

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

(21) BR 10 2013 029371-7 A2

(22) Data de Depósito: 14/11/2013
(43) Data da Publicação: 07/10/2014
(RPI 2283)



(51) Int.Cl.:
G01V 1/28
G01V 1/36

(54) Título: MÉTODOS E SISTEMAS PARA
EXTRAPOLAR CAMPOS DE ONDA

(30) Prioridade Unionista: 19/11/2012 US 13/680,287

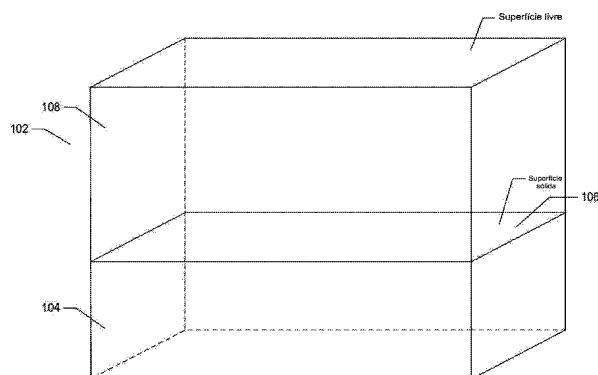
(73) Titular(es): PGS GEOPHYSICAL AS

(72) Inventor(es): WALTER SÖLLNER

(57) Resumo: RESUMO

Patente de Invenção: "MÉTODOS E SISTEMAS PARA EXTRAPOLAR CAMPOS DE ONDA".

A presente invenção refere-se a métodos e sistemas descritos, para extrapolar campos de ondas enquanto impedem interrupções devido ao serrilhamento espacial. Os campos de ondas de pressão medidos com sensores de pressão e campos de ondas de velocidade vertical e horizontal medidos com três movimentos axiais podem ser espacialmente serrilhados em pelo menos uma direção horizontal. O campo de onda de pressão e/ou o campo de onda de velocidade vertical são decompostos em um de um campo de onda ascendente e de um campo de onda descendente. o campo de onda ascendente ou descendente é extrapolado usando um extrapolador que depende de componentes de um vetor de lentidão. De modo a impedir interrupções no campo de onda extrapolado devido ao serrilhamento espacial, os componentes do vetor de lentidão são calculados de um campo de onda de pressão medida e dos dois campos de ondas de velocidade horizontal.



Relatório Descritivo da Patente de Invenção para "**MÉTODOS E SISTEMAS PARA EXTRAPOLAR CAMPOS DE ONDA**".

ANTECEDENTES

Há poucas décadas no passado, a indústria de petróleo investiu pesadamente no desenvolvimento de técnicas de pesquisa sísmica marinha que renderam conhecimento de formações subterrâneas localizadas abaixo de um corpo de água de modo a encontrar e extrair recursos minerais valiosos, tal como óleo. Imagens sísmicas de alta resolução de uma formação subterrânea são essenciais para interpretação quantitativa e monitoramento aperfeiçoado da embarcação. Algumas pesquisas sísmicas marinhas são executadas com uma embarcação de exploração sísmológica que reboca uma fonte sísmica e uma ou mais linhas de fluxos que formam uma superfície de aquisição de dados sísmicos abaixo da superfície da água e sobre uma formação subterrânea a ser pesquisada para depósitos de minerais. Outras pesquisas sísmicas marinhas podem ser executadas com cabos de fundo oceânico ("OBCs") que estão sobre ou exatamente acima do fundo do mar. Os OBCs são conectados a uma embarcação de exploração sísmológica ancorada que pode incluir uma fonte sísmica. Uma embarcação de exploração sísmológica típica contém equipamento de aquisição sísmica, tal como um controle de navegação, controle de fonte sísmica, controle de receptor sísmico e equipamento de registro. O controle de fonte sísmica faz com que a fonte sísmica produza impulsos acústicos em tempos selecionados. Cada impulso é uma onda de som que viaja para baixo através da água e para a formação subterrânea. Em cada interface entre diferentes tipos de pedra, uma porção da onda de som é transmitida e uma outra porção é refletida de volta para o corpo de água. As linhas de fluxo e OBCs incluem um número de receptores sísmicos ou sensores que detectam pressão e/ou velocidade de campos de onda associados com as ondas de som refletidas de volta na água da formação subterrânea. Os dados de pressão e velocidade de campo de onda são processados para gerar imagens da formação subterrânea.

No entanto, quando os receptores são separados por mais da

metade de comprimentos de onda do campo de onda refletidos, o campo de onda é espacialmente serrilhado. Por exemplo, em aquisição de linha de fluxo rebocado, as linhas de fluxo são tipicamente separados por distâncias que muitas vezes resultam em campos de ondas registrados espacialmente serrilhado. Como um resultado, imagens de uma formação subterrânea ao longo de direções perpendiculares às linhas de fluxo não são confiáveis. Aqueles que trabalham na indústria de petróleo continuam a procurar sistemas e métodos que podem ser usados para processar dados de pressão e velocidade de campo de onda para impedir o aspecto espacialmente serrilhado do campo de onda registrado.

DESCRIÇÃO DOS DESENHOS

A Figura 1 mostra um volume de domínio da superfície da terra.

A Figura 2 mostra características da superfície de uma formação subterrânea na porção inferior do volume de domínio mostrado na Figura 1.

As Figuras 3A-3C mostram um exemplo de uma sismologia de exploração executada com linhas de fluxo rebocadas.

As Figuras 4A-4B mostram formas de ondas processadas geradas de produções hidrofone e geofone, respectivamente.

A Figura 5 mostra um exemplo de sismologia de exploração realizada com cabos de fundo oceânico.

As Figuras 6A-6B mostram vistas de elevação de topo e lateral, respectivamente, de uma embarcação de exploração sismológica rebocando fonte e linhas de fluxo.

A Figura 7 mostra uma vista lateral de uma linha de fluxo localizada abaixo de uma superfície livre.

A Figura 8 mostra um sistema coordenado Cartesiano associado com um exemplo de vetor do campo de onda.

As Figuras 9A-9B mostram um exemplo de serrilhamento espacial usando representações de onda sinusoidal.

A Figura 10 mostra um sistema coordenado Cartesiano associado com um exemplo de vetor de lentidão.

A Figura 11 mostra um exemplo de representação de extrapola-

ção do campo de onda de uma profundidade abaixo da superfície livre.

A Figura 12 mostra um exemplo de plotagem de frequência angular versus número de ondas horizontais.

5 As Figuras 13A-13B mostram diagramas de fluxo de dois métodos para extrapolar um campo de onda.

A Figura 14 mostra um exemplo de um sistema de computador generalizado.

As Figuras 15A-15G mostram plotagens de campos de onda de pressão modelada e calculada versus tempo.

10 DESCRIÇÃO DETALHADA

São descritos métodos e sistemas para extrapolar campos de ondas embora impedindo disrupções devido a serrilhamento espacial. Os campos de ondas de pressão medidos com sensores de pressão e campos de ondas verticais e horizontais medidos com três sensores de movimentos
15 axiais podem ser espacialmente serrilhado em pelo menos uma direção horizontal. Os métodos e os sistemas descritos abaixo são direcionados para decompor o campo de onda de pressão e/ou o campo de onda de velocidade vertical em qualquer campo de onda ascendente ou um campo de onda descendente e extrapolar os campos de ondas usando um extrapolador
20 que depende de componentes de um vetor de lentidão. Em um aspecto dos métodos e sistemas descritos abaixo, os componentes do vetor de lentidão são calculados do campo de onda de pressão medida e dois campos de ondas de velocidade horizontais, que impede disrupções de serrilhamento espacial no campo de onda extrapolado.

25 A Figura 1 mostra um volume de domínio da superfície da terra. O volume de domínio 102 compreende um volume sólido de sedimento e pedra 104 abaixo da superfície sólida 106 da terra que, por sua vez, fundamenta um volume de fluido de água 108 dentro de um oceano, um braço ou baía, ou um grande lago de água fresca. O volume de domínio 102 representa um exemplo de domínio experimental para uma classe de técnicas
30 observacionais e analíticas de sismologia de exploração e sistemas referidos como “sismologia de exploração marinha”.

A Figura 2 mostra características de subsuperfície de uma formação subterrânea na porção inferior do volume de domínio 102 mostrado na Figura 1. Como mostrado na Figura 2, para propósitos de sismologia de exploração o volume de fluido 108 é um volume relativamente sem características, geralmente homogêneo fundamentando o volume sólido 104 de interesse. No entanto, embora o volume de fluido 108 possa ser explorado, analisado e caracterizado com relativa precisão usando muitos diferentes tipos de métodos e pesquisas, incluindo submersíveis de detecção remotos, sonar e outros dispositivos e métodos, o volume sólido 104 de crosta fundamentando o volume de fluido é comparativamente muito mais difícil para pesquisar e caracterizar. Exceto o volume de fluido 108 sobrejacente, o volume sólido 104 é significativamente heterogêneo e anisotrópico e inclui muitos diferentes tipos de características e materiais de interesse para sismólogos de exploração. Por exemplo, como mostrado na Figura 2, o volume sólido 104 pode incluir uma primeira camada de sedimento 202, uma primeira camada de pedra 204 fraturada e suspensa, e uma segunda camada de pedra 206 subjacente abaixo da primeira camada de pedra 204. Em certos casos, a segunda camada de pedra 206 pode ser porosa e conter uma significativa concentração de hidrocarboneto líquido 208 que é menos denso do que o material da segunda camada de pedra e que, por isso sobe para dentro da camada de pedra 206. No caso mostrado na Figura 2, a primeira camada de pedra 204 não é porosa e, por isso, forma uma tampa que impede adicional migração para cima do hidrocarboneto líquido, o que, por conseguinte, empocha em uma camada saturada de hidrocarboneto 208 abaixo da primeira camada de pedra 204. Um objetivo da sismologia de exploração é identificar as localizações de estratos porosos de hidrocarboneto saturado dentro de volumes da crosta da terra fundamentando a superfície sólida da terra.

As Figuras 3A-3C mostram um método de sismologia de exploração através do qual dados digitalmente codificados são instrumentalmente adquiridos para subsequente processo e análise de sismologia de exploração de modo a caracterizar as estruturas e distribuições de características e

materiais de uma formação subterrânea. A Figura 3A mostra um exemplo de uma embarcação de sismologia de exploração 302 equipada para executar uma série de coletas de dados de sismologia de exploração. Em particular, a embarcação 302 reboca uma ou mais linhas de fluxo 304-305 através de um

5 plano de profundidade aproximadamente constante geralmente localizado um número de metros abaixo da superfície livre 306. As linhas de fluxo 304-305 são longos cabos contendo linhas de energia e de transmissão de dados aos quais o receptores, também referidos como “sensores”, são conectados em localizações distanciadas. Em um tipo de sismologia de explora-

10 ção, cada receptor, tal como o receptor representado pelo disco sombreado 308 na Figura 3A, compreende um par de receptores sísmicos incluindo um geofone que detecta deslocamento vertical dentro do meio fluido ao longo do tempo detectando movimento de partícula, velocidades e acelerações, e um hidrofone que detecta variações em pressão ao longo do tempo. As linhas

15 de fluxo 304-305 e a embarcação 302 incluem eletrônicos de detecção sofisticados e instalações de processamento de dados que permitem que leituras do receptor sejam correlacionadas com posições absolutas na superfície livre e posições absolutas tridimensionais com respeito a um sistema coordenado tridimensional arbitrário. Na Figura 3A, os receptores ao longo das

20 linhas de fluxo são mostrados estar abaixo da superfície livre 306, com as posições do receptor correlacionadas com posições de superfície sobrejacentes, tais como uma posição de superfície 310 correlacionada com a posição do receptor 308. A embarcação 302 também reboca uma ou mais fontes de onda acústica 312 que produzem impulsos de pressão em intervalos es-

25 paciais e temporais conforme a embarcação 302 e as linhas de fluxo 304-305 rebocados se movem através da superfície livre 306. Em outras modalidades, a uma ou mais fontes de onda acústica 312 podem ser rebocadas por uma embarcação separada. Embora a Figura 3A ilustre o uso de duas linhas de fluxo 304-305, outras modalidades podem incluir linhas de fluxo

30 adicionais, incluindo até tantos quanto 20 ou mais linhas de fluxo rebocadas por embarcação 302 de sismologia de exploração. Ainda em outras modalidades, pelo menos um das linhas de fluxo pode ser rebocado em uma pro-

fundidade diferente das linhas de fluxo 304-305, e um ou mais das linhas de fluxo podem ser rebocados com um perfil de profundidade que está em um ângulo para superfície livre 306.

