitada na banda *B* (isto é, $B = f_N/2$) e f_N é a taxa de amostra mínima denominada "taxa Nyquist". Portanto, contanto que a taxa de amostra f_s seja maior do que ou igual à taxa Nyquist, $f_N = 2N$, do sinal *x(t)* pode ser interpolado a partir das amostras $x(nT_s)$ usando a equação (5). A taxa Nyquist f_N é uma ligação inferior na taxa de amostra f_s para evitar aliasing temporal.

[0034] Um sinal também pode ser interpolado em taxas de amostra aproximando-se a metade da taxa Nyquist quando as amostras e os derivados de tempo das amostras são conhecidos usando:

$$x(t) = 4\,sen^2\left(\frac{Bt}{2}\right)\sum_{n=-\infty}^{\infty}\left[\frac{x(nT)}{(Bt-2n\pi)^2} + \frac{\partial_t x(nT)}{B(Bt-2n\pi)}\right] \quad (6)$$

onde

∂_t representa o derivado de tempo; e

$T = 2\pi/B$.

[0035] Em outras palavras, dado as amostras $x(nT)$ e seus derivados de tempo associados $\partial_t x(nT)$, o sinal $x(t)$ pode ser interpolado usando a equação (6) com uma taxa de amostra maior do que ou igual à metade da taxa Nyquist (isto é, $f_N/2$).

[0036] A figura 7A mostra um eixo horizontal 702 que representa frequências maiores do que zero, e a figura 7B mostra um eixo horizontal 704 que representa tempo maior do que zero. A seta direcional tracejada 706 representa taxas de amostra que são maiores do que ou iguais à taxa Nyquist, f_N, e a seta direcional tracejada 708 representa períodos de amostra correspondentes entre zero e um período Nyquist indicado por $T_N = 1/f_N$. O sinal $x(t)$ pode ser interpolado usando a equação (5) apenas com as amostras $x(nT_s)$ produzidas a uma taxa de amostra f_s maior do que a taxa Nyquist e períodos de amostra T_s que estão entre zero e o período Nyquist T_N. A seta direcional com pontilhada-tracejada 710 representa taxas de amostra f_R que são maiores do que ou igual à metade da taxa Nyquist, $f_N/2$, e a seta direcional pontilhada-tracejada 712 representa os períodos de amostra T correspondentes entre zero e duas vezes o período Nyquist T_N. Neste caso, o sinal $x(t)$ pode ser interpolado usando a equação (6) com amostras $x(nT)$ e derivados de tempo das amostras $\partial_t x(nT)$ a uma taxa de amostra f_R maior do que $f_N/2$ (isto é, $f_R > f_N/2$). Em outras palavras, a equação (6) permite a reconstrução do sinal $x(t)$ com amostras $x(nT)$ e derivados de tempo das amostras $\partial_t x(nT)$ registrados a uma taxa de amostra f_R entre $f_N/2$ e f_N (isto é, $f_N > f_R > fN/2$) e período de amostra T entre T_N e $2T_N$ (isto é, $T_N < T < 2T_N$).

[0037] As figuras 7A-7B ilustram como a equação (6) pode ser

usada para reduzir o número de amostras para menos do que o número de amostras registradas com uma taxa de amostra típica usada para registrar dados sísmicos com a condição de que os dados de amostra e o derivado de tempo dos dados de amostra sejam conhecidos. Por exemplo, supõe-se que a taxa Nyquist para registrar um campo de onda de pressão *P(t)* seja cerca de 3,5 amostras/ms. A fim de evitar aliasing temporal no traço $P(nT_s)$, uma taxa de amostra típica de cerca de 4 amostras/ms pode ser usada e o campo de onda de pressão P(t) pode ser interpolado a partir apenas das amostras de pressão $P(nT_s)$ usando a equação (5). Em contraste, de acordo com a equação (6), a taxa de amostra pode ser reduzida para uma taxa de amostra maior do que a metade da taxa Nyquist de 1,75 Hz, e o sinal de pressão *P(t)* pode ser interpolado com a condição de que as amostras de pressão *P(nT)* e os derivados de tempo das amostras de pressão $\partial_t P(nT)$ sejam conhecidos para cada amostra de tempo. Em outras palavras, a equação (6) possibilita a interpolação de um campo de onda de pressão dependente de tempo com cerca da metade do número de amostras tipicamente usadas para registrar dados de pressão, com a condição de que as amostras de pressão e os derivados de tempo correspondentes das amostras de pressão sejam registrados para cada amostra de tempo.

[0038] Os derivados de tempo do campo de onda de pressão podem ser calculados a partir de campos de onda de velocidade. Considera-se as equações de onda básicas, que compreendem a equação de movimento e a equação de deformação, respectivamente, dadas por:

$$\partial_j P(t) + \rho \partial_t V_j(t) = f_j \quad (7a)$$

$$\sum_{j=1}^{3} \partial_j V_j(t) + k \partial_t P(t) = q \quad (7b)$$

onde

P(t) é o campo de onda de pressão medido em um receptor

r;

o subscrito j representa direções espaciais ortogonais x_1, x_2 ou x_3;

$V_j(t)$ é o campo de onda de velocidade medido no receptor *r* na direção espacial j;

ρ é a densidade de um volume de água no qual o receptor *r* é submergido;

k é a capacidade de compressão da água;

q é a densidade da fonte de volume da taxa de injeção; e

f_j é a densidade da fonte de volume de força de volume na direção espacial x_j.

[0039] Quando o volume de água é sem fontes, $q = 0$ e $f_j = 0$ nas equações (7a) e (7b), e o derivado de tempo do campo de onda de pressão *P(t)* pode ser expresso em termos da divergência do campo de onda de velocidade usando a equação (7b) como a seguir:

$$\partial_t P(t) = \kappa^{-1} \sum_{j=1}^{3} \partial_j V_j(t) \qquad (8)$$

[0040] A partir da equação (7b), o derivado de tempo do campo de onda de pressão também pode ser expresso em termos do campo de onda de velocidade como a seguir:

$$\partial_t P(t) = \frac{\partial P(t)}{\partial t} = \sum_{j=1}^{3} \frac{\partial j}{\partial t} \frac{\partial P(t)}{\partial j} = \sum_{j=1}^{3} \frac{\partial j}{\partial t} \partial_j P(t) = \sum_{j=1}^{3} \frac{\partial j}{\partial t} \left(-\rho \partial_t V_j(t) \right) \quad (9).$$

[0041] As medições de *P(t)* e $V_j(t)$ são registradas por sensores em um streamer com propriedades conhecidas que pode ser considerada como um meio não variante de tempo localmente homogêneo, ou é arrastada através de uma camada de água com propriedades similares que são conhecidas, ou pode ser medida independentemente. O derivado de tempo $\partial j/\partial t$ na equação (9) na equação (9) é proporcional à velocidade do som na água *c*, que é dada por $c = (\rho\kappa)^{-1/2}$. Como um resultado, a partir da equação (9), o derivado de tempo da pressão em um meio homogêneo reduz para:

$$\partial_t P(t) \cong -c\rho \sum_{j=1}^{3} \partial_t V_j(t) \qquad (10)$$

[0042] Em outras palavras, quando as amostras de velocidade de múltiplos componentes $V_{x1}(nT)$, $V_{x2}(nT)$ e $V_{x3}(nT)$ e as amostras de pressão $P(nT)$ são conhecidas para um receptor *r*, uma expressão para interpolar o campo de onda de pressão no receptor *r* pode ser obtida substituindo a equação (10) pela equação (6) para dar:

$$P(t) \cong 4\sin^2\left(\frac{Bt}{2}\right)\sum_{n=-\infty}^{\infty}\left[\frac{P(nT)}{(Bt-2n\pi)^2}-\frac{c\rho\sum_{j=1}^{3}\partial_t V_j(nT)}{B(Bt-2n\pi)}\right] \quad (11)$$

onde

$0 < T \leq 2T_N$; e

a mesma frequência de amostras $f_R \geq f_N/2$ é usada para amostrar o campo de onda de pressão e o campo de onda de velocidade vertical.

[0043] Tipicamente, os dados de reflexão sísmicos de interesse são os campos de onda percorrendo para cima ou verticalmente (isto é, direção x_3). Como um resultado, o derivado de tempo do campo de onda de pressão na equação (10) pode ser aproximado por:

$$\partial_t P(t) \cong -c\rho\partial_t V_3(t) + n_h \quad (12)$$

onde n_h representa ruído que depende dos componentes de velocidade de partícula horizontais $V_{x1}(t)$ e $V_{x2}(t)$.

[0044] Quando o ruído n_h é pequeno (isto é, $n_h << 1$), o campo de onda de pressão P(t) pode ser interpolado substituindo a equação (2) pela equação (6) para obter:

$$P(t) \cong 4\,\mathrm{sen}^2\left(\frac{Bt}{2}\right)\sum_{n=-\infty}^{\infty}\left[\frac{P(nT)}{(Bt-2n\pi)^2}-\frac{c\rho\partial_t V_3(nT)}{B(Bt-2n\pi)}\right] \quad (13)$$

onde

$0 < T \leq 2T_N$; e

a mesma frequência de amostra $f_R \geq f_N/2$ é usada para amostrar o campo de onda de pressão e o campo de onda de velocidade vertical.

[0045] Como mostrado acima, a equação (11) depende de derivados de tempo das velocidades $V_1(nT)$, $V_2(nT)$ e $V_3(nT)$ e a equação (13) depende de derivados de tempo da velocidade $V_3(nT)$,

que são acelerações de movimento de partícula. Por exemplo, o derivado de tempo da velocidade vertical, $\partial_t V_3(nT)$, também é a aceleração de movimento de partícula dada por $\alpha_3(nT) = \partial_t V_3(nT)$. A aceleração de movimento de partícula pode ser determinada de várias formas. Por exemplo, os sensores de movimento de partícula implantados nos receptores podem ser acelerômetros MEMS que produzem a aceleração amostrada $\alpha_3(nT)$, que é amostrada substancialmente na mesma taxa de amostra f_R como o campo de onda de pressão. Alternativamente, a aceleração pode ser calculada a partir do declive das amostras de velocidade vertical registradas circundando a amostra $V_3(nT)$. A figura 8 mostra um traçado em gráfico de três amostras de velocidade vertical exemplares, consecutivas. O eixo horizontal 802 representa tempo, o eixo vertical 804 representa velocidade, e os pontos sombreados 806-808 representam amostras de velocidade vertical $V_3((n-1)T)$, $V_3(nT)$ e $V_3((n-1)T)$, respectivamente. A aceleração α_3(nT) na amostra de tempo nT é o declive de uma linha tangente 810 no ponto 807. A aceleração $\alpha_3(nT)$ pode ser aproximada a partir das amostras de velocidade vertical vizinhas $V_3((n-1)T$, $V_3(nT)$ e $V_3((n+1)T$ como a seguir:

$$a_3(nT) \cong \frac{V_3((n+1)T) - V_3((n-1)T)}{2T} \quad (14a)$$

$$a_3(nT) \cong \frac{V_3((n+1)T) - V_3(nT)}{T} \quad (14b)$$

$$a_3(nT) \cong \frac{V_3(nT) - V_3((n-1)T)}{T} \quad (14c)$$

[0046] As acelerações nas equações (14a)-(14c) são representadas pelos declives de linhas pontilhadas 812-814, respectivamente. Equações similares podem ser usadas para calcular as acelerações aproximadas α_1(nT) e α_2(nT) nas direções em linha e em linha transversal na equação (11).

[0047] A figura 9 mostra um fluxograma de um método para interpolar um campo de onda de pressão no domínio de tempo. No

bloco 901, as amostras de campo de onda *P(nT)* amostradas com uma taxa de amostra f_R maior do que ou igual à metade de taxa Nyquist f_N são recebidas. As amostras *P(nT)* podem ser sensores de pressão localizados em um receptor *r* ao longo de um streamer rebocado por um navio de pesquisa como descrito acima. No bloco 902, um ou mais campos de onda de movimento de partícula que são amostrados à taxa de amostra f_R são recebidos. Os campos de onda de movimento de partícula são registrados pelos sensores de movimento de partícula colocados com o sensor de pressão. Quando o sensores de movimento são receptivos à posição, os campos de onda de movimento de partícula podem ser diferenciados para converter os dados de campo de onda em campos de onda de velocidade $V_1(nT)$, $V_2(nT)$ e $V_3(nT)$, e quando os sensores de movimento são receptivos à aceleração (isto é, acelerômetros MEMS), os campos de onda de movimento de partícula são campos de onda de aceleração α_{x1} (nT), α_{x1} (nT), e α_{x3} (nT). No bloco 903, quando os campos de onda de movimento de partícula são campos de onda de aceleração, o fluxo de controle para o bloco 904, de outro modo, fluxos de controle para o bloco 905. No bloco 905, os campos de onda de aceleração são calculados a partir de campos de onda de velocidade como descrito acima com referência às equações (14a)-(14c). No bloco 904, um derivado de tempo para a amostra de pressão $\partial_t P(nT)$ é calculado de acordo com a equação (10) ou equação (12). No bloco 905, o campo de onda de pressão é interpolado a partir das amostras de pressão *P(nT)* e os derivados de tempo aproximados para a amostra de pressão $\partial_t P(nT)$ usando a equação (11) ou a equação (12).

[0048] A figura 10 mostra um exemplo de um sistema de computador generalizado que executa métodos eficazes para interpolar o campo de onda de pressão no domínio de tempo e, portanto, representa um sistema de processamento de dados de

análise geofísica. Os componentes internos de sistemas de computador muito pequenos, de tamanho médio e grande bem como sistemas de armazenamento baseados em processador especializados podem ser descritos com respeito a esta arquitetura generalizada, embora cada sistema particular possa apresentar muitos componentes adicionais, subsistemas e similares, sistemas paralelos e arquiteturas similares a esta arquitetura generalizada. O sistema de computador contém uma ou múltiplas unidades de processamento centrais ("CPUs") 1002-1005, uma ou mais memórias eletrônicas 1008 interconectadas com as CPUs por uma CPU/barramento de subsistema de memória 1010 ou múltiplos barramentos, uma primeira ponte 1012 que interconecta a CPU/barramento de subsistema de memória 1010 com barramentos adicionais 1014 e 1016, ou outros tipos de meios de interconexão em alta velocidade, incluindo múltiplas interconexões em série em alta velocidade. Os barramentos ou interconexões em série, por sua vez, conectam as CPUs e a memória com processadores especializados, tal como um processador de gráficos 1018 e com uma ou mais pontes adicionais 1020, que são interconectadas com links em série de alta velocidade ou com múltiplos controladores 1022-1027, tal como o controlador 1027, que proveem acesso a vários tipos diferentes de meios legíveis por computador, tal como meio legível por computador 1028, monitores eletrônicos, dispositivos de entrada, e outros de tais componentes, subcomponentes e recursos computacionais. Os monitores eletrônicos, incluindo tela de monitor visual, alto falantes de áudio, e outras interfaces de saída, e os dispositivos de entrada, incluindo mouses, teclados, telas de toque, e outras de tais interfaces de entrada, juntas constituem interfaces de entrada e de saída que permitem ao sistema de computador interagir com usuários humanos. O meio legível por computador 1028 é um dispositivo de

armazenamento de dados, incluindo memória eletrônica, unidade de disco óptico ou magnético, unidade USB, memória flash e outro dispositivo de armazenamento de dados. O meio legível por computador 1028 pode ser usado para armazenar instruções legíveis por máquina que codificam os métodos de computação descritos acima e pode ser usado para armazenar dados codificados, durante operações de armazenamento, e de quais dados codificados podem ser recuperados, durante operações de leitura, por sistemas de computador, sistemas de armazenamento de dados e dispositivos periféricos.

[0049] As modalidades descritas acima não são destinadas a ser limitadas às descrições acima. Por exemplo, qualquer número de implementações de método de processamento computacional diferentes que realizam os métodos de interpolação descritos acima pode ser projetado e desenvolvido usando várias linguagens de programação diferentes e plataformas de computador e variando os parâmetros de implementação diferentes, incluindo estruturas de controle, variáveis, estruturas de dados, organização modular, e outros de tais parâmetros. As representações computacionais de campos de onda, operadores e outros objetos de computação podem ser implementados de formas diferentes. Os sistemas e métodos para interpolar dados sísmicos podem ser executados em tempo quase real enquanto conduzindo uma pesquisa marinha de uma formação subterrânea. O termo "quase em tempo real" refere-se a um retardo de tempo devido à transmissão de dados e processamento de dados que são curtos o suficiente para permitir o uso oportuno dos dados processados durante mais aquisição de dados. Por exemplo, tempo quase real pode se referir a uma situação em que o retardo de tempo devido à transmissão e processamento é insignificante. Em outras palavras, tempo quase real aproxima-se de tempo real quando o

tempo para transmissão de dados e processamento de dados parece imperceptível. Tempo quase real também pode se referir a um retardo de tempo perceptível para transmissão de dados e processamento de dados, mas o retardo de tempo não é tão longo que a qualidade de controle não possa ser executada.