A Figura 3B mostra uma frente de onda de expansão, acústica, representada por semicírculos de raio crescente centrados na fonte acústica 312, tal como um semicírculo 316, seguindo um pulso acústico emitido pela fonte acústica 312. As frentes de onda são, na verdade, mostradas em seção transversal no plano vertical na Figura 3B. Como mostrado na Figura 3C, o campo de onda de expansão para fora e para baixo, mostrado na Figura 3B, eventualmente alcança a superfície sólida 106, em cujo ponto de ondas acústicas se expandindo para fora e para baixo parcialmente se refletem da superfície sólida e parcialmente refratam para baixo no volume sólido, se tornando ondas elásticas dentro do dito volume. Em outras palavras, no volume de fluido, as ondas são ondas de pressão de compressão ou ondas P, cuja propagação pode ser modelada pela equação de onda acústica embora, em um volume sólido, as ondas incluam tanto as ondas P quanto as ondas transversais, ou ondas S, cuja propagação pode ser modelada pela equação de onda elástica. Dentro do volume sólido, em cada interface entre os diferentes tipos de materiais ou em descontinuidades em densidade ou em uma ou mais de várias outras características físicas ou parâmetros, as ondas de propagação para baixo são parcialmente refletidas e parcialmente refratadas, como na superfície sólida 106. Como um resultado, cada ponto da superfície sólida e dentro do volume sólido 104 sobrejacente se torna uma fonte do ponto secundário potencial do que ondas acústicas ou elásticas, respectivamente, podem emanar receptores na direção ascendente em resposta ao impulso de pressão emitido pela fonte acústica 312 e ondas elásticas de propagação para baixo geradas do impulso de pressão.

Como mostrado na Figura 3C, ondas secundárias de amplitude significativa são geralmente emitidas de pontos na ou perto da superfície sólida 106, tal como o ponto 320 e de pontos na ou muito perto de uma descontinuidade no volume sólido 104, tal como os pontos 322 e 324. Ondas terciárias podem ser emitidas da superfície livre 306 de volta para a superfí-

cie sólida 106 em resposta às ondas secundárias emitidas das características de superfície sólida e subsuperfície.

A Figura 3C também mostra o fato de que ondas secundárias são geralmente emitidas em diferentes tempos dentro de uma faixa de tempos seguindo o impulso de pressão inicial. Um ponto da superfície sólida 106, tal como o ponto 320, recebe um distúrbio de pressão correspondendo ao impulso de pressão inicial mais rapidamente do que um ponto dentro do volume sólido 104, tal como os pontos 322 e 324. Similarmente, um ponto na superfície sólida diretamente sobrejacente à fonte acústica recebe o impulso de pressão mais rápida do que um ponto de fundeio mais distante na superfície sólida. Por conseguinte, os tempos em que ondas secundárias e de ordem maior são emitidas de vários pontos dentro do volume sólido são relacionados à distância, em espaço tridimensional, dos pontos da fonte acústica.

As ondas acústicas e elásticas, no entanto, viajam em diferentes velocidades dentro de diferentes materiais bem como dentro do mesmo material sob diferentes pressões. Por isso, os tempos de viagem do impulso de pressão inicial e ondas secundárias emitidas em resposta ao impulso de pressão inicial são funções complexas de distância da fonte acústica bem como os materiais e características físicas dos materiais através do que a onda acústica que corresponde ao impulso de pressão inicial viaja. Além disso, como mostrado na Figura 3C para a onda secundária emitida do ponto 322, as conformações das frentes de onda de expansão podem ser alteradas conforme as interfaces transversais das frentes de onda e a velocidade de som varia nos meios atravessados pela onda. A superposição de ondas emitidas de dentro do volume de domínio 102 em resposta ao impulso de pressão inicial é geralmente um campo de onda muito complicado que inclui informação sobre as conformações, tamanhos e características de material do volume de domínio 102, incluindo informação sobre as conformações, tamanhos e localizações das várias características de reflexão dentro da formação subterrânea de interesse para sismólogos de exploração.

O campo de onda complicado que resulta do impulso de pressão inicial é amostrado, com o tempo, pelos sensores posicionados ao longo de

linhas de fluxo rebocadas por uma embarcação de exploração sísmológica. As Figura 4A-4B mostram formas de onda processadas geradas de produções hidrofone e geofone, respectivamente. Como mostrado na Figura 4A, a forma de onda registrada pelo hidrofone representa a pressão em tempos
5 seguintes ao impulso de pressão inicial, com a amplitude da forma de onda em um ponto no tempo relacionado ao campo de onda de pressão no hidrofone na ponto no tempo. Similarmente, como mostrado na Figura 4B, o geofone fornece uma indicação da velocidade ou aceleração da partícula fluida, em uma direção vertical, relacionada ao campo de onda de pressão no geofone no ponto no tempo.
10

Formações subterrâneas localizadas abaixo de um volume de água podem também ser investigadas usando técnicas sísmicas do fundo oceânico. Um exemplo dessas técnicas é implementado com cabos de fundo oceânico ("OBCs"). A Figura 5 mostra um exemplo de uma embarcação de exploração sísmológica 502 equipada com dois OBCs 504 e 506. Os OBCs são similares aos cabos de linha de fluxo rebocadas descritas acima em que os OBCs incluem um número de receptores distanciados 508, tais como receptores desdobrados aproximadamente a cada 25 a 50 metros, mas os OBCs são deixados na superfície sólida 106. Os OBCs são eletronicamente conectados à embarcação de exploração sísmológica 502 que fornece energia, comando e controle de instrumento e telemetria de dados nos dados do sensor para o equipamento de registro a bordo da embarcação. Alternativamente, as técnicas sísmicas do fundo oceânico podem ser implementadas com sistemas autônomos compostos de pontos múltiplos de receptor que são desdobrados e recuperados usando veículos remotos. Os pontos múltiplos de receptor são tipicamente colocados no fundo do mar em uma grade razoavelmente bruta, tal como aproximadamente a 400 metros de distância. Sistemas receptores autônomos são tipicamente implementados usando um de dois tipos de sistemas de pontos múltiplos de receptor. Um primeiro ponto múltiplo de receptor é um sistema de cabo em que os pontos múltiplos de receptor são conectados uns aos outros por cabos e são conectados a uma embarcação de registro ancorada. Os sistemas de cabos têm energia supri-
15
20
25
30

da a cada ponto múltiplo de receptor ao longo de um cabo e dados sísmicos são retornados à embarcação de registro ao longo do cabo ou usando rádio telemetria. Um segundo ponto múltiplo de receptor usa pontos múltiplos de receptor autocontidos que têm um suprimento de energia limitado, mas os

5 pontos múltiplos de receptor tipicamente têm que ser recuperados de modo a baixar os dados sísmicos registrados. Se usar OBCs ou pontos múltiplos de receptor autônomos, uma embarcação de fonte separada equipada com pelo menos uma fonte sísmica pode ser usada para gerar impulsos de pressão em intervalos espaciais e temporais conforme a embarcação de fonte se

10 move através da superfície livre.

Superfícies de Aquisição de Receptor

As Figuras 6A-6B mostram vistas de topo e elevação lateral, respectivamente, de uma embarcação de exploração sísmológica 602 rebocando uma fonte 604 e seis linhas de fluxo 606-611 separadas localizadas

15 abaixo de uma superfície livre 612. Cada linha de fluxo é anexada a uma extremidade da embarcação 602 e na extremidade oposta a uma boia 614 anexada à linha de fluxo 610. As linhas de fluxo 606-611 formam uma superfície de aquisição do receptor horizontal essencialmente planar localizada

20 abaixo da superfície livre 612. No entanto, na prática, a superfície de aquisição do receptor é facilmente variada devido às correntes ativas do oceano e condições de tempo. Em outras palavras, as linhas de fluxo rebocados podem ondular como um resultado de condições dinâmicas do fluido. A Figura 6B representa um instantâneo em tempo, da superfície livre 612 e correspondendo à conformação suave similar à onda na linha de fluxo 609. A fonte

25 604 pode ser implementada como uma série de elementos de fonte sísmica, tais como pistolas de ar e/ou pistolas de água, de modo a amplificar ondas de som e superar aspectos indesejáveis de uma marcação associada com uso de um elemento de fonte única. Em algumas modalidades, a fonte 604 pode ser rebocada por uma embarcação separada. Embora a Figura 6 ilus-

30 tre o uso de seis linhas de fluxo 606-611, outras modalidades podem incluir linhas de fluxo adicionais, incluindo até tanto quanto 20 ou mais linhas de fluxo rebocadas por embarcação de exploração sísmológica 602. Ainda em

outras modalidades, pelo menos um das linhas de fluxo podem ser rebocados em uma profundidade diferente das linhas de fluxo 606-611 e uma ou mais das linhas de fluxo podem ser rebocados com um perfil de profundidade que é uma superfície de aquisição horizontal essencialmente planar em um ângulo para a superfície livre 612.

As Figuras 6A e 6B incluem um plano xy 616 e um plano xz 618 do mesmo sistema coordenado Cartesiano usado para especificar orientações e localizações coordenadas dentro do volume de fluido. A coordenada x unicamente especifica a posição de um ponto em uma direção paralela ao comprimento das linhas de fluxo, e a coordenada y unicamente especifica a posição de um ponto em uma direção perpendicular ao eixo x e substancialmente paralela à superfície livre 612. A direção x é referida como a direção “em linha” e a direção y é referida como uma direção em “linha cruzada”. A coordenada z unicamente especifica a posição de um ponto perpendicular ao plano xy com a direção z positiva apontando para baixo para longe da superfície livre 612. Como mostrado na Figura 6B, a linha de fluxo 609 está em uma profundidade, z' , abaixo da superfície livre 612, que pode ser estimada em várias localizações ao longo das linhas de fluxo dos dispositivos de medição de profundidade (não mostrado) anexado as linhas de fluxo. Por exemplo, os dispositivos de medição de profundidade podem medir pressão hidrostática ou utilizar medições de distância acústica. Os dispositivos de medição de profundidade podem ser integrados com os controladores de profundidade, tais como paravanas ou pipas de água. Os dispositivos de medição de profundidade são tipicamente colocados em intervalos de cerca de 300 metros ao longo de cada linha de fluxo. As profundidades estimadas de linhas de fluxo são então usadas para calcular uma conformação de linha de fluxo interpolada bidimensional que aproxima a conformação como onda de uma linha de fluxo real em um instante de tempo. Alternativamente, as profundidades estimadas de linhas de fluxo podem ser usadas para calcular uma aproximação da superfície interpolada tridimensional da superfície de aquisição. A profundidade e a elevação do perfil de superfície livre são estimadas com respeito ao geoide, que é representado na Figura 6B por linha

pontilhada 620. O geóide é uma superfície hipotética da terra que coincide em toda parte com nível médio do oceano e pode ser usado para definir elevação zero isto é, $z = 0$). Nas Figuras 6A e 6B, discos sombreados, tais como o disco sombreado 622, representam receptores distanciados ao longo de cada linha de fluxo. As coordenadas dos receptores são denotadas por (x_r, y_r, z_r) , onde a profundidade z_r pode ser um valor interpolado.

A Figura 7 mostra uma vista lateral ou plana xz da linha de fluxo 609 localizado abaixo da superfície livre 612. Cada receptor 622 inclui um sensor de pressão e três sensores de movimento. Por exemplo, a Figura 7 inclui uma vista ampliada 702 do receptor 622 que inclui um sensor de pressão 704 e sensores de movimento 706. Os sensores de pressão podem ser hidrofones que medem o campo de onda de pressão e os sensores de movimento podem ser sensores de velocidade de partícula, também chamados geofones ou sensores de aceleração, chamados acelerômetros. Cada sensor de pressão mede o campo de onda de pressão total, denotado por $P(x_r, y_r, z_r, t)$, em todas as direções, enquanto os sensores de movimento de cada receptor mede a velocidade de componentes de campo de onda de um vetor de campo de onda de velocidade, denotado por $\vec{V}(V_x, V_y, V_z)$, onde $V_x(x_r, y_r, z_r, t)$, $V_y(x_r, y_r, z_r, t)$, e $V_z(x_r, y_r, z_r, t)$ são campos de ondas de velocidade medida nas direções x -, y -, e z -, respectivamente, como representado em vista ampliada 708.

A Figura 8 mostra um sistema coordenado Cartesiano com a origem 800 centrada em três sensores de movimento (não mostrado) de um receptor. Os componentes de campo de onda de velocidade $V_x(x_r, y_r, z_r, t)$ 801, $V_y(x_r, y_r, z_r, t)$ 802, e $V_z(x_r, y_r, z_r, t)$ 803 são direcionados ao longo de eixos coordenados x -, y -, e z -, respectivamente. Os sensores de movimento de cada receptor são unidirecionais em que cada sensor de movimento somente mede um componente direcional do vetor de campo de onda de velocidade \vec{V} 804 que aponta na direção que o campo de onda propaga. O componente de velocidade vertical, V_z , também chamado o campo de onda de velocidade vertical, do campo de onda total é igual ao campo de onda total \vec{V} somente para os campos de onda que propagam verticalmente. Em outras

palavras, como mostrado na Figura 8, θ é o ângulo de incidência entre a direção da campo de onda total e a orientação do sensor de movimento. Quando a campo de onda propaga verticalmente para cima, $\theta = 0$, por convenção, e o campo de onda de velocidade total é o campo de onda de velocidade vertical (isto é, $\vec{V} = -V_z$), e o campo de onda propaga verticalmente para baixo, $\theta = 180^\circ$ e o campo de onda de velocidade total é o campo de onda de velocidade vertical (isto é, $\vec{V} = +V_z$).