[0050] É apreciado que a descrição anterior das modalidades descritas é provida para capacitar qualquer versado na técnica a fazer ou usar a presente descrição. Várias modificações para estas modalidades serão prontamente evidentes aos versados na técnica, e os princípios genéricos definidos no presente documento podem ser aplicados a outras modalidades sem sair do espírito ou escopo da descrição. Assim, a presente descrição não é destinada a ser limitada às modalidades mostradas no presente documento, mas deve estar de acordo com o escopo mais amplo consistente com os princípios e novos aspectos descritos no presente documento.

REIVINDICAÇÕES

1. Método para gerar uma imagem de uma formação subterrânea, usando um computador programável programado para pelo menos realizar as operações **caracterizadas por**:

registrar amostras de campo de onda de pressão de um campo de onda de pressão medido com sensor de pressão a uma taxa de amostra entre uma taxa de Nyquist e uma metade da taxa de Nyquist (901);

registrar amostras de campo de onda de aceleração de um campo de onda de movimento de partícula com sensores de movimento de partícula à taxa de amostra (902);

interpolar um campo de onda de pressão no domínio o tempo baseado nas amostras de campo de onda de pressão e nas amostras de campo de onda de aceleração (906);

filtrar o campo de onda de pressão e o campo de ondas de pressão interpolado para obter um campo de onda de pressão indo para cima; e

gerar uma imagem de uma formação subterrânea baseada, pelo menos em parte, no campo de ondas de pressão indo para cima.

2. Método de acordo com a reivindicação 1, **caracterizado pelo fato de** que a metade da taxa Nyquist é um limite inferior para amostras de campo de onda de pressão sozinhas.

3. Método de acordo com a reivindicação 2, **caracterizado pelo fato de** que a taxa de amostra é menor do que a taxa Nyquist e é maior do que uma metade da taxa Nyquist.

4. Método de acordo com a reivindicação 1, **caracterizado pelo fato de** que ainda compreende calcular as amostras de campo de ondas de aceleração como derivadas de tempo das amostras de campo de onda de velocidade vertical de um campo de ondas de velocidade vertical medido com um sensor de movimento de partículas

amostrado na taxa de amostra.

5. Método de acordo com a reivindicação 1, **caracterizado pelo fato de** que a interpolação do campo de onda de pressão no domínio do tempo compreende interpolar o campo de onda de pressão como uma função das amostras de campo de onda de pressão e derivadas de tempo das amostras de campo de onda de velocidade vertical, em que as derivadas de tempo das amostras de campo de onda de velocidade vertical são amostras de campo de onda de aceleração.

6. Método de acordo com a reivindicação 1, **caracterizado pelo fato de** que o sensor de pressão e o sensor de movimento de partícula são colocados em um streamer.

7. Sistema para gerar uma imagem de uma formação subterrânea, em que o sistema compreende:

um ou mais processadores;

um ou mais dispositivos de armazenamento de dados; e

uma rotina armazenada em um ou mais do um ou mais dispositivos de armazenamento de dados e executada pelo um ou mais processadores para executar operações **caracterizadas por**:

recuperar amostras de campo de onda de pressão registradas no um ou mais dispositivos de armazenamento de dados em uma taxa de amostra entre uma taxa de Nyquist e uma metade da taxa de Nyquist (901);

recuperar amostras de campo de onda de aceleração registrados no um ou mais dispositivos de armazenamento de dados na taxa de amostra (902);

interpolar um campo de onda de pressão em um domínio do tempo baseado nas amostras de campo de onda de pressão e nas amostras de campo de onda de aceleração (906); e

filtrar o campo de onda de pressão e o campo de ondas de

pressão interpolado para obter um campo de onda de pressão indo para cima; e

gerar uma imagem de uma formação subterrânea baseada, pelo menos em parte, no campo de ondas de pressão indo para cima.

8. Sistema de acordo com a reivindicação 7, **caracterizado pelo fato de** que uma metade da taxa Nyquist é um limite inferior para amostras de campo de onda de pressão sozinhas.

9. Sistema de acordo com a reivindicação8, **caracterizado pelo fato de** que a taxa de amostra é menor do que a taxa Nyquist e é maior do que metade da taxa Nyquist.

10. Sistema de acordo com a reivindicação 7, **caracterizado pelo fato de** que compreende ainda calcular as amostras de campo de onda de aceleração como derivadas de tempo das amostras de campo de onda de velocidade vertical de um campo de ondas de velocidade vertical medido com um sensor de movimento de partículas amostrado na taxa de amostra.

11. Sistema de acordo com a reivindicação 7, **caracterizado pelo fato de** que interpolar o campo de onda de pressão no domínio do tempo compreende ainda interpolar o campo de onda de pressão como uma função das amostras de campo de onda de pressão e derivadas de tempo das amostras de campo de onda de velocidade vertical, em que derivadas de tempo das amostras de campo de onda de velocidade vertical são as amostras de campo de onda de aceleração.

12. Sistema de acordo com a reivindicação 8, **caracterizado pelo fato de** que compreende ainda receber as amostras de campo de onda de pressão, receber os campos de onda de movimento de partícula, e interpolar o campo de onda de pressão em tempo quase real a bordo de um navio de pesquisa.

13. Meio legível por computador não transitório que tem

instruções legíveis em máquina codificada no mesmo para capacitar um ou mais processadores de um sistema de computador para realizar as operações **caracterizadas por**:

receber amostras de campo de onda de pressão de um campo de onda de pressão por sensores de pressão localizado em um streamer a uma taxa de amostra entre uma taxa de Nyquist e uma metade da taxa de Nyquist (901);

receber amostras de campo de onda de aceleração medidas por sensores de movimento de partículas em uma taxa de amostra (902); e

interpolar um campo de onda de pressão em um domínio do tempo baseado nas amostras de campo de onda de pressão e as amostras de campo de onda de aceleração (906);

filtrar o campo de onda de pressão e o campo de ondas de pressão interpolado para obter um campo de onda de pressão indo para cima; e

gerar uma imagem de uma formação subterrânea baseada, pelo menos em parte, no campo de ondas de pressão indo para cima.

14. Meio de acordo com a reivindicação 13, **caracterizado pelo fato de** que uma metade da taxa Nyquist é um limite inferior para taxas de amostras de campo de onda de pressão sozinhas.

15. Meio de acordo com a reivindicação 14, **caracterizado pelo fato de** que a taxa de amostra é menor do que a taxa Nyquist e é maior do que uma metade da taxa Nyquist.

16. Meio de acordo com a reivindicação 13, **caracterizado pelo fato de** que interpolar o campo de onda de pressão no domínio de tempo compreende ainda calcular as amostras de campo de onda de aceleração como derivadas de tempo das amostras de campo de onda de velocidade vertical de uma campo de ondas de velocidade vertical medido com um sensor de movimento de partículas amostrado

na taxa de amostra.

17. Meio de acordo com a reivindicação 13, **caracterizado pelo fato de** que interpolar o campo de onda de pressão no domínio do tempo compreende ainda interpolar o campo de onda de pressão como uma função das amostras de campo de onda de pressão e derivadas de tempo das amostras de campo de onda de velocidade vertical, em que as derivadas de tempo das amostras de campo de onda de velocidade vertical são amostras de campo de onda de velocidade vertical.

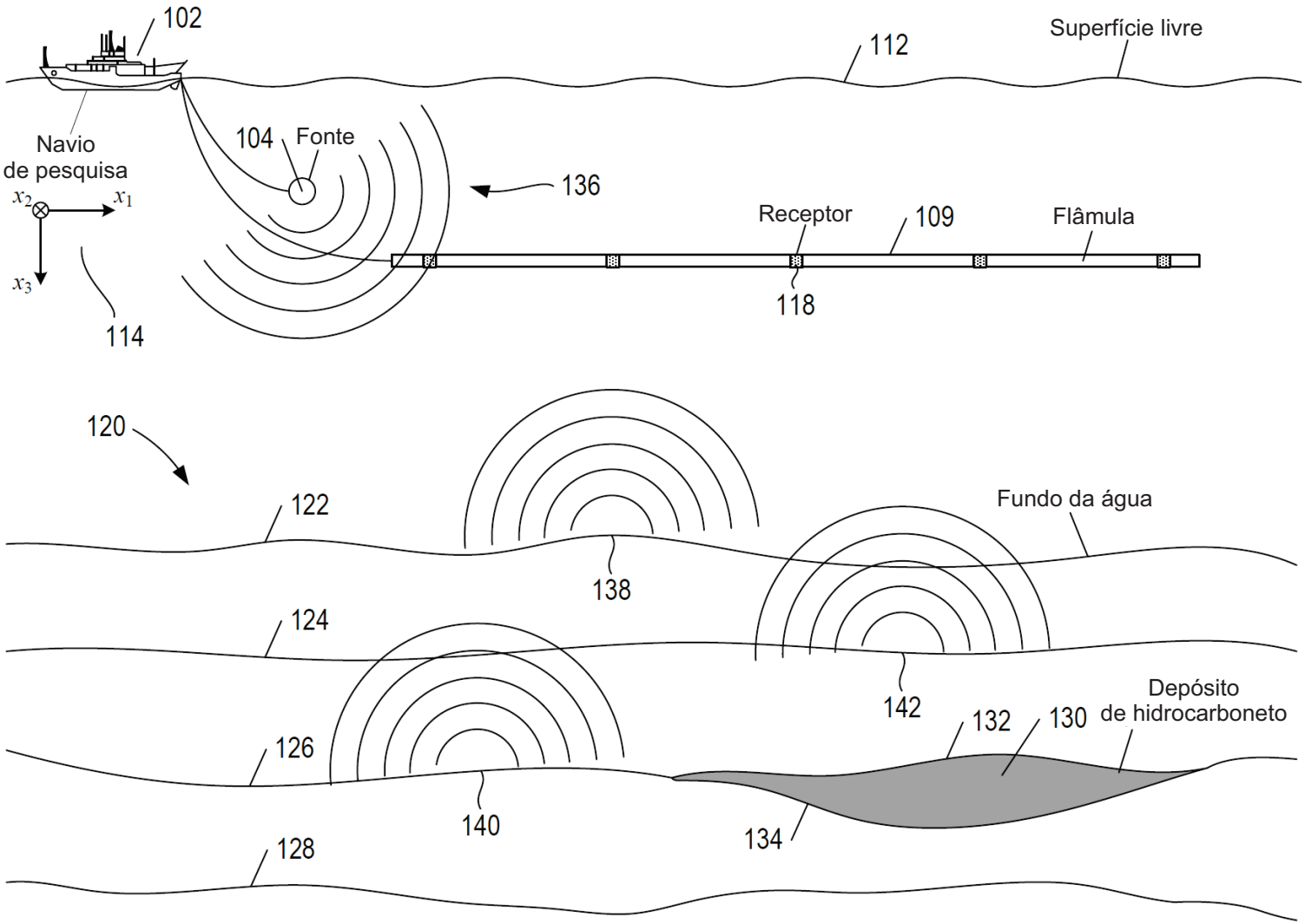

102
112
Superfície livre
Navio
de pesquisa
104
Fonte
136
x_2
x_1
x_3
Receptor
109
Flâmula
114
118
120
122
Fundo da água
138
124
142
Depósito
de hidrocarboneto
132
130
126
140
134
128

FIG. 1A

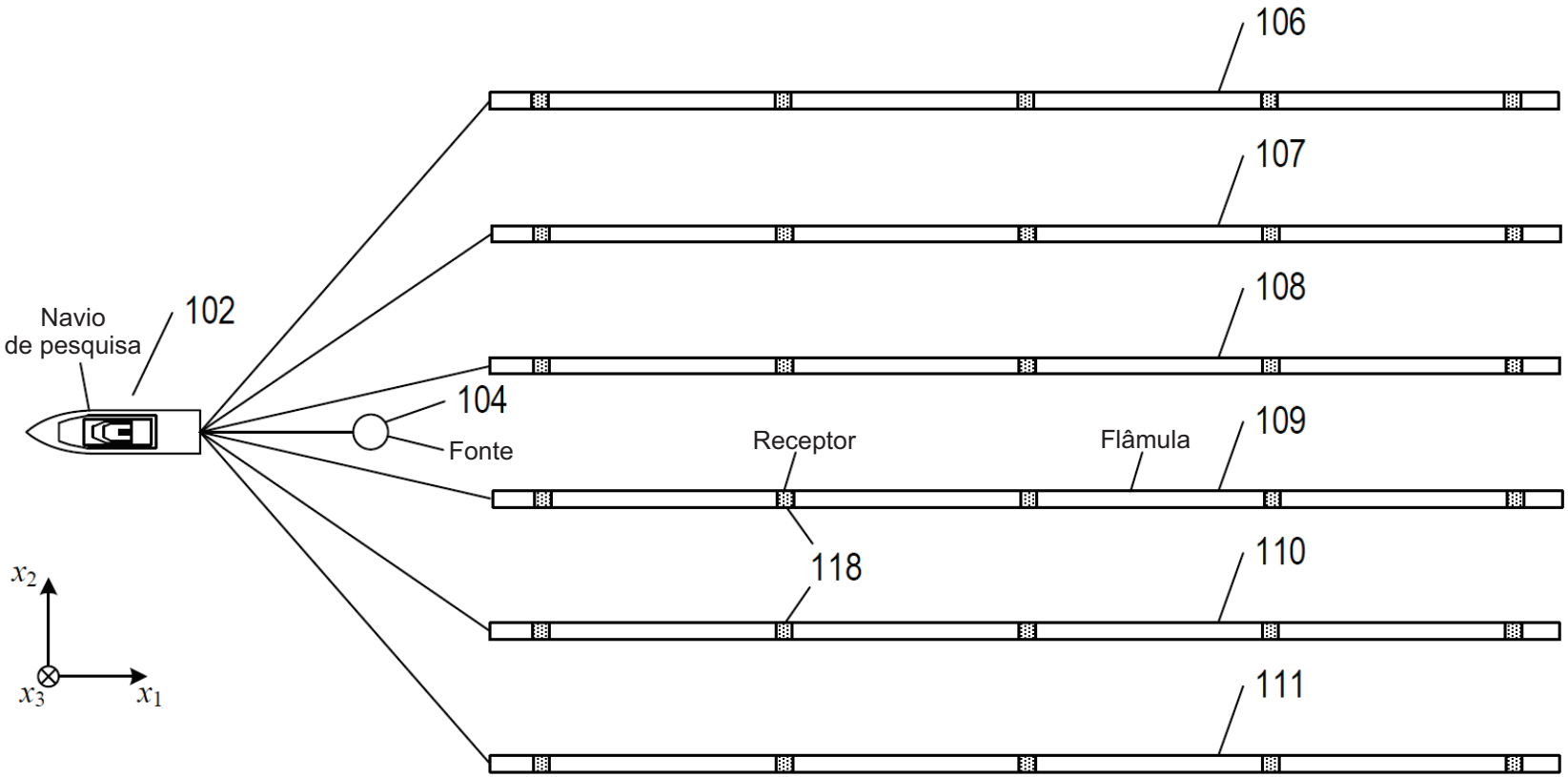

106
107
108
Navio
de pesquisa
102
104
Fonte
Receptor
Flâmula
109
118
110
111
x_2
x_3
x_1