Os OBCs e pontos múltiplos de receptor autônomos usados em técnica sísmica de fundo oceânico também formam uma superfície de aquisição do receptor. Os receptores usados em técnicas sísmicas de fundo oceânico podem também ser implementados com sensores de pressão e três sensores de movimento que medem movimento de partícula em três dimensões, como descrito acima. Em particular, cada receptor de um OBC ou um ponto múltiplo de receptor autônomo pode ser implementado com um sensor de pressão que mede o campo de onda de pressão total $P(x_p, y_p, z_p, t)$ e inclui três sensores de movimento que medem componentes de campo de onda de velocidade $V_x(x_p, y_p, z_p, t)$, $V_y(x_p, y_p, z_p, t)$, e $V_z(x_p, y_p, z_p, t)$ nas direções x -, y -, e z -, respectivamente.

Serrilhamento Espacial

A superfície de aquisição do receptor espacialmente amostra o campo de onda com os receptores separados por uma distância Δx na direção em linha ou x e por uma distância Δy em linha cruzada ou direção y , como mostrado na Figura 6A. No entanto, uma grande separação do receptor pode resultar em um campo de onda registrado espacialmente serrilhado. Por exemplo, em aquisição de linha de fluxo rebocada, as linhas de fluxo são tipicamente fabricados com a distância de separação do receptor curta o bastante para impedir serrilhamento na direção em linha, mas a superfície de aquisição de dados é desdobrada, as linhas de fluxo são tipicamente separados na direção da linha cruzada por aproximadamente 50 a 100 metros, que muitas vezes resulta no campo de onda registrado sendo serrilhado na direção de linha cruzada.

As Figuras 9A-9B mostram um exemplo de serrilhamento usan-

do representações de onda sinusoidal de ondas registradas ao longo de duas linhas diferentes em um caso dado de tempo. Nas Figuras 9A-9B, círculos sólidos, tais como o círculo sólido 902, representam receptores e uma curva sinusoidal em linha tracejada 904 representa uma onda, tal como uma

5 onda de pressão ou uma onda de velocidade, em um instante de tempo. Círculos abertos, tais como o círculo aberto 906, representam a amplitude de onda 904 registrada pelos receptores no instante de tempo. Na Figura 9A, os receptores são separados por uma distância Δ , e na Figura 9B, os receptores são separados por uma distância maior Δ (isto é, $\Delta' > \Delta$). Na Figura 9A,

10 os receptores são espaçados próximos o bastante para impedir serrilhamento espacial, porque com os receptores separados pela distância Δ , a onda 904 pode ser reconstruída a partir das amplitudes registradas pelos receptores. Ao contrário, na Figura 9B, os receptores são espaçados de modo que o serrilhamento espacial não pode ser impedido. Uma curva de linha sólida

15 908 representa uma curva que é hipoteticamente reconstruída das amplitudes registradas medidas pelos receptores. Pelo fato dos receptores serem separados à distância, a onda construída 908 tem um comprimento de onda muito maior λ' do que o comprimento de onda real λ da onda original 904. Por conseguinte, os receptores da Figura 9B não podem ser usados para

20 reconstruir com segurança a onda original 904. Por conseguinte, os receptores da Figura 9B não podem ser usados para, com segurança, reconstruir a onda original 904.

O comprimento de onda Nyquist, λ_N , é o comprimento de onda espacial mais curto que pode ser com precisão recuperado por observações

25 sequenciais ao longo de uma linha de receptores com espaçamento Δ e é relacionado ao espaçador do receptor Δ por:

$$\lambda_N = 2\Delta \quad (1)$$

Os comprimentos de onda que são mais curtos do que o comprimento de onda Nyquist λ_N aparecem nos resultados medidos, mas esses comprimentos de onda são serrilhados em ondas com comprimentos de onda

30 mais longos, como descrito acima com referência à Figura 9, que erradamente sugere que a onda contém mais energia do que realmente existe

em certas faixas de frequência.

Em amostragem espacial, o espaçamento do receptor Δ é também relacionado ao número de onda Nyquist, k_N , como segue:

$$\frac{k_N}{2\pi} = \frac{1}{\lambda_N} = \frac{1}{2\Delta} \quad (2)$$

O número de onda Nyquist corresponde ao número máximo de
 5 ciclos por metro que pode ser corretamente recuperado por observação se-
 quencial. O serrilhamento espacial ocorre quando uma onda tem mais ciclos
 por metro do que k_N . Em outras palavras, o serrilhamento espacial ocorre
 quando o número de onda k associado com um campo de onda é maior do
 que o número de onda Nyquist k_N (isto é, $k > k_N$ ou $\lambda < \lambda_N$). O espaçamento
 10 do receptor Δ que é menor do que $\lambda_N/2$ assegura que o campo de onda real
 pode ser reconstruído do campo de onda medido.

Pressão de Composição e Campos de Onda de Velocidade Vertical nos Campos de Onda Ascendente e Descendente

O campo de onda de pressão P e o campo de onda de veloci-
 15 de vertical V_z podem ser decompostos em um campo de onda ascendente e
 um campo de onda descendente. Em outras palavras, o campo de onda de
 pressão P pode ser escrito como uma combinação de um campo de onda de
 pressão ascendente P^u e um campo de onda de pressão descendente P^d ,
 como segue:

$$P = P^u + P^d \quad (3)$$

Similarmente, o campo de onda de velocidade vertical V_z pode
 ser escrito como uma combinação de um campo de onda de velocidade ver-
 tical ascendente V_z^u e um campo de onda de velocidade vertical descenden-
 te V_z^d como segue:

$$V_z = V_z^u + V_z^d \quad (4)$$

Os campos de onda de pressão ascendente e descende e os
 campos de onda de velocidade vertical ascendente e descendente podem
 ser expressados como funções do campo de onda de pressão medido P e
 do campo de onda de velocidade vertical medido V_z por introdução de um

vetor de amplitude em escala:

$$\frac{\rho c}{\cos \theta} = \frac{Z}{\cos \theta} \quad (5)$$

onde ρ é a densidade do fluido, c é velocidade de som no fluido e Z é o valor de impedância acústica. O campo de onda de pressão ascendente é dado por:

$$p^u = \frac{1}{2} \left(p - \frac{Z}{\cos \theta} v_z \right) \quad (6a)$$

5 e o campo de onda de pressão descendente é dado por:

$$p^d = \frac{1}{2} \left(p + \frac{Z}{\cos \theta} v_z \right) \quad (6b)$$

De maneira análoga, o campo de onda de pressão ascendente é dado por:

$$v_z^u = \frac{1}{2} \left(v_z - \frac{\cos \theta}{Z} p \right) \quad (6c)$$

e o campo de onda de pressão descendente é dado por:

$$v_z^d = \frac{1}{2} \left(v_z + \frac{\cos \theta}{Z} p \right) \quad (6d)$$

10 Os campos de onda de pressão e velocidade ascendente e descendente representados em Equações (6) podem ser reescritos em termos dos componentes de campo de onda de velocidade horizontal medido v_x e v_y de modo a impedir a determinação do ângulo θ incidente como segue. Porque o campo de onda de velocidade vertical v_z é um componente do vetor do campo de onda de velocidade \vec{v} , a magnitude do campo de onda de velocidade vertical é dada por:

$$|v_z| = \|\vec{v}\| \cos \theta \quad (7)$$

onde $|\cdot|$ é o valor absoluto ou módulo de um número complexo; e

$$\|\vec{v}\| = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2} \quad (8)$$

onde $\|\cdot\|$ representa a magnitude, ou norma, de um vetor. Porque as velocidades v_x , v_y , e v_z são conhecidas, o fator de escala dependente de ângulo

dado na Equação (5) pode ser reescrita usando as Equações (7) e (8) como:

$$\frac{Z}{\cos \theta} = Z \frac{\|\vec{V}\|}{|V_z|} \quad (9)$$

Substituindo o fator de escala dado por Equações (9) e (10) em Equações (6) dá:

$$p^u = \frac{1}{2} \left(P - \frac{Z \|\vec{V}\|}{|V_z|} V_z \right) \quad (11a)$$

$$p^d = \frac{1}{2} \left(P + \frac{Z \|\vec{V}\|}{|V_z|} V_z \right) \quad (11b)$$

$$V_z^u = \frac{1}{2} \left(V_z - \frac{|V_z|}{Z \|\vec{V}\|} P \right) \quad (11c)$$

e

$$V_z^d = \frac{1}{2} \left(V_z + \frac{|V_z|}{Z \|\vec{V}\|} P \right) \quad (11d)$$

- 5 Expressando o fator de escala como uma função das velocidades horizontal e vertical, a separação do campo de onda pode ser executada localmente e independente de informação de traços adjacentes.

- O fator de escala pode ser ainda reduzido para uma função de somente campos de velocidade horizontal V_x e V_y e do campo de onda de pressão P usando princípios de teoria de raio. Depois do campo de onda de velocidade vertical ter sido eliminado do fator de escala, a separação do campo de onda não é comprometida pela sobreposição entre os sinais de campo de onda ascendente e descendente até os maiores ângulos de incidência. O vetor de lentidão, \vec{p} , é um vetor direcionado, em meio isotrópico, perpendicular à frente da onda de um campo de onda e é representado por:

$$\vec{p} = (p_x, p_y, p_z) \quad (12)$$

onde os componentes do vetor de lentidão são relacionados aos componentes dos campos de ondas de velocidade como segue:

$$p_x = \frac{\rho |V_x|}{|p|} = \frac{\rho |V_x|}{|p^u + p^d|} \quad (13a)$$

$$p_y = \frac{\rho |V_y|}{|P|} = \frac{\rho |V_y|}{|pu + pd|} \quad (13b)$$

e

$$p_z = \frac{\rho |V_z|}{|pu - pd|} \quad (13c)$$

A Figura 10 mostra um sistema coordenado Cartesiano com a origem 1000 centrada em três sensores de movimento de um receptor (não mostrado). Os componentes do vetor de lentidão 1002 $\vec{p}_x(x_r, y_r, z_r, t)$ 1003, $p_y(x_r, y_r, z_r, t)$ 1004, e $p_z(x_r, y_r, z_r, t)$ 1005 são direcionados ao longo de eixos coordenados x -, y - e z . O vetor de lentidão \vec{p} tem o mesmo ângulo polar θ com respeito ao eixo z uma vez que o vetor de velocidade \vec{v} tem com o eixo z mostrado na Figura 8.

A magnitude do vetor de lentidão é

$$\|\vec{p}\| = \sqrt{p_x^2 + p_y^2 + p_z^2} = \frac{1}{c} \quad (14)$$

10 Usando as Equações (13a), (13b) e (14), o componente do vetor de lentidão na direção z , p_z , pode ser reescrito como uma função dos campos de ondas de velocidade horizontal x - e y - e do campo de onda de pressão como segue:

$$p_z = \sqrt{\frac{1}{c^2} - \frac{\rho^2 |V_x|^2}{|P|^2} - \frac{\rho^2 |V_y|^2}{|P|^2}} \quad (15)$$

15 Multiplicando o vetor de lentidão \vec{p} por c dá o vetor de lentidão da unidade, $\hat{p} = c\vec{p}$, com os componentes:

$$\hat{p}_x = \frac{Z |V_x|}{|P|} = \frac{Z |V_x|}{|pu + pd|} \quad (16a)$$

$$\hat{p}_y = \frac{Z |V_y|}{|P|} = \frac{Z |V_y|}{|pu + pd|} \quad (16b)$$

e

$$\hat{p}_z = \frac{Z |V_z|}{|pu - pd|} \quad (16c)$$

O cosseno do ângulo polar θ entre o vetor de lentidão da unidade \hat{p} e o componente $z \hat{p}_z$ é:

$$\cos \theta = \frac{|\hat{p}_z|}{\|\hat{p}\|} = \sqrt{1 - \hat{p}_x^2 - \hat{p}_y^2} = \sqrt{1 - \frac{Z^2|V_x|^2}{|P|^2} - \frac{Z^2|V_y|^2}{|P|^2}} \quad (17)$$

Substituindo a Equação (17) no fator de escala da Equação (5) dá um fator de escala que depende somente dos campos de onda de velocidade horizontal V_x e V_y e do campo de onda de pressão P :

$$\frac{Z}{\cos \theta} = \frac{Z}{\sqrt{1 - \frac{Z^2|V_x|^2}{|P|^2} - \frac{Z^2|V_y|^2}{|P|^2}}} \quad (18)$$

Substituindo o fator de escala dado pela Equação (18) em Equações (6) dá campos de ondas ascendentes e descendentes:

$$p^u = \frac{1}{2} \left(P - \frac{Z}{\sqrt{1 - \frac{Z^2|V_x|^2}{|P|^2} - \frac{Z^2|V_y|^2}{|P|^2}}} V_z \right) \quad (19a)$$

$$p^d = \frac{1}{2} \left(P + \frac{Z}{\sqrt{1 - \frac{Z^2|V_x|^2}{|P|^2} - \frac{Z^2|V_y|^2}{|P|^2}}} V_z \right) \quad (19b)$$

$$V_z^u = \frac{1}{2} \left(V_z - \frac{\sqrt{1 - \frac{Z^2|V_x|^2}{|P|^2} - \frac{Z^2|V_y|^2}{|P|^2}}}{Z} P \right) \quad (19a)$$

e

$$V_z^d = \frac{1}{2} \left(V_z + \frac{\sqrt{1 - \frac{Z^2 |V_x|^2}{|P|^2} - \frac{Z^2 |V_y|^2}{|P|^2}}}{Z} P \right) \quad (19b)$$

Os campos de onda nas Equações (19) são computados para todos os ângulos localmente no domínio de espaço-tempo sem usar de traços adjacentes. O resultado dessa abordagem de traço único é que a separação do campo de onda não é influenciada por amostragem espacial e a separação de campo de onda não é afetada por serrilhamento espacial.