FIG. 1B

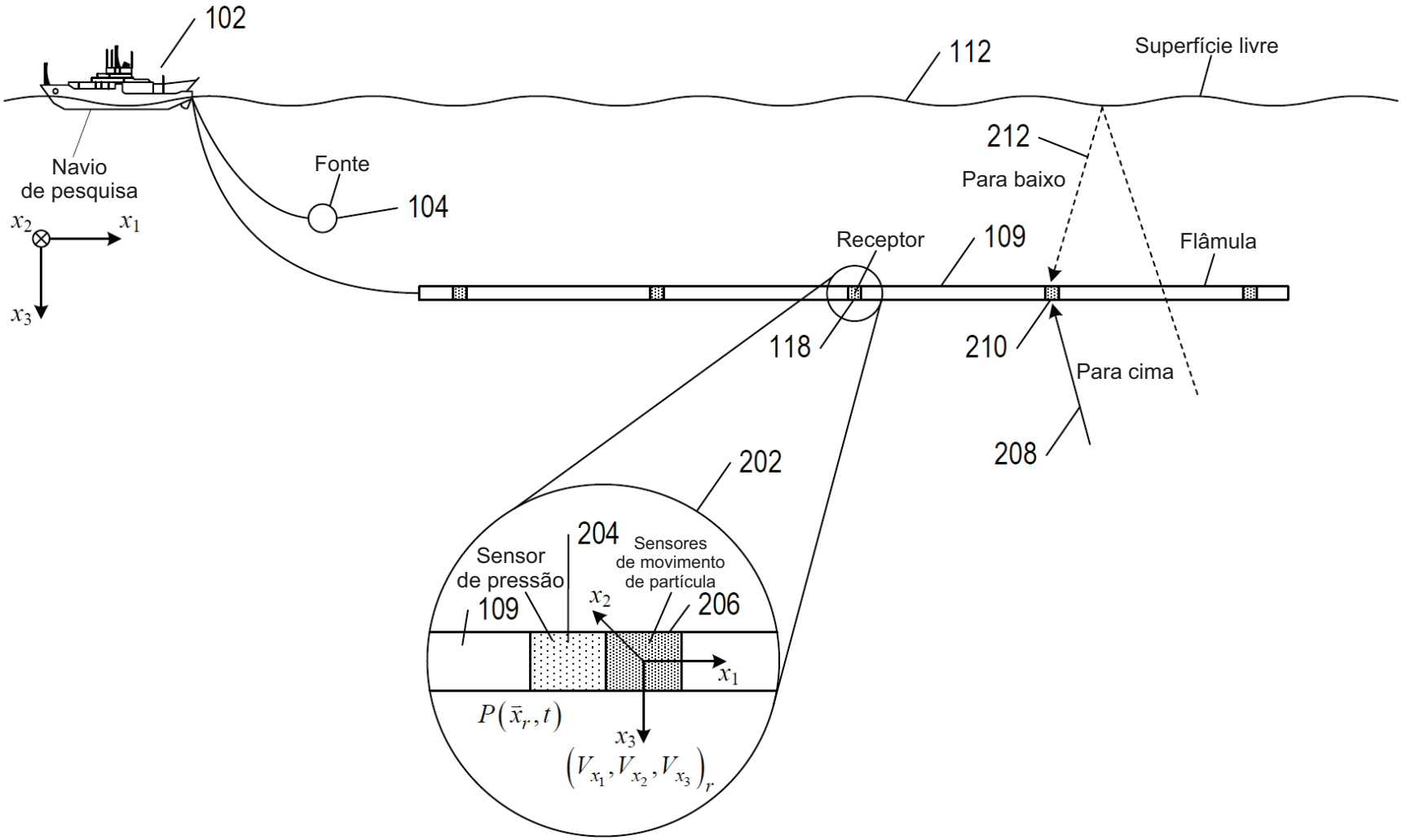

102
112
Superfície livre
212
Para baixo
Navio
de pesquisa
Fonte
104
x_2
x_1
x_3
Receptor
109
Flâmula
118
210
Para cima
208
202
204
Sensor
de pressão
Sensores
de movimento
de partícula
109
206
x_2
x_1
$P(\vec{x}_r, t)$
x_3
$(V_{x_1}, V_{x_2}, V_{x_3})_r$

FIG. 2

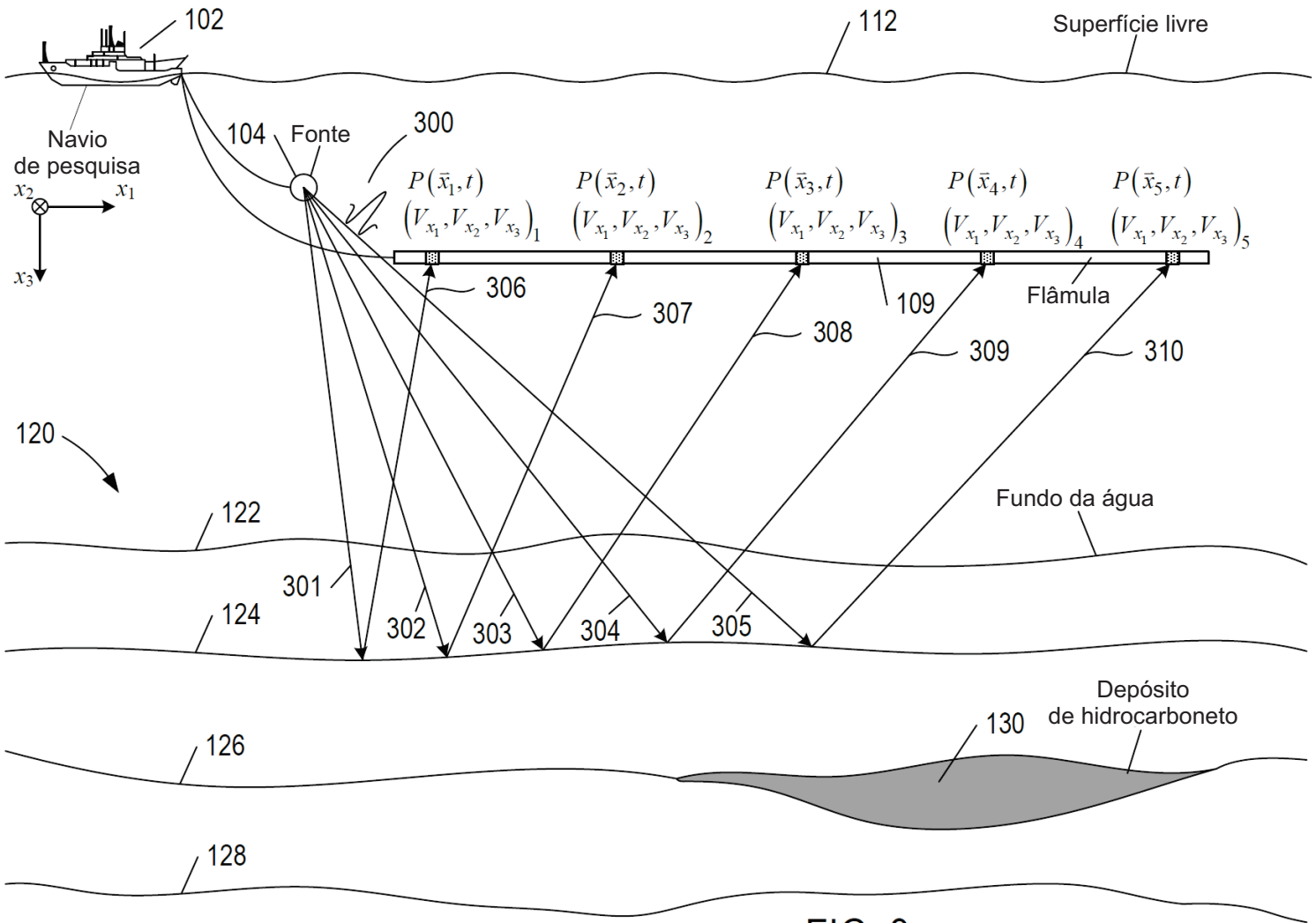

102
112
Superfície livre
Navio
de pesquisa
104
Fonte
300
$P(\vec{x}_1,t)$ $P(\vec{x}_2,t)$ $P(\vec{x}_3,t)$ $P(\vec{x}_4,t)$ $P(\vec{x}_5,t)$
$(V_{x_1},V_{x_2},V_{x_3})_1$ $(V_{x_1},V_{x_2},V_{x_3})_2$ $(V_{x_1},V_{x_2},V_{x_3})_3$ $(V_{x_1},V_{x_2},V_{x_3})_4$ $(V_{x_1},V_{x_2},V_{x_3})_5$
x_2
x_1
x_3
306
307
308
109
Flâmula
309
310
120
122
Fundo da água
301
124
302
303
304
305
Depósito
de hidrocarboneto
130
126
128

FIG. 3

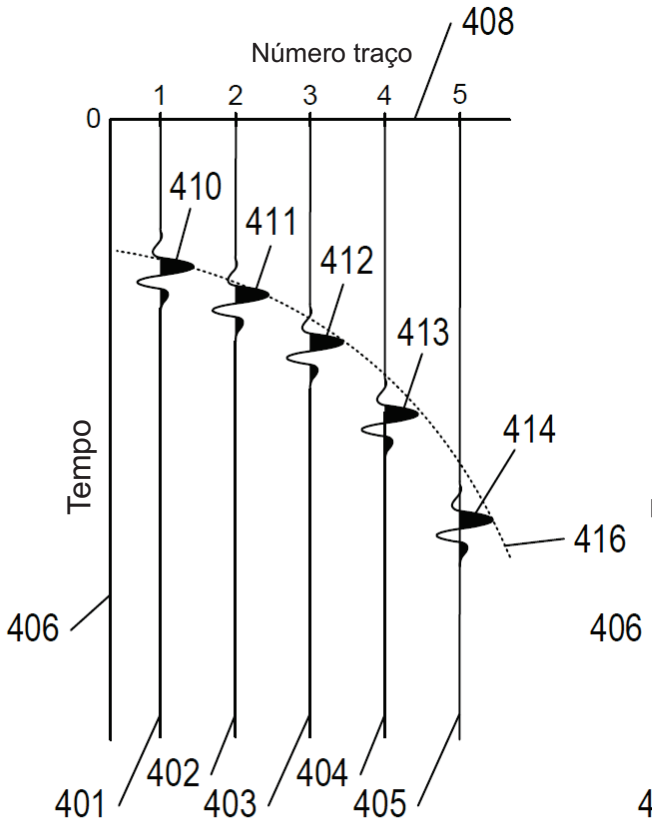


FIG. 4A

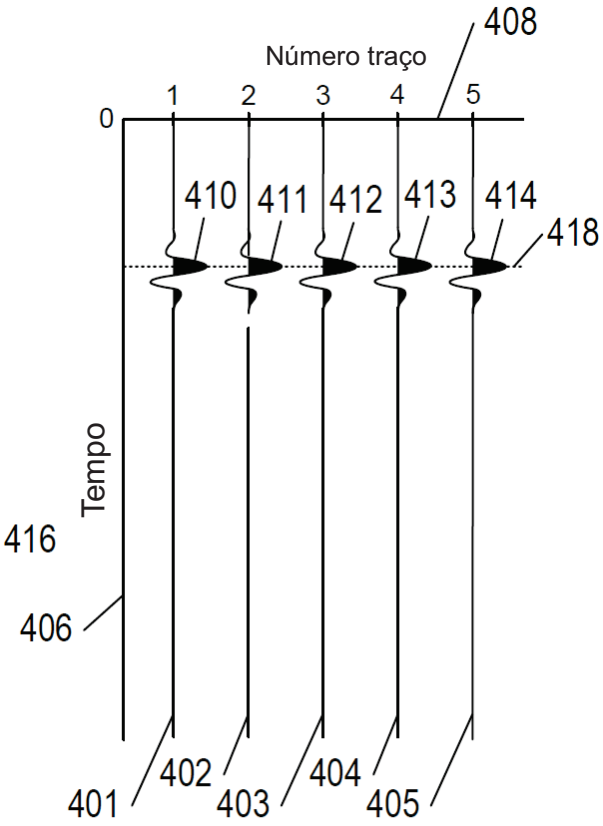


FIG. 4B

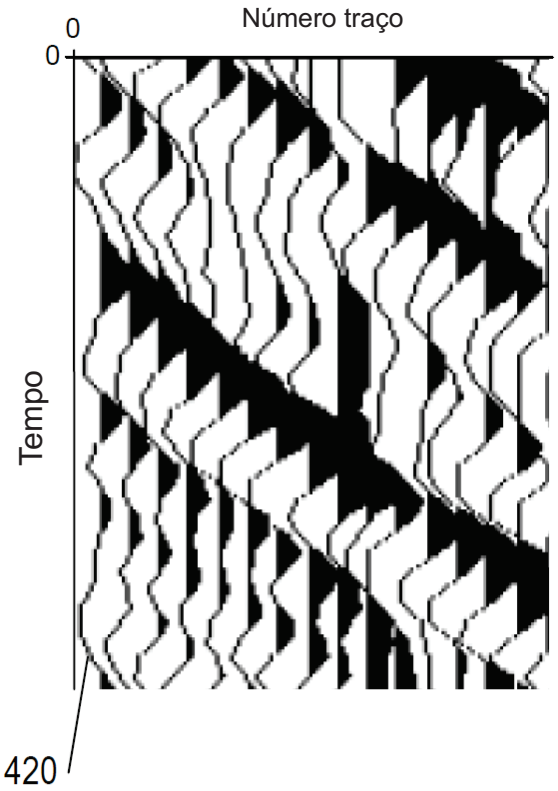


FIG. 4C

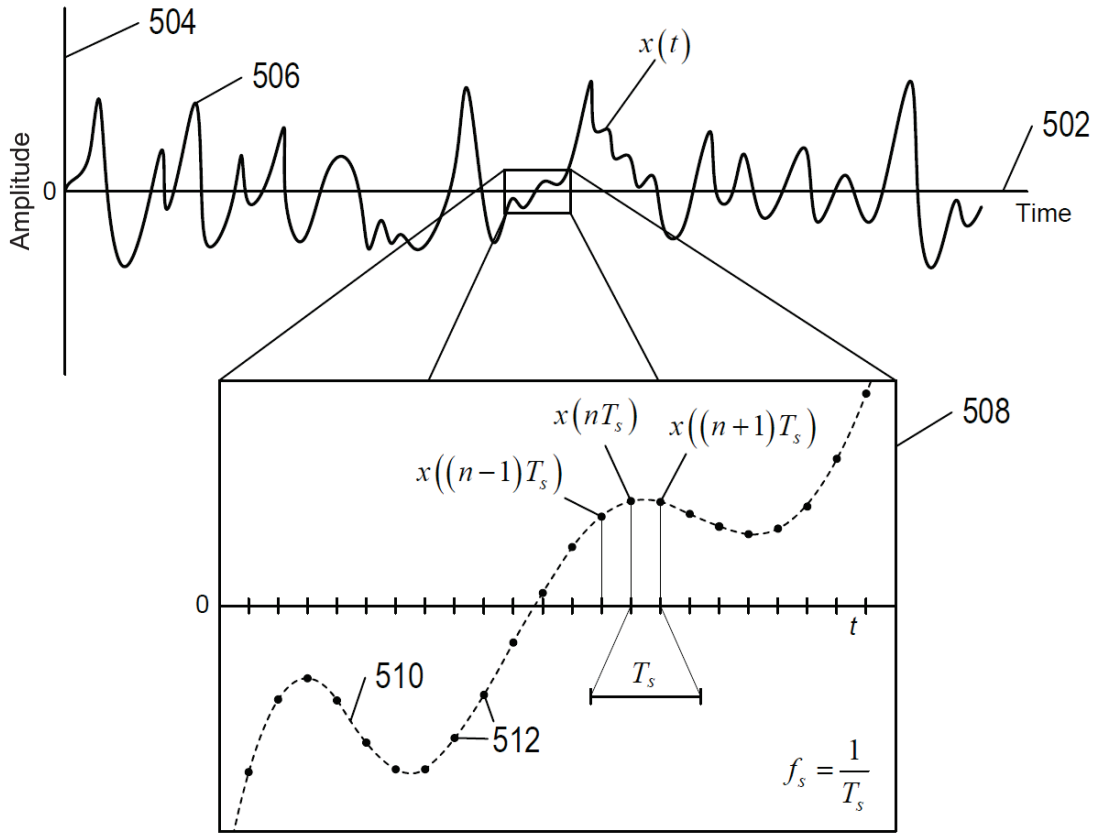

504
506
x(t)
502
Amplitude
0
Time
508
x(nT_s)
x((n+1)T_s)
x((n-1)T_s)
0
t
T_s
510
512
f_s = 1/T_s