Usando o vetor de lentidão local e o vetor de posição, os sinais de um traço podem ser extrapolados além do serrilhamento espacial. Por exemplo, rastreando o raio tanto para cima quanto para baixo de uma posição inicial em um nível de separação para uma posição final, em um nível de profundidade arbitrária, os sinais de um traço podem ser extrapolados além do serrilhamento. A formação subterrânea ascendente é extrapolada para cima em direção ao tempo e para baixo para trás em tempo. Por outro lado, os sinais de um campo de onda descendente são extrapolados para cima para trás em tempo e para baixo para diante em tempo. Por exemplo, um tempo de demora, Δt , ao longo de um raio entre uma posição inicial de um canal x e uma posição de extrapolação final $\vec{x} + \Delta \vec{x}$ pode ser calculado em meios homogêneos por:

$$\Delta t = \frac{\rho |V_x|}{|P|} \Delta x + \frac{\rho |V_y|}{|P|} \Delta y + \sqrt{\frac{1}{c^2} - \frac{\rho^2 |V_x|^2}{|P|^2} - \frac{\rho^2 |V_y|^2}{|P|^2}} \Delta z \quad (20)$$

onde os componentes do vetor de lentidão foram expressados pelos componentes do formação subterrânea de velocidade horizontal dados pelas Equações (13a), (13B) e (15).

Em uma outra modalidade, a separação do campo de onda pode ser executada no domínio de frequência de número de onda aplicando uma transformada, tal como uma transformada de Fourier, para os campos de onda medidos V_x , V_y , e V_z e o campo de onda de pressão P antes da inserção em equações para os campos de ondas ascendentes e descendentes apre-

sentados acima em Equações (19). Por exemplo, os campos de onda medidos V_x , V_y , e V_z e o campo de onda de pressão P podem ser transformados usando uma transformada de Fourier:

$$\begin{aligned} V_x(x_r, y_r, z_r, t) &\xrightarrow{FT} \tilde{V}_x(k_x, k_y, z_r, \omega), \\ V_y(x_r, y_r, z_r, t) &\xrightarrow{FT} \tilde{V}_y(k_x, k_y, z_r, \omega), \\ V_z(x_r, y_r, z_r, t) &\xrightarrow{FT} \tilde{V}_z(k_x, k_y, z_r, \omega), \text{ e} \\ P(x_r, y_r, z_r, t) &\xrightarrow{FT} \tilde{P}(k_x, k_y, z_r, \omega) \end{aligned} \quad (21)$$

- 5 onde “~” representa quantidades no domínio de frequência de número de onda, $\omega = 2\pi f$ é a frequência angular para a frequência f , e k_x e k_y são números de onda nas direções x- e y-, respectivamente. Na prática, a transformada de Fourier pode ser executada como uma transformada Rápida de Fourier discreta (“DFFT”) para velocidade e eficiência computacional. A lentidão vertical no domínio de frequência de número de onda é dado por:

$$\tilde{\rho}_z = \sqrt{\frac{1}{c^2} \frac{\rho^2 |\tilde{V}_x|^2}{|\tilde{P}|^2} + \frac{\rho^2 |\tilde{V}_y|^2}{|\tilde{P}|^2}} \quad (22)$$

- 10 O cálculo de campos de onda ascendente e descendente usando os campos de onda de velocidade medidos transformados \tilde{V}_x , \tilde{V}_y , e \tilde{V}_z e o campo de onda de pressão \tilde{P} no domínio de frequência de número de onda é dado por:

$$\rho u = \frac{1}{2} \left(\tilde{P} - \frac{Z}{\sqrt{1 - \frac{Z^2 |\tilde{V}_x|^2}{|\tilde{P}|^2} - \frac{Z^2 |\tilde{V}_y|^2}{|\tilde{P}|^2}}} \tilde{V}_z \right) \quad (23a)$$

$$\bar{p}^d = \frac{1}{2} \left(\bar{p} + \frac{Z}{\sqrt{1 - \frac{Z^2 |\bar{v}_x|^2}{|\bar{p}|^2} - \frac{Z^2 |\bar{v}_y|^2}{|\bar{p}|^2}}} \bar{v}_z \right) \quad (23b)$$

$$\bar{v}_z^u = \frac{1}{2} \left(\bar{v}_z - \frac{\sqrt{1 - \frac{Z^2 |\bar{v}_x|^2}{|\bar{p}|^2} - \frac{Z^2 |\bar{v}_y|^2}{|\bar{p}|^2}}}{Z} \bar{p} \right) \quad (23c)$$

e

$$\bar{v}_z^d = \frac{1}{2} \left(\bar{v}_z + \frac{\sqrt{1 - \frac{Z^2 |\bar{v}_x|^2}{|\bar{p}|^2} - \frac{Z^2 |\bar{v}_y|^2}{|\bar{p}|^2}}}{Z} \bar{p} \right) \quad (23d)$$

Os campos de ondas ascendentes e descendentes computados em Equações (23) no domínio de plano de onda podem também ser derivados em uma abordagem similar iniciando com a equação Helmholtz e seguindo as regras de propagação de onda. No entanto, a abordagem apresentada em Equações (23) usa os raios de amplitude (isto é, raios de espectro) dos campos de ondas de velocidade horizontal e do campo de onda de pressão para escala em contraste a outras técnicas, onde os valores de frequência e número de onda são diretamente usados do domínio de frequência de número de onda. Pelo fato dos raios espectrais em Equações (23) não serem afetados por serrilhamento, o método de separação descrito acima trabalha com segurança além do serrilhamento.

Os campos de ondas originais ascendentes e descendentes no domínio de espaço de tempo podem ser recuperados por aplicação de uma transformada inversa aos campos de ondas ascendentes e descendentes no domínio de frequência de número de onda:

$$\begin{aligned}
\tilde{P}^u(k_x, k_y, z_r, \omega) &\xrightarrow{IFT} P^u(x_r, y_r, z_r, t), \\
\tilde{P}^d(k_x, k_y, z_r, \omega) &\xrightarrow{IFT} P^d(x_r, y_r, z_r, t), \\
\tilde{V}_z^u(k_x, k_y, z_r, \omega) &\xrightarrow{IFT} V_z^u(x_r, y_r, z_r, t), \text{ e} \\
\tilde{V}_z^d(k_x, k_y, z_r, \omega) &\xrightarrow{IFT} V_z^d(x_r, y_r, z_r, t)
\end{aligned} \tag{24}$$

Na prática, a transformação inversa pode ser executada usando uma inversa transformada rápida de Fourier para velocidade e eficiência computacional.

Os princípios de campo de onda podem também ser usados com extrapolação de campo de onda no domínio de frequência de número de onda. Uma descrição detalhada incluindo um exemplo de dados sintéticos é apresentada abaixo.

10 Um Exemplo de Método e Sistema Computacional para Impedir Serrilhamento Espacial em Extrapolação de Campos de Onda

No domínio de frequência de número de onda, campos de ondas ascendentes e descendentes podem ser extrapolados na direção z positiva (isto é, para baixo) usando um extrapolador dado por:

$$\tilde{U}(k_x, k_y, z + \Delta z, \omega) = \tilde{U}(k_x, k_y, z, \omega) e^{i\omega \tilde{p}_z \Delta z} \tag{25a}$$

$$\tilde{D}(k_x, k_y, z + \Delta z, \omega) = \tilde{D}(k_x, k_y, z, \omega) e^{-i\omega \tilde{p}_z \Delta z} \tag{25b}$$

onde \tilde{U} representa os campos de onda ascendentes \tilde{P}^u and \tilde{V}_z^u , e \tilde{D} representam os campos de onda descendentes \tilde{P}^d e \tilde{V}_z^d no domínio de frequência de número de onda, e Δz representa a extrapolação do tamanho de etapa. Por outro lado, o campo de onda pode ser extrapolado na direção z negativa (isto é, para cima) usando um extrapolador dado por:

$$\tilde{U}(k_x, k_y, z - \Delta z, \omega) = \tilde{U}(k_x, k_y, z, \omega) e^{-i\omega \tilde{p}_z \Delta z} \tag{26a}$$

$$\tilde{D}(k_x, k_y, z - \Delta z, \omega) = \tilde{D}(k_x, k_y, z, \omega) e^{i\omega \tilde{p}_z \Delta z} \tag{26b}$$

A figura 11 mostra uma representação exemplar de plano xz de extrapolação de campo de onda de uma profundidade z abaixo de uma superfície livre, onde W representa o campo de onda ascendente ou descen-

dente. Uma seta direcional 1102 representa o eixo x , a seta direcional 1104 representa o eixo z , e a curva 1106 representa a superfície livre. Por convenção, a linha tracejada 1108 representa uma profundidade de z abaixo da superfície livre 1106. Quando o expoente do termo exponencial é positivo (isto é, $\Delta z > 0$), um campo de onda ascendente é extrapolado para baixo na direção de valores z maiores (isto é, $z + \Delta z$) como indicado pela seta direcional 1110. Por outro lado, quando o expoente do termo exponencial é negativo (isto é, $\Delta z < 0$), o campo de onda é extrapolado para cima na direção de valores z menores (isto é, $z - \Delta z$) como indicado pela seta direcional 1112. Perceba que para extrapolação de um campo de onda ascendente usando as Equações (25b) e (26b), os sinais do expoente no termo exponencial são opostos.

As Equações (25) apresentam extrapolação do campo de onda como multiplicando o campo de onda no domínio de frequência de número de onda por exponenciais que são funções do componente vertical do vetor mais lento, \tilde{p}_z . Da Equação (14), o componente vertical do vetor de lentidão no domínio de frequência pode ser escrito como uma função dos componentes do vetor de lentidão horizontal como segue:

$$\tilde{p}_z = \sqrt{\frac{1}{c^2} - \tilde{p}_x^2 - \tilde{p}_y^2} \quad (27)$$

O componente vertical é relacionado ao número de onda vertical k_z como segue:

$$\begin{aligned} \omega \tilde{p}_z &= \omega \sqrt{\frac{1}{c^2} - \tilde{p}_x^2 - \tilde{p}_y^2} \\ &= \omega \sqrt{\frac{1}{c^2} - \frac{k_x^2}{\omega^2} - \frac{k_y^2}{\omega^2}} = k_z \end{aligned} \quad (28)$$

Como explicado acima no Serrilhamento Espacial de subseção, o serrilhamento pode ser impedido nas direções em linha e linha cruzada quando os receptores são espaçados de modo que $k_x < k_N$ e $k_y < k_N$.

A Figura 12 mostra um exemplo de plote da frequência angular ω como uma função do número de onda horizontal k_x . A seta direcional 1201 é o eixo k_x do número de onda horizontal, e a seta direcional 1202 é o eixo de frequência angular ω . A linha 1203 representa contribuições de onda plana livre de serrilhamento à frequência angular ω como uma função do número de onda horizontal k_x . As ondas de plano livres de serrilhamento têm uma frequência angular ω igual a zero quando o número de onda associado K_x é zero. Por contraste, a linha 1204 representa contribuições de onda plana serrilhada à frequência angular ω como uma função do número de onda horizontal k_x . O ponto 1206 representa uma onda plana $k_x = 0$ e uma frequência angular não zero. Os pontos ao longo da linha 1204, representam ondas planas associadas com serrilhamento espacial e são incorretamente mapeadas, ou dobradas de volta, de números de onda $k_x > k_y$. Como um resultado, a extrapolação de um campo de onda usando Equações (25)-(28) é interrompido quando os campos de ondas são serrilhados espacialmente em pelo menos uma das direções horizontais. Por exemplo, calculando $\tilde{p}_x = k_x/\omega$ com números de onda e frequências angulares localizados ao longo da linha 1204 resulta em um valor pequeno incorreto para \tilde{p}_x , que, por sua vez, incorretamente aumenta o tamanho do componente vertical do vetor de lentidão \tilde{p}_z . Um argumento similar se aplica ao outro número de onda horizontal k_y , que do mesmo modo resulta em um \tilde{p}_y pequeno. Em outras palavras, quando medições do campo de onda são espacialmente serrilhadas, a extrapolação do campo de onda no domínio de frequência de número de onda usando o extrapolador dado pelas Equações (25)-(28) não pode ser confiada. Por exemplo, o extrapolador dado pelas (25)-(28) não pode ser usado para calcular uma imagem precisa de uma formação subterrânea, porque o componente vertical calculado \tilde{p}_z é interrompido por serrilhamento espacial associado com um ou ambos os componentes horizontais \tilde{p}_x e \tilde{p}_y .

De modo a impedir as complicações de serrilhamento espacial quando extrapolando o campo de onda, os componentes do vetor de lentidão horizontal podem ser calculados dos campos de onda de velocidade horizontal medida e dos campos de onda de pressão medida como segue:

$$\tilde{p}_x = \frac{\rho |\tilde{V}_x(k_x, k_y, z, \omega)|}{|\tilde{P}(k_x, k_y, z, \omega)|} \quad (29a)$$

e

$$\tilde{p}_y = \frac{\rho |\tilde{V}_y(k_x, k_y, z, \omega)|}{|\tilde{P}(k_x, k_y, z, \omega)|} \quad (29b)$$

Os raios de amplitude (isto é, raios espectrais) dos campos de ondas de velocidade horizontal e do campo de onda de pressão podem ser calculados da equação de movimento:

$$\frac{\rho |\tilde{V}_x|}{|\tilde{P}|} = \left| \frac{k_x}{\omega} \right|$$

5 e

$$\frac{\rho |\tilde{V}_y|}{|\tilde{P}|} = \left| \frac{k_y}{\omega} \right|$$

As equações de movimento são independentes de posição no domínio de frequência de número de onda para quaisquer valores dos números de onda k_x and k_y e frequências angulares ω . Em outras palavras, as Equações (29) possibilitam computação dos componentes do vetor de lenti-
 10 dão horizontal \tilde{p}_x e \tilde{p}_y , sem interrupções devido ao serrilhamento espacial. Como um resultado, os campos de ondas ascendentes e descendentes podem ser extrapolados na direção z positiva e negativa além do serrilhamento usando as Equações (25) e (26), onde o componente vertical do vetor de lenti-
 15 dão é calculado por:

$$\tilde{p}_z = \sqrt{\frac{1}{c^2} \frac{\rho^2 |\tilde{V}_x(k_x, k_y, z, \omega)|^2}{|\tilde{P}(k_x, k_y, z, \omega)|^2} + \frac{\rho^2 |\tilde{V}_y(k_x, k_y, z, \omega)|^2}{|\tilde{P}(k_x, k_y, z, \omega)|^2}} \quad (30)$$

Perceba que a estabilização numérica pode ser usada em cálculos que envolvem raios de amplitude de campo de onda.

Na abordagem do domínio de espaço de tempo local (traço único), os campos de ondas ascendentes e descendentes podem ser extrapolados na direção z positiva por Δz (isto é, para baixo) usando um extrapolador dado por:

20

$$U(x, y, z + \Delta z, t) = A_1 U(x, y, z, t) e^{i\omega \Delta t} \quad (31a)$$

$$D(x, y, z + \Delta z, t) = A_2 D(x, y, z, t) e^{-i\omega \Delta t} \quad (31b)$$

onde U representa os campos de ondas ascendentes P^u e V_z^u , e D representa os campos de ondas descendentes P^d e V_z^d no domínio de espaço de tempo, e Δt representa o tempo de demora da Equação (20). O campo de

5 onda pode ser extrapolado na direção z negativa (isto é, para cima) usando um extrapolador dado por:

$$U(x, y, z - \Delta z, t) = A_3 U(x, y, z, t) e^{-i\omega \Delta t} \quad (32a)$$

$$D(x, y, z - \Delta z, t) = A_4 D(x, y, z, t) e^{i\omega \Delta t} \quad (32b)$$

Os fatores multiplicativos A_1 , A_2 , A_3 , e A_4 em Equações (31) e (32) são introduzidos para explicar mudanças de amplitude devido à exploração. Pelo fato dos componentes de vetor de lentidão horizontal p_x and p_y 10 poderem ser calculados a partir dos campos de onda de velocidade horizontal medida e dos campos de onda de pressão medida, as complicações computacionais devido ao serrilhamento espacial são impedidas. A estabilização numérica pode também ser usada em cálculos que envolvem raios de amplitude de campo de onda em domínio de tempo.

15 A Figura 13A mostra um diagrama de fluxo de um método para extrapolar um campo de onda no domínio de espaço de tempo. No bloco 1301 da Figura 13A, os dados do campo de onda de pressão medida P e do campo de onda de velocidade do vetor medida $\vec{V}(V_x, V_y, V_z)$ são recebidos. O campo de onda de pressão pode ser obtido de sensores de pressão que 20 medem o campo de onda de pressão total em todas as direções, e os componentes do campo de onda da velocidade do vetor V_x , V_y , e V_z podem ser obtidos de sensores de movimento separados que medem os campos de ondas nas direções x -, y -, e z -, como descrito acima com referência à Figura 6. No bloco 1302, o campo de onda de pressão e os campos de ondas de 25 velocidade são transformados a partir do domínio de espaço de tempo para o domínio de frequência do número de onda para obter campos de ondas transformados \bar{P} , \bar{V}_x , \bar{V}_y , e \bar{V}_z . Por exemplo, os campos de ondas podem ser transformados a partir do domínio de espaço de tempo para o domínio de

frequência do número de onda usando uma transformada Rápida de Fourier para eficiência computacional e velocidade, como descrito acima com referência à Equação (21). No bloco 1303, o campo de onda de pressão medida é decomposto em campos de ondas ascendentes e descendentes \tilde{p}^u e \tilde{p}^d de acordo com as Equações (23a-b). No bloco 1304, o campo de onda de velocidade do vetor medida é decomposto nos campos de ondas de velocidade vertical ascendentes e descendentes \tilde{v}^u e \tilde{v}^d de acordo com as Equações (23c-d). Perceba que a ordem em que as operações dos blocos 1303 e 1304 são executadas não é limitada ao bloco 1303 sendo executadas antes da execução das operações do bloco 1304. Alternativamente, a ordem das operações nos blocos 1303 e 1304 podem ser invertidas ou essas operações podem ser executadas em paralelo. No bloco 1305, o componente vertical do vetor de lentidão, $\tilde{\beta}_z$, é calculado como uma função dos campos de ondas horizontais medidos e do campo de onda de pressão medida, como descrito acima com referência à Equação (30). No bloco 1306, um campo de onda de pressão ascendente ou descendente é extrapolado na direção z usando as Equações (25-26).

A Figura 13B mostra um diagrama de fluxo de um método para extrapolar um campo de onda localmente no domínio de tempo. No bloco 1311 da Figura 13B, os dados do campo de onda de pressão medido P e do campo de onda de velocidade do vetor medida $\vec{v}(v_x, v_y, v_z)$ são recebidos. O campo de onda de pressão pode ser obtido de sensores de pressão que medem o campo de onda de pressão total em todas as direções, e os componentes do campo de onda da velocidade do vetor v_x , v_y , e v_z podem ser obtidos de sensores de movimento separados que medem os campos de ondas nas direções x-, y-, e z- como descrito acima com referência à Figura 6. No bloco 1312, o campo de onda de pressão é decomposto em campos de ondas ascendentes e descendentes \tilde{p}^u e \tilde{p}^d de acordo com as Equações (19a-b). No bloco 1313, o campo de onda de velocidade do vetor medida é decomposto em campos de ondas de velocidade vertical ascendentes e descendentes \tilde{v}^u and \tilde{v}^d de acordo com as Equações (19c-d). Perceba que a ordem em que as operações dos blocos 1312 e 1313 são executadas não

é limitada ao bloco 1312 sendo executada antes da execução das operações do bloco 1313. Alternativamente, a ordem das operações nos blocos 1312 e 1313 pode ser invertida ou essas operações podem ser executadas em paralelo. No bloco 1314, os componentes verticais do vetor de lentidão, P_x , P_y , e P_z são calculados como funções dos campos de onda de velocidade horizontal medida e do campo de onda de pressão medida, como descrito acima com referência às Equações (15), (16a) e (16b). No bloco 1315, um campo de onda de pressão ascendente ou descendente é extrapolado na direção z usando a Equação (31)-(32).

10 A Figura 14 mostra um exemplo de um sistema de computador generalizado que executa um eficiente método para extrapolar campos de ondas enquanto desviam de serrilhamento espacial e, por isso, representa um sistema de processamento de dados de análise sísmica. Os componentes internos de sistemas de computador muito pequenos, de tamanho médio e grande, bem como sistemas de armazenagem com base em processador especializado, podem ser descritos com respeito a essa arquitetura generalizada, embora cada sistema particular possa caracterizar muitos adicionais componentes, subsistemas e sistemas similares, paralelos com arquiteturas similares a essa arquitetura generalizada. O sistema de computador contém uma ou múltiplas unidades de processamento central ("CPUs") 1402-1405, uma ou mais memórias eletrônicas 1408 interconectadas com as CPUs através de uma CPU/barramento do sistema de memória 1410 ou múltiplos barramentos, uma primeira ponte 1412 que interconecta a CPU/barramento do sistema de memória 1410 com barramentos adicionais 1414 e 1416, ou outros tipos de meios de interconexão de alta velocidade, incluindo múltiplos interconectores em série de alta velocidade. Os barramentos ou interconexões em série, por sua vez, conectam as CPUs e memória com processadores especializados, tais como um processador de gráficos 1418 e com uma ou mais adicionais pontes 1420, que são interconectadas com links em série de alta velocidade ou com múltiplos controladores 1422-1427, tais como o controlador 1427, que fornece acesso a vários diferentes tipos de meios legíveis por computador, tais como o meio legível por computador 1428, mos-

tradores eletrônicos, dispositivos de entrada e outros tais componentes, sub-componentes e recursos computacionais. Os mostradores eletrônicos, incluindo tela de mostrador, autofalantes de áudio e outras interfaces de saída e os dispositivos de entrada, incluindo mouses, teclados, telas de toque e outras tais interfaces de entrada, juntos constituem interfaces de entrada e de saída que permitem que o sistema de computador interaja com usuários humanos. O meio legível por computador 1428 é um dispositivo de armazenagem de dados, incluindo memória eletrônica, ótica ou disco rígido magnético, drive USB, memória flash e outros tais dispositivos de armazenagem de dados. O meio legível por computador 1428 pode ser usado para armazenar instruções legíveis por máquina que codificam os métodos computacionais descritos acima e podem ser usados para armazenar dados codificados, durante operações de armazenagem e do que os dados codificados podem ser recuperados, durante operações de leitura por sistemas de computador, sistemas de armazenagem de dados e dispositivos periféricos.

Resultados Experimentais

As Figuras 15A-15G mostram plotes de campos de ondas de pressão calculada versus tempo. A Figura 15A mostra dados de campo de onda de pressão total que foram gerados usando o método de modelagem reflectiva, que representam os dados medidos por um hidrofone. A Figura 15B mostra o campo de onda de pressão ascendente obtido da Equação (21a). A Figura 15C mostra um campo de onda de pressão ascendente modelado. A Figura 15D mostra a diferença entre o calculado usando a Equação (21a) e o caso ideal apresentado na Figura 15C. A Figura 15D revela que o campo de onda de pressão ascendente calculada da Equação (21a) é uma aproximação muito boa ao campo de onda de pressão ascendente de refletividade modelada mostrado na Figura 15C porque muito da Figura 15D está vazio. As figuras 15E-15G mostram o efeito de separação e extrapolação do campo de onda. A Figura 15E mostra o campo de onda de pressão ascendente representado na Figura 15B depois de extrapolação para diante por 15 metros para cima para a superfície livre, multiplicação por -1 (o coeficiente de reflexão da superfície livre), e a extrapolação descendente para 15

metros outra vez. O campo de onda mostrado na Figura 15E, resultante em um campo de onda descendente no nível receptor que foi adicionado ao campo de onda ascendente modelado (ideal) mostrado na Figura 15A dá o campo de onda de pressão total mostrado na Figura 14F. A Figura 15G mostra o erro de separação e extrapolação que resultou de subtração do campo de onda mostrado na Figura 15f do campo de pressão total modelado mostrado na Figura 15A.

Embora a presente invenção tenha sido descrita em termos de modalidades particulares, a descrição não é pretendida ser limitada a essas modalidades. Por exemplo, qualquer número de diferentes implementações do método de processamento computacional que executam extrapolação eficiente do campo de onda usando componentes do vetor de lentidão horizontal que dependem de campos de onda de velocidade horizontal medida e campos de onda de pressão medida podem ser designado e desenvolvido usando várias diferentes linguagens de programação e plataformas de computador e variando diferentes parâmetros de implementação, incluindo estruturas de controle, variáveis, estruturas de dados, organização modular e outros tais parâmetros. As representações computacionais de campos de ondas, operadores e outros objetos computacionais podem ser implementados de diferentes maneiras.

É apreciado que a descrição prévia das modalidades descritas é fornecida para possibilitar que qualquer pessoa versada na técnica faça ou use a presente descrição. Várias modificações a essas modalidades estarão prontamente aparentes para aqueles versados na técnica e os princípios genéricos definidos aqui podem ser aplicados a outras modalidades sem se afastar do espírito ou escopo da descrição. Por conseguinte, a presente descrição não é pretendia ser limitada às modalidades mostradas aqui, mas é para ser acordado o mais amplo escopo consistente com os princípios e novas características descritas aqui.