FIG. 5

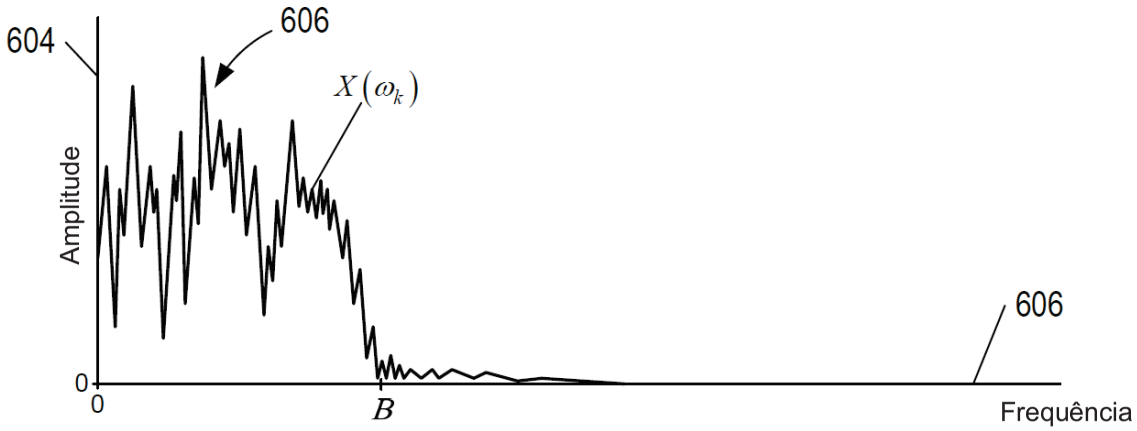

604
606
X(ω_k)
Amplitude
0
0
B
606
Frequência

FIG. 6

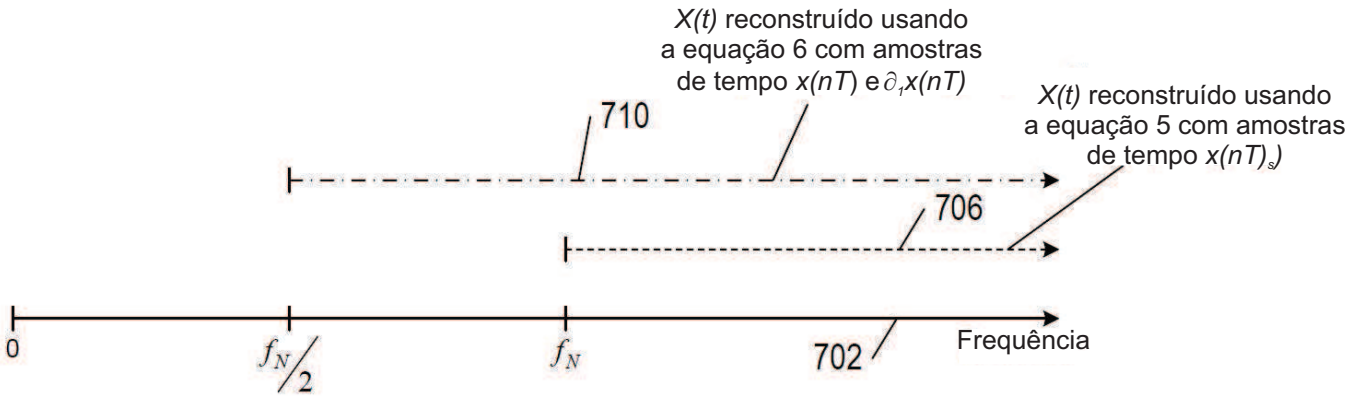

X(t) reconstruído usando a equação 6 com amostras de tempo x(nT) e ∂1x(nT)
X(t) reconstruído usando a equação 5 com amostras de tempo x(nT)s)
710
706
0
fN/2
fN
702
Frequência

FIG. 7A

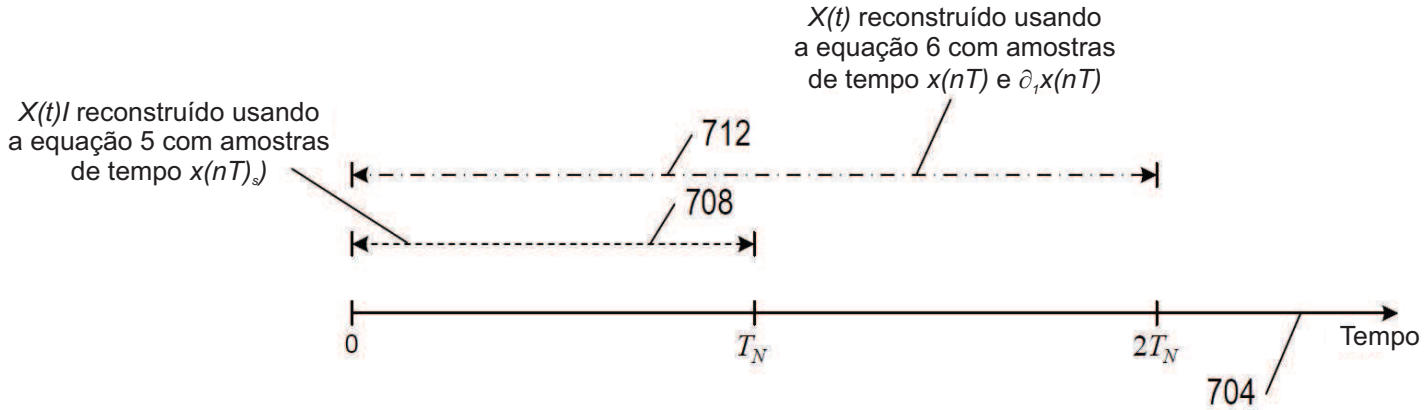

X(t) reconstruído usando a equação 6 com amostras de tempo x(nT) e ∂1x(nT)
X(t)I reconstruído usando a equação 5 com amostras de tempo x(nT)s)
712
708
0
TN
2TN
704
Tempo

FIG. 7B

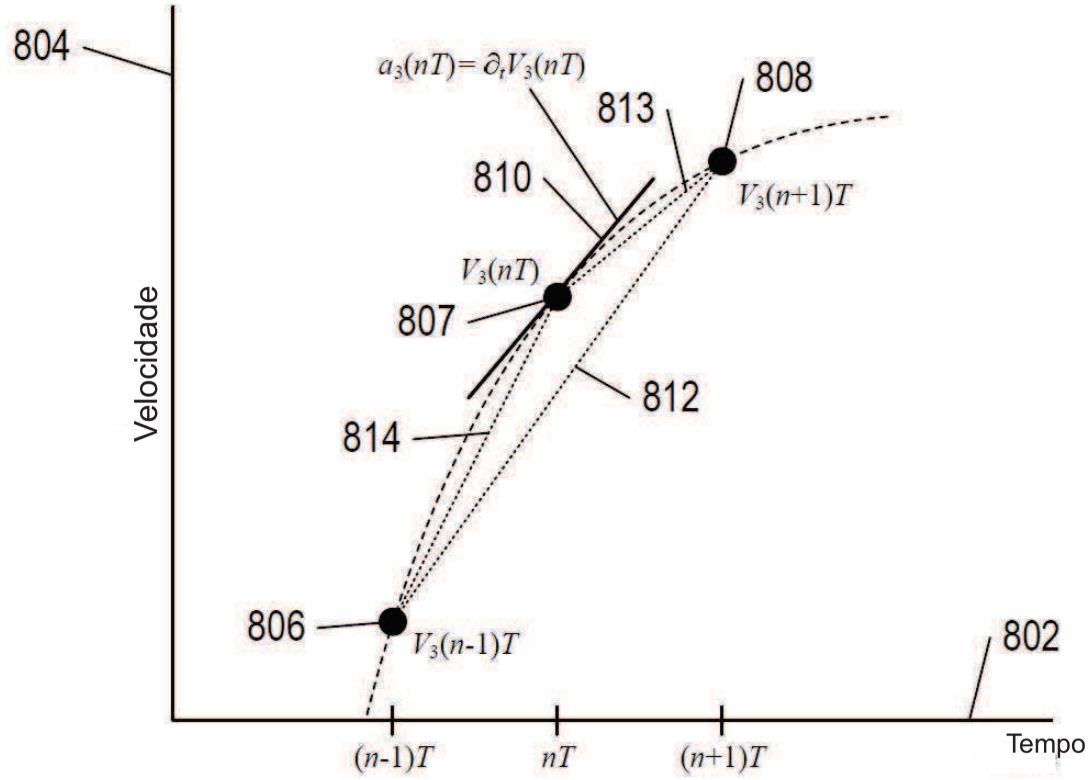

804
$a_3(nT) = \partial_t V_3(nT)$
813
808
810
$V_3(n+1)T$
$V_3(nT)$
807
812
814
806
$V_3(n-1)T$
802
Velocidade
Tempo
$(n-1)T$
nT
$(n+1)T$