REIVINDICAÇÕES

1. Método para extrapolar um campo de onda a ser executado por um sistema de computador que inclui um ou mais processadores e um ou mais dispositivos de armazenagem de dados, o método compreendendo:

5 receber um campo de onda de pressão medida, um campo de onda de velocidade do vetor medida e dois campos de onda de velocidade horizontal medida;

 decompor um do campo de onda de pressão e o campo de onda de velocidade vertical em um campo de onda ascendente e um campo de
10 onda descendente;

 calcular componentes de um vetor de lentidão da velocidade de som em um fluido, densidade do fluido, o campo de onda de pressão medida e os dois campos de ondas de velocidade horizontal, e

 extrapolar um dos campos de ondas ascendentes e descendentes usando um extrapolador que dependa dos componentes do vetor de lentidão.
15

2. Método de acordo com a reivindicação 1, em que decompor um do campo de onda de pressão e o campo de onda de velocidade vertical em um campo de onda ascendente e um campo de onda descendente adicionalmente compreende:
20

 calcular um fator de escala de um valor de impedância acústica, o campo de onda de pressão medida e os dois campos de ondas de velocidade horizontal; e

 calcular um do campo de onda ascendente e o campo de onda descendente do campo de onda de pressão medida, o campo de onda de
25 velocidade vertical e o fator de escala.

3. Método de acordo com a reivindicação 1, em que decompor um do campo de onda de pressão e o campo de onda de velocidade vertical em um campo de onda ascendente e um campo de onda descendente adicionalmente compreende:
30

 calcular um fator de escala de um valor de impedância acústica, o campo de onda de velocidade do vetor medida e os dois campos de ondas

de velocidade horizontal; e

calcular um do campo de onda ascendente e o campo de onda descendente do campo de onda de pressão medida, o campo de onda de velocidade vertical e o fator de escala.

5 4. Método de acordo com a reivindicação 1, em que o campo de onda de pressão e os campos de ondas de velocidade são obtidos de receptores dispostos em pelo menos um do seguinte: um ou mais linhas de fluxo rebocadas, um ou mais cabos de fundo oceânico e um ou mais pontos autônomos.

10 5. Método de acordo com a reivindicação 1, adicionalmente compreende transformar o campo de onda de pressão medida, o campo de onda de velocidade vertical e o campo de onda de velocidade horizontal em um domínio de frequência do número de onda.

15 6. Método de acordo com a reivindicação 1, em que o campo de onda de pressão medida, o campo de onda de velocidade vertical e o campo de onda de velocidade horizontal estão em um domínio de espaço de tempo.

7. Método de acordo com a reivindicação 1, em que extrapolar adicionalmente compreende extrapolar à superfície livre do fluido.

20 8. Método de acordo com a reivindicação 1, em que pelo menos um dos campos de onda de velocidade horizontal medida é espacialmente serrilhado.

25 9. Método de sismologia de exploração compreendendo:
medir um campo de onda de pressão, um campo de onda de velocidade vertical e dois campos de ondas de velocidade horizontal em receptores; e

extrapolar um de um campo de ondas ascendentes e descendentes usando um extrapolador que depende de componentes de um vetor de lentidão, em que extrapolar compreende:

30 decompor um do campo de onda de pressão e do campo de onda de velocidade vertical no campo de onda ascendente e no campo de onda descendente; e

calcular os componentes do vetor de lentidão da velocidade de

som em um fluido, densidade do fluido, o campo de onda de pressão e dois campos de ondas de velocidade horizontal.

5 10. Método de acordo com a reivindicação 9, em que decompor um do campo de onda de pressão e do campo de onda de velocidade vertical em um campo de onda ascendente e um campo de onda descendente adicionalmente compreende:

calcular um fator de escala de um valor de impedância acústica, do campo de onda de pressão medida e dos dois campos de ondas de velocidade horizontal; e

10 calcular um do campo de onda ascendente e do campo de onda descendente do campo de onda de pressão medida, a campo de onda de velocidade vertical e o fator de escala.

15 11. Método de acordo com a reivindicação 9, em que decompor um do campo de onda de pressão e do campo de onda de velocidade vertical em um campo de onda ascendente e um campo de onda descendente adicionalmente compreende:

calcular um fator de escala de um valor de impedância acústica, do campo de onda de velocidade do vetor medida e dos campos de ondas de velocidade horizontal; e

20 calcular um do campo de onda ascendente e do campo de onda descendente do campo de onda de pressão medida, do campo de onda de velocidade vertical e do fator de escala.

25 12. Método de acordo com a reivindicação 9, em que o campo de onda de pressão e os campos de ondas de velocidade são obtidos de receptores dispostos em pelo menos um do seguinte: um ou mais linhas de fluxo rebocadas, um ou mais cabos de fundo oceânico e um ou mais pontos autônomos.

30 13. Método de acordo com a reivindicação 9, adicionalmente compreende transformar o campo de onda de pressão medida, o campo de onda de velocidade vertical e o onda de velocidade horizontal em um domínio de frequência do número de onda.

14. Método de acordo com a reivindicação 9, em que o campo

de onda de pressão medida, o campo de onda de velocidade vertical e o onda de velocidade horizontal estão em um domínio de espaço de tempo.

15. Método de acordo com a reivindicação 9, em que extrapolar adicionalmente compreende extrapolar para a superfície livre do fluido.

5 16. Método de acordo com a reivindicação 9, em que pelo menos um dos dois campos de onda de velocidade horizontal medida é espacialmente serrilhado.

10 17. Método de acordo com a reivindicação 9, em que o campo de onda de pressão, o campo de onda de velocidade vertical e os dois campos de ondas de velocidade horizontal são medidos com receptores localizados em diferentes profundidades.

15 18. Método de acordo com a reivindicação 9, em que medir um campo de onda de pressão, um campo de onda de velocidade vertical e dois campos de ondas de velocidade horizontal adicionalmente compreende acionar uma fonte rebocada e medir o campo de onda de pressão, o campo de onda de velocidade vertical e os dois campos de ondas de velocidade horizontal com receptores rebocados.

20 19. Sistema de computador compreendendo:
um ou mais processadores;
um ou mais dispositivos de armazenagem de dados; e
instruções legíveis por máquina armazenadas em um ou mais do
um ou mais dispositivos de armazenagem de dados e executados por um ou
mais processadores, as instruções direcionadas para

25 recuperar um campo de onda de pressão medida, um campo de onda de velocidade do vetor medida e dois campos de onda de velocidade horizontal medida de um ou mais dispositivos de armazenagem de dados,

calcular componentes de um vetor de lentidão da velocidade do som em um fluido, densidade do fluido, campo de onda de pressão medida e os dois campos de ondas de velocidade horizontal;

30 extrapolar um de um campo de ondas ascendentes e descendentes usando um extrapolador que depende dos componentes do vetor de lentidão; e

armazenar o campo de onda extrapolado no um u mais dispositivos de armazenagem de dados.

20. Sistema de acordo com a reivindicação 19, adicionalmente compreende:

5 calcular um fator de escala de um valor de impedância acústica, do campo de onda de pressão medida e dos dois campos de ondas de velocidade horizontal; e

 calcular um do campo de onda ascendente e do campo de onda descendente do campo de onda de pressão medida, do campo de onda de
10 velocidade vertical e do fator de escala.

21. Sistema de acordo com a reivindicação 19, adicionalmente compreende:

 calcular um fator de escala de um valor de impedância acústica, do campo de onda de velocidade do vetor medida e dos dois campos de on-
15 das de velocidade horizontal; e

 calcular um do campo de onda ascendente e do campo de onda descendente do campo de onda de pressão medida, do campo de onda de
 velocidade vertical e do fator de escala.

22. Sistema de acordo com a reivindicação 19, adicionalmente
20 compreende transformar o campo de onda de pressão medida, o campo de onda de velocidade vertical e o onda de velocidade horizontal em um domínio de frequência do número de onda.

23. Sistema de acordo com a reivindicação 19, em que o campo de onda de pressão medida, o campo de onda de velocidade vertical e o
25 onda de velocidade horizontal estão em um domínio de espaço de tempo.

24. Sistema de acordo com a reivindicação 19, em que extrapolar adicionalmente compreende extrapolar para a superfície livre do fluido.

25. Sistema de acordo com a reivindicação 19, em que pelo menos um dos dois campos de onda de velocidade horizontal medida é espacialmente serrilhado.
30

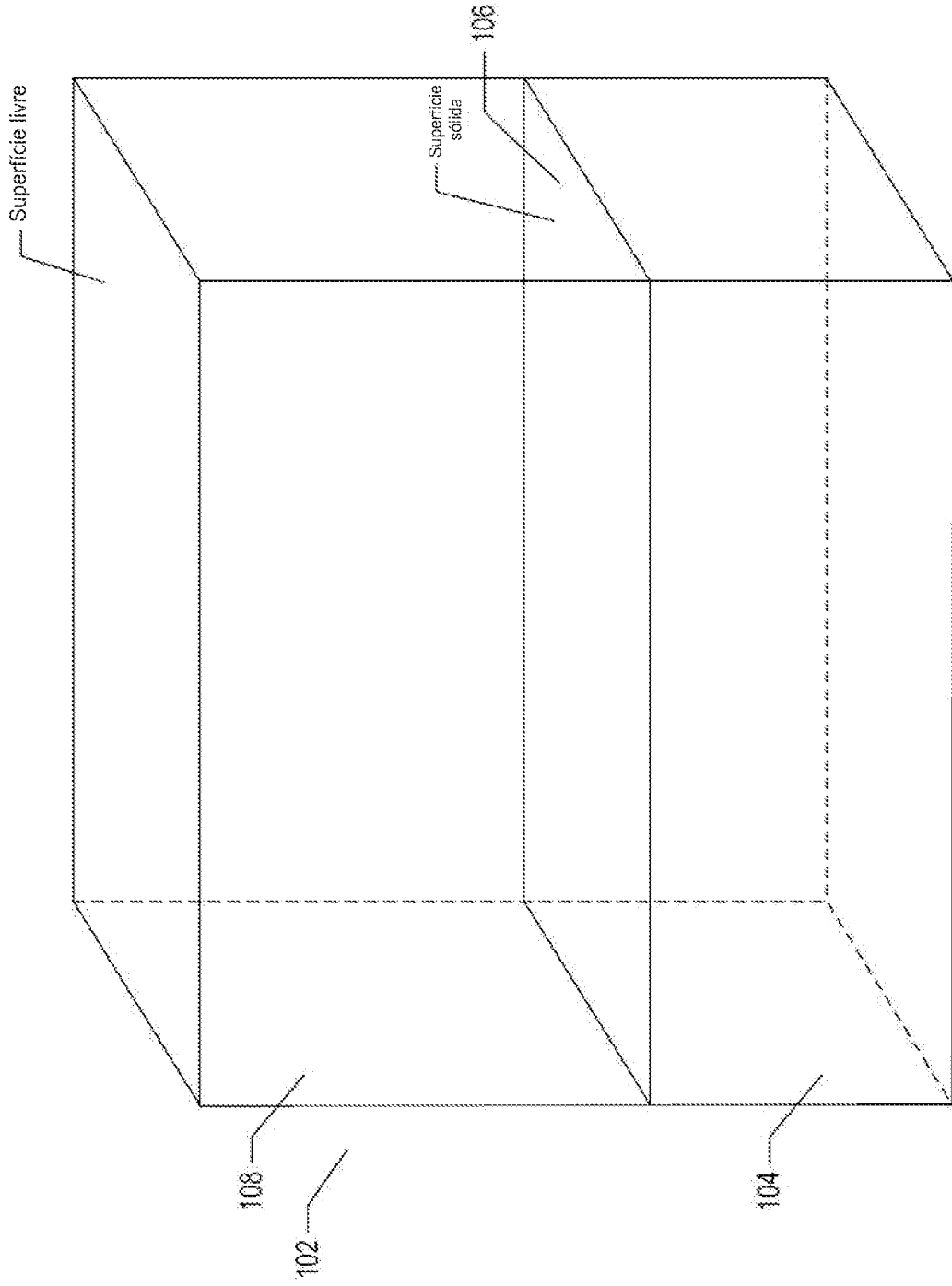


FIG. 1

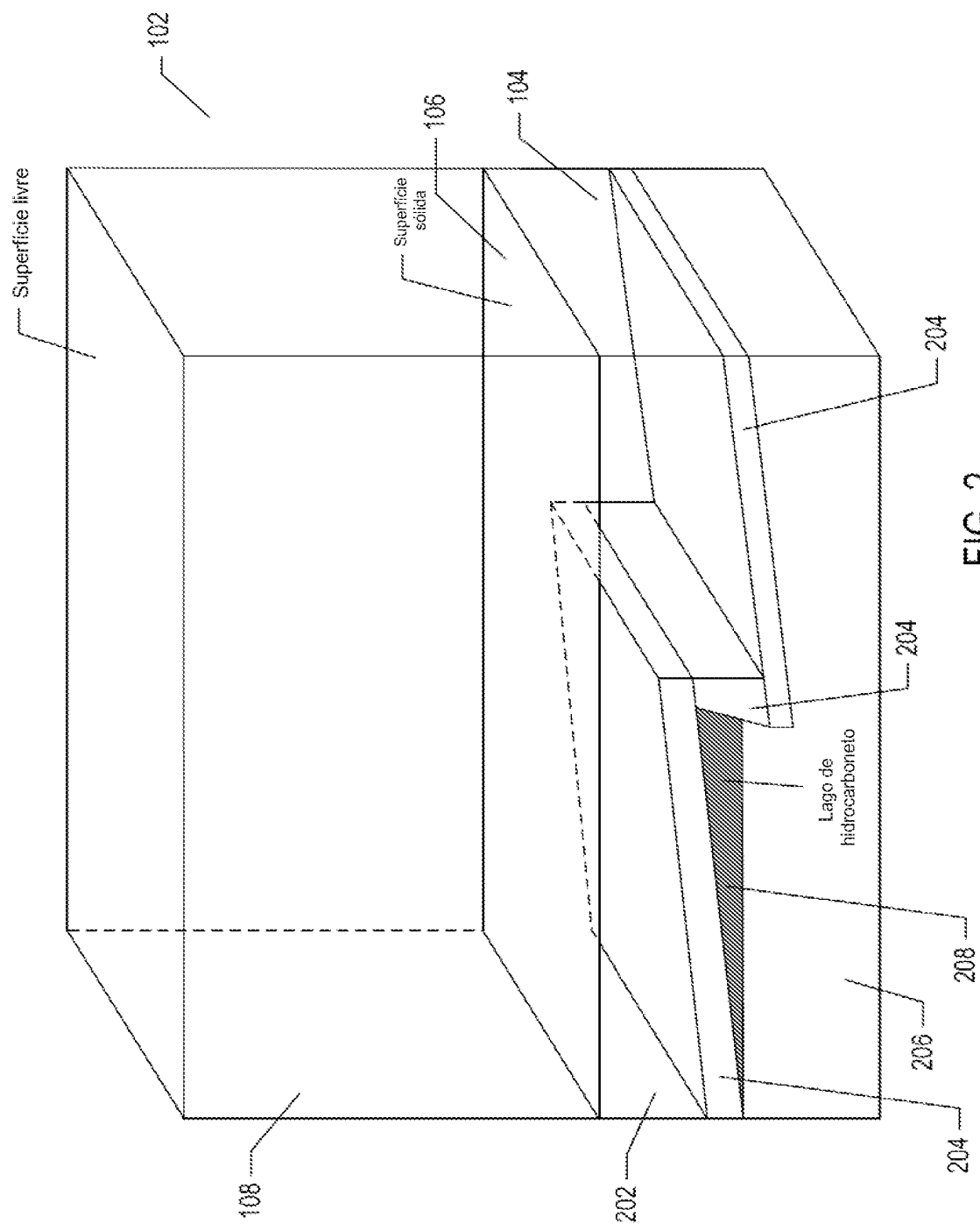


FIG. 2

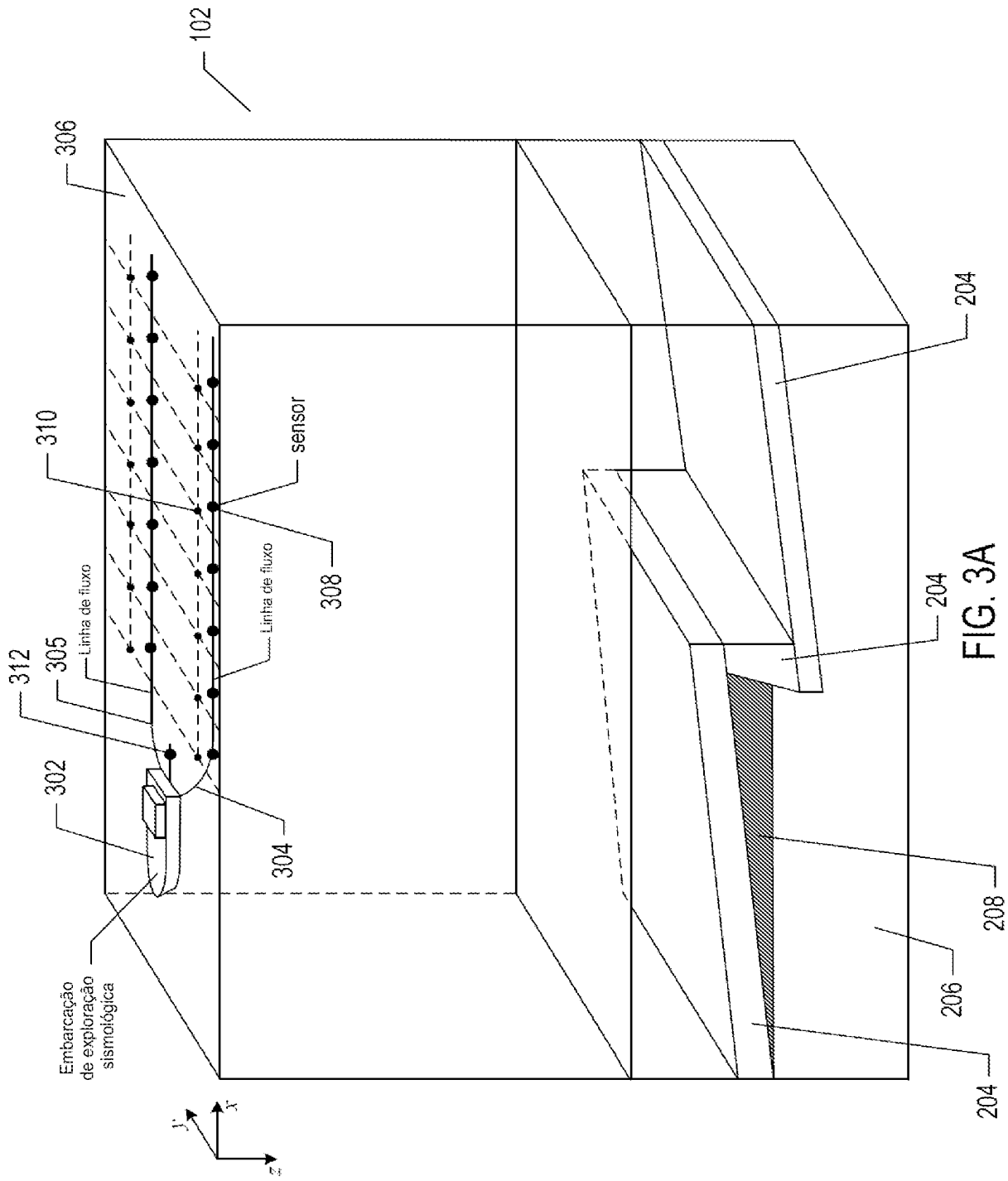


FIG. 3A

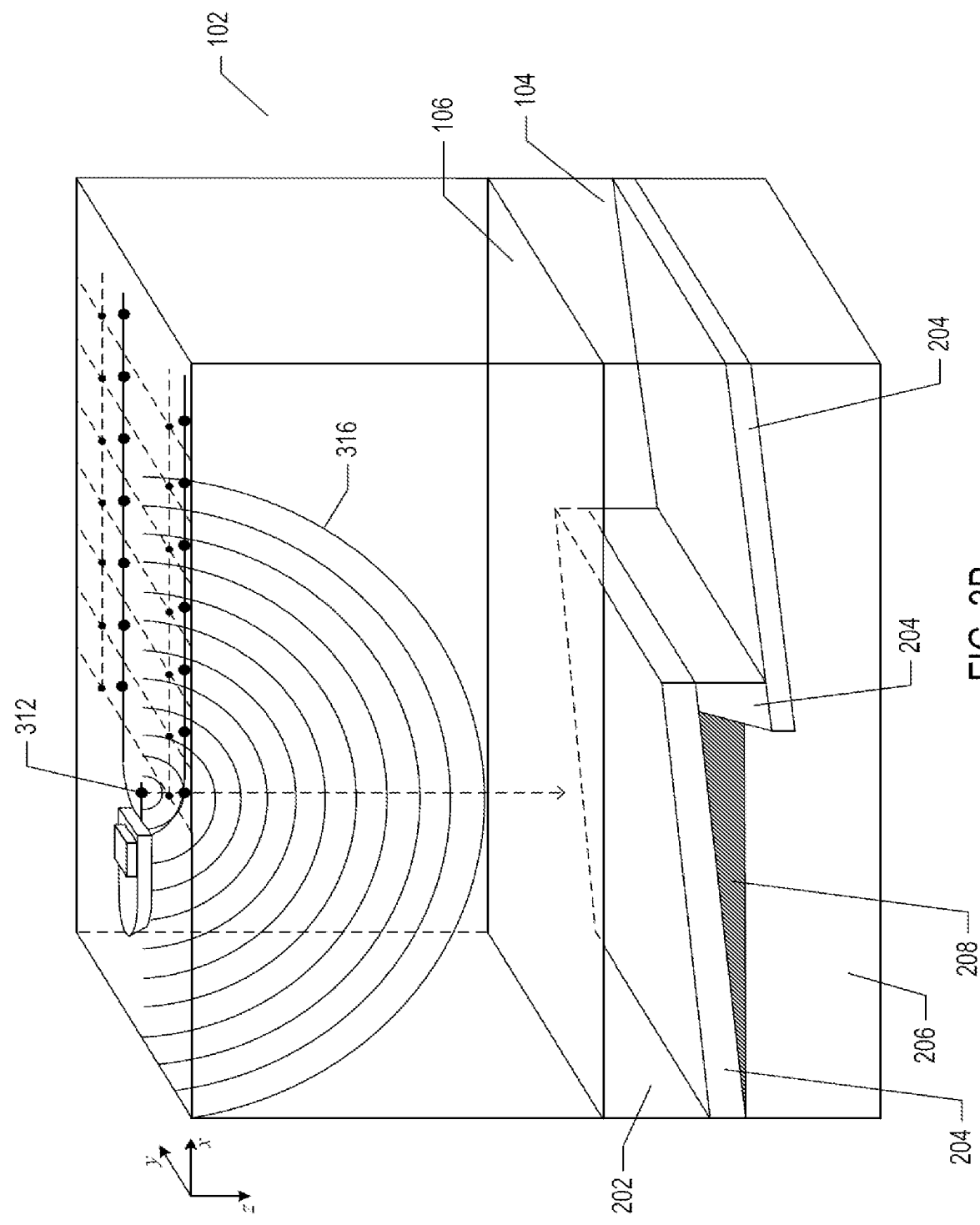


FIG. 3B

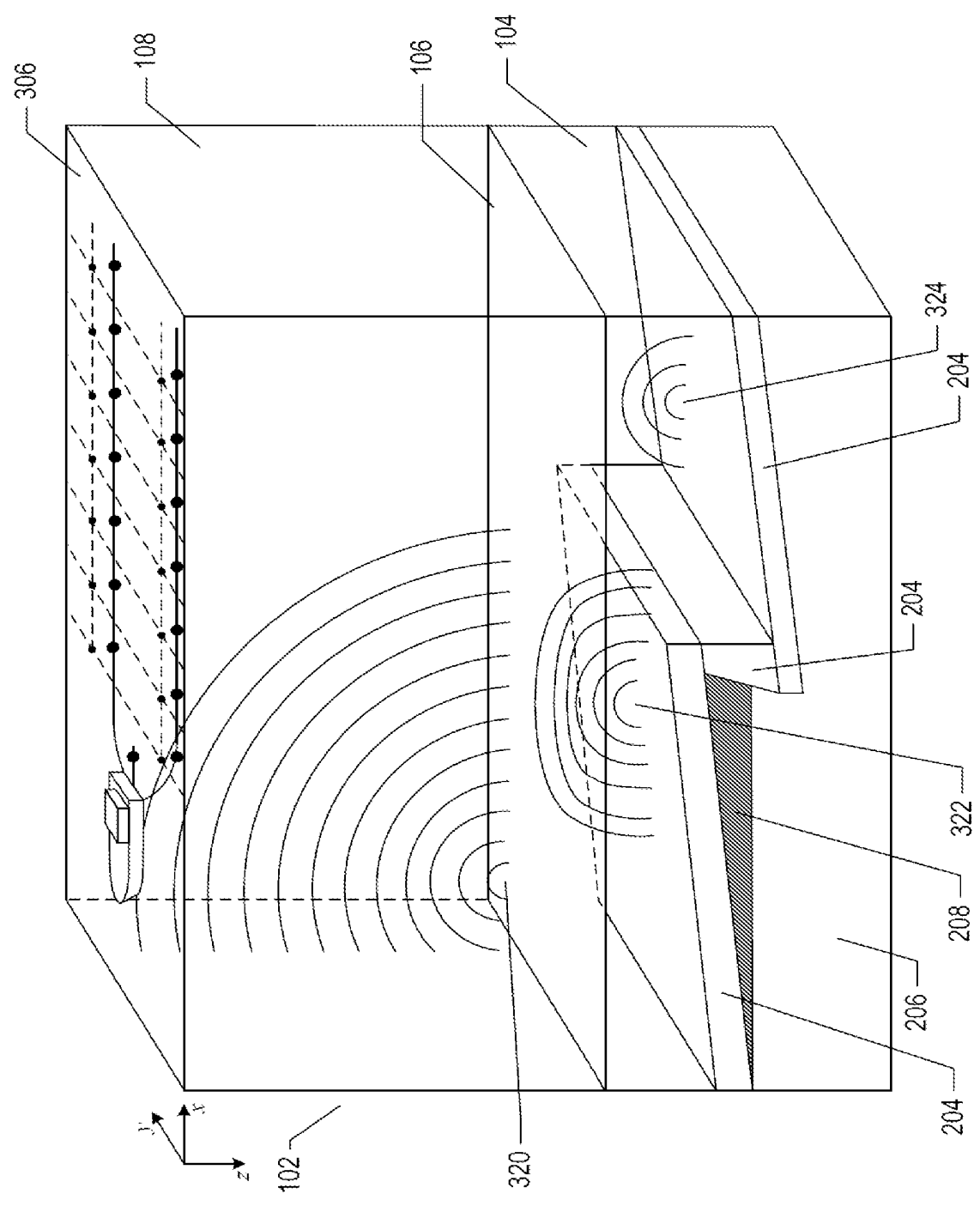


FIG. 3C

6/24