FIG. 8

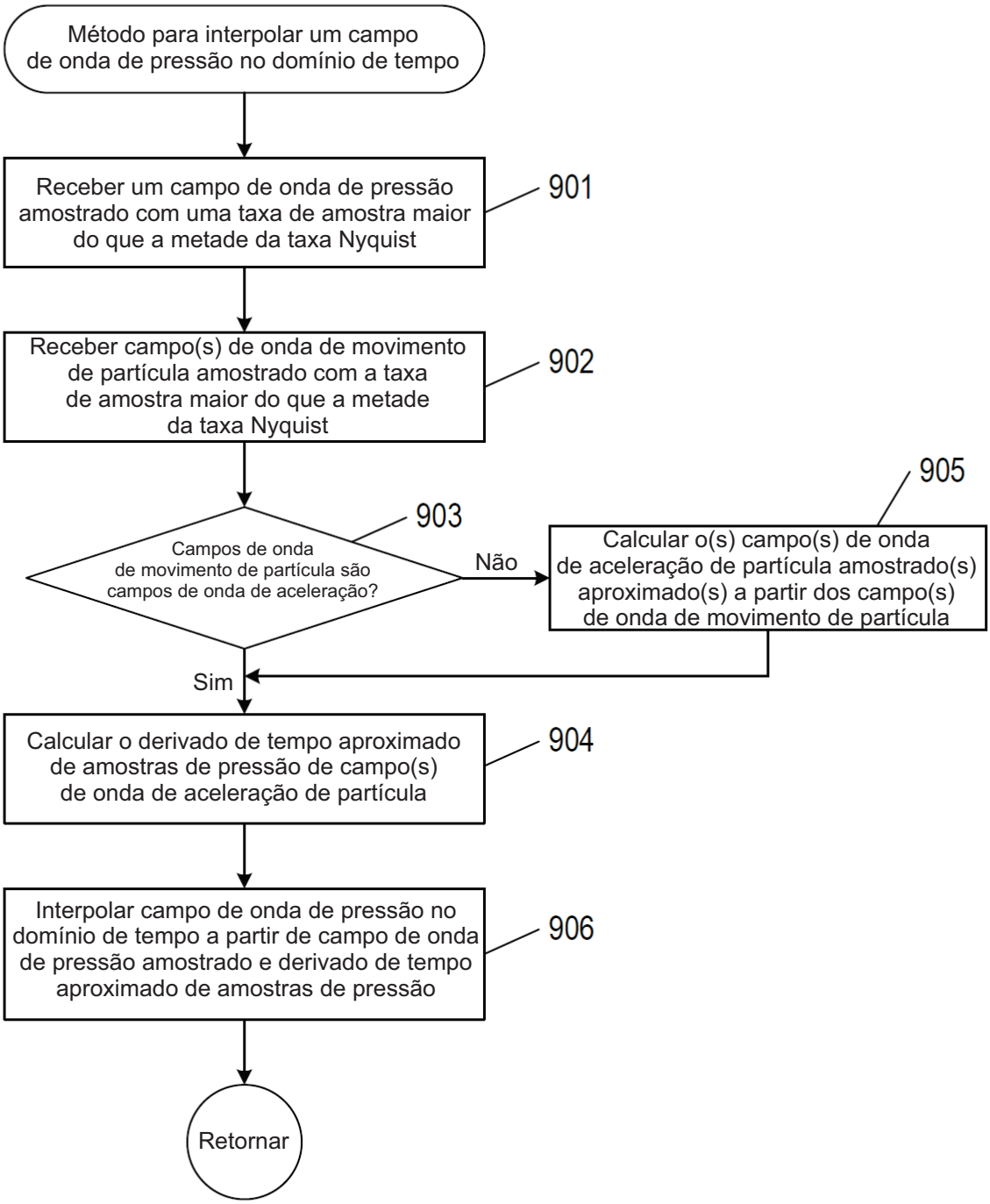

Método para interpolar um campo de onda de pressão no domínio de tempo
Receber um campo de onda de pressão amostrado com uma taxa de amostra maior do que a metade da taxa Nyquist
901
Receber campo(s) de onda de movimento de partícula amostrado com a taxa de amostra maior do que a metade da taxa Nyquist
902
Campos de onda de movimento de partícula são campos de onda de aceleração?
903
Não
Sim
Calcular o(s) campo(s) de onda de aceleração de partícula amostrado(s) aproximado(s) a partir dos campo(s) de onda de movimento de partícula
905
Calcular o derivado de tempo aproximado de amostras de pressão de campo(s) de onda de aceleração de partícula
904
Interpolar campo de onda de pressão no domínio de tempo a partir de campo de onda de pressão amostrado e derivado de tempo aproximado de amostras de pressão
906
Retornar

FIG. 9

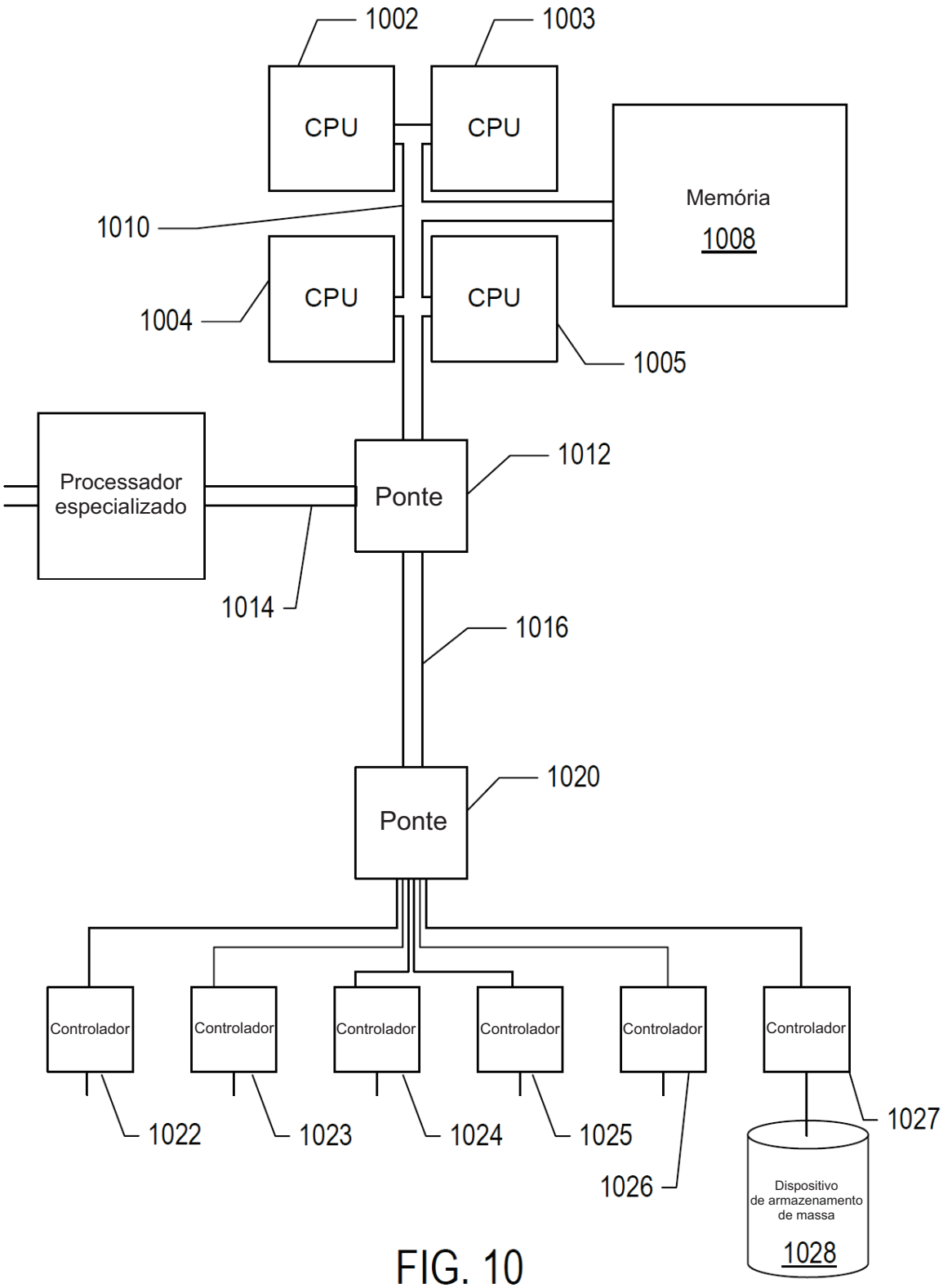

1002
1003
CPU
CPU
Memória
1008
1010
CPU
CPU
1004
1005
Processador especializado
Ponte
1012
1014
1016
Ponte
1020
Controlador
Controlador
Controlador
Controlador
Controlador
Controlador
1022
1023
1024
1025
1026
1027
Dispositivo de armazenamento de massa
1028

FIG. 10