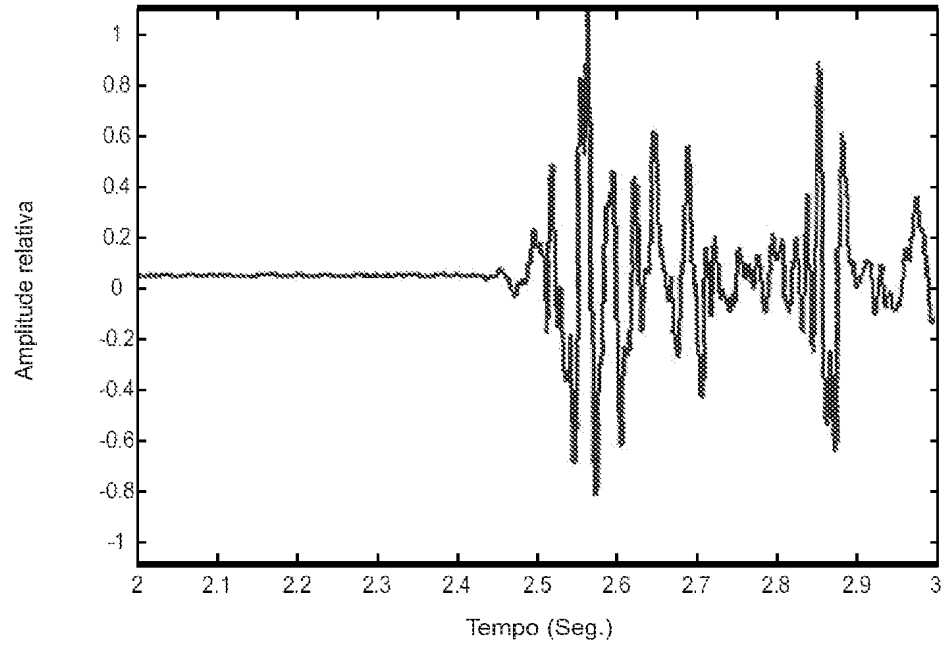


FIG. 4A

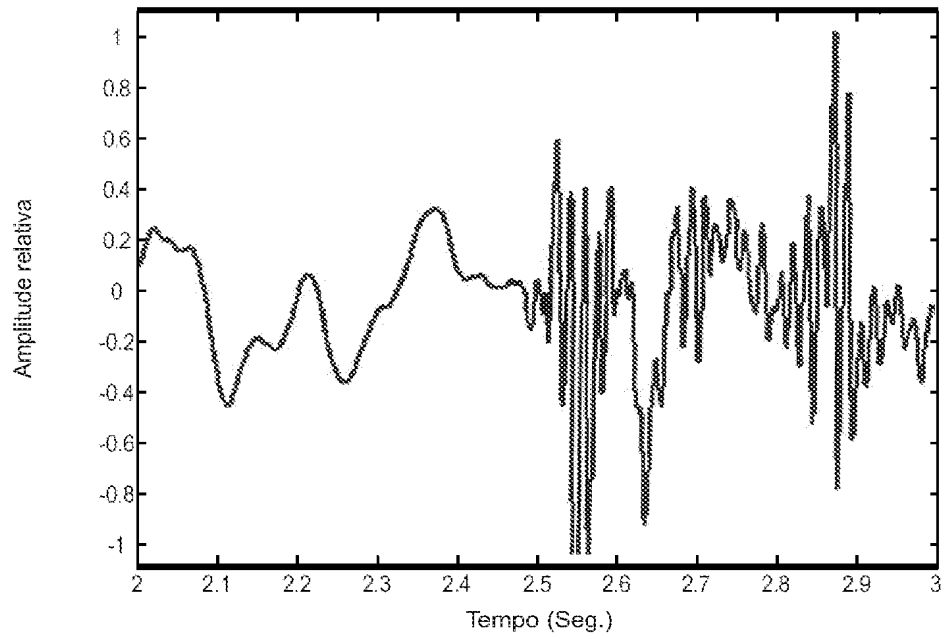


FIG. 4B

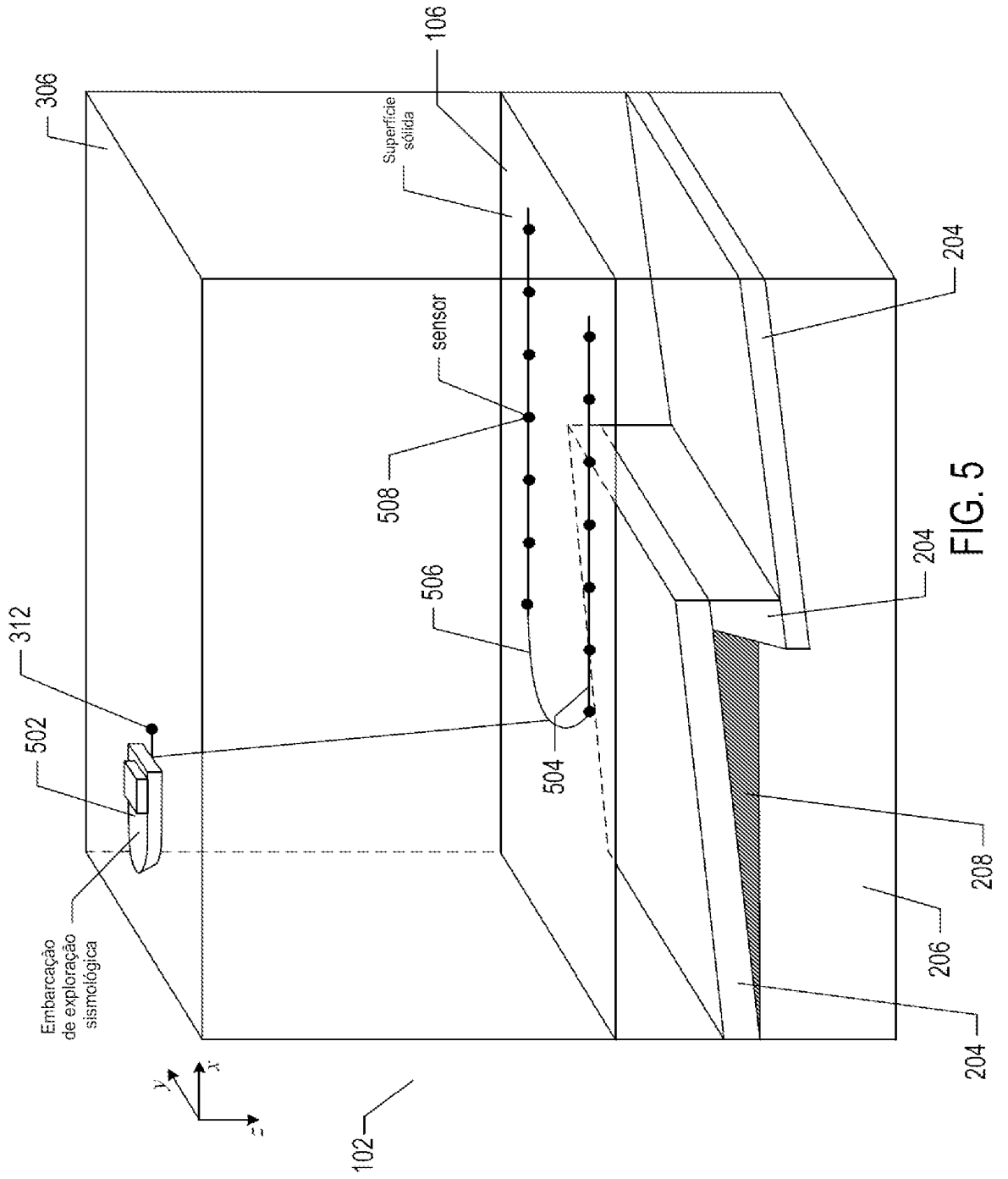


FIG. 5

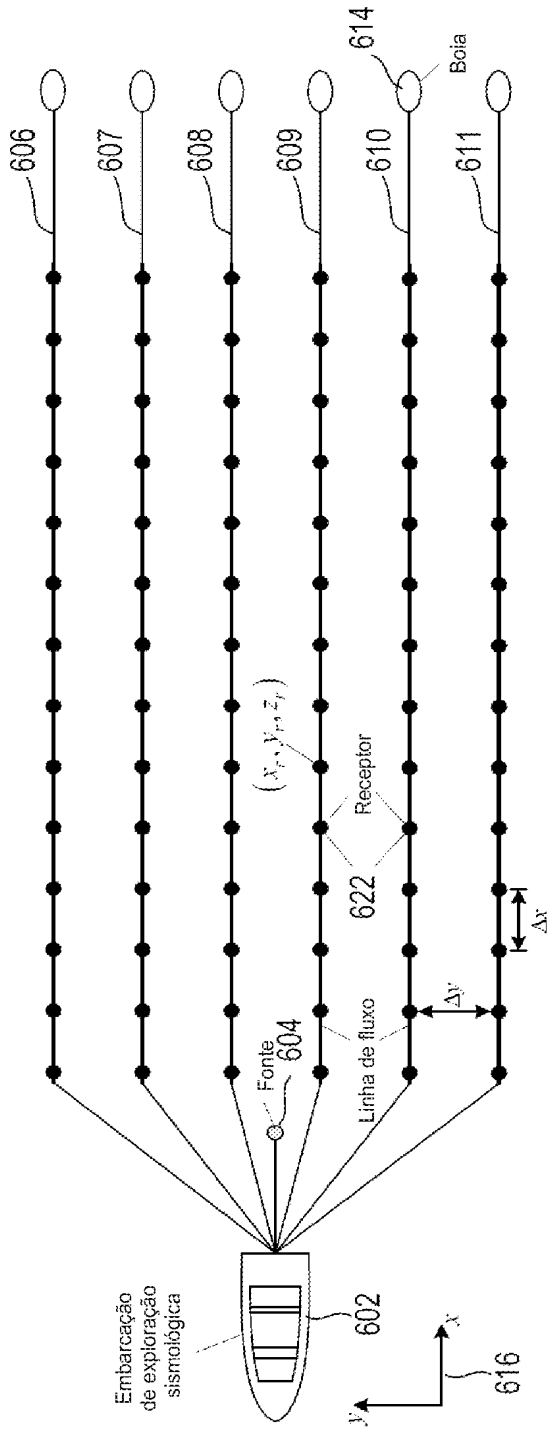


FIG. 6A

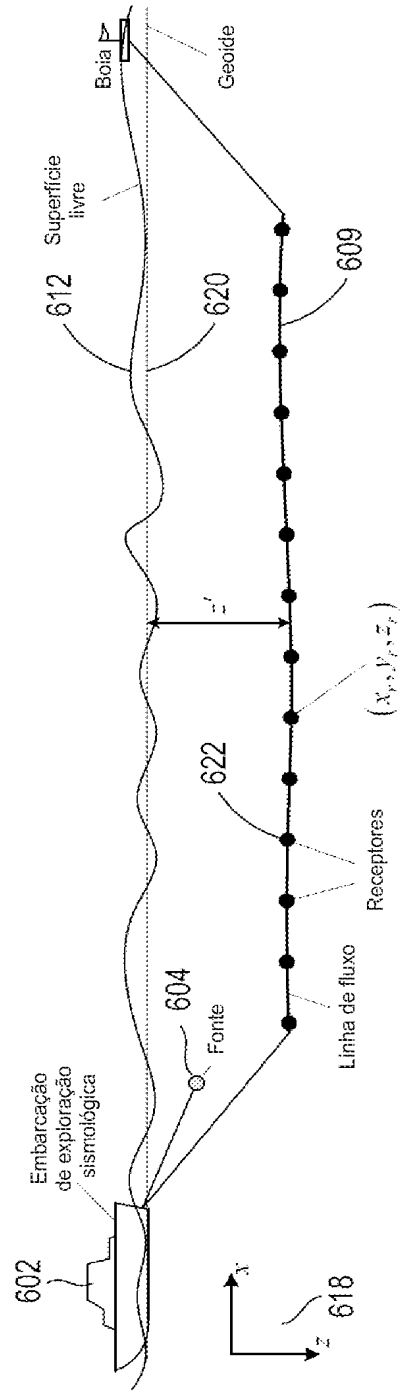


FIG. 6B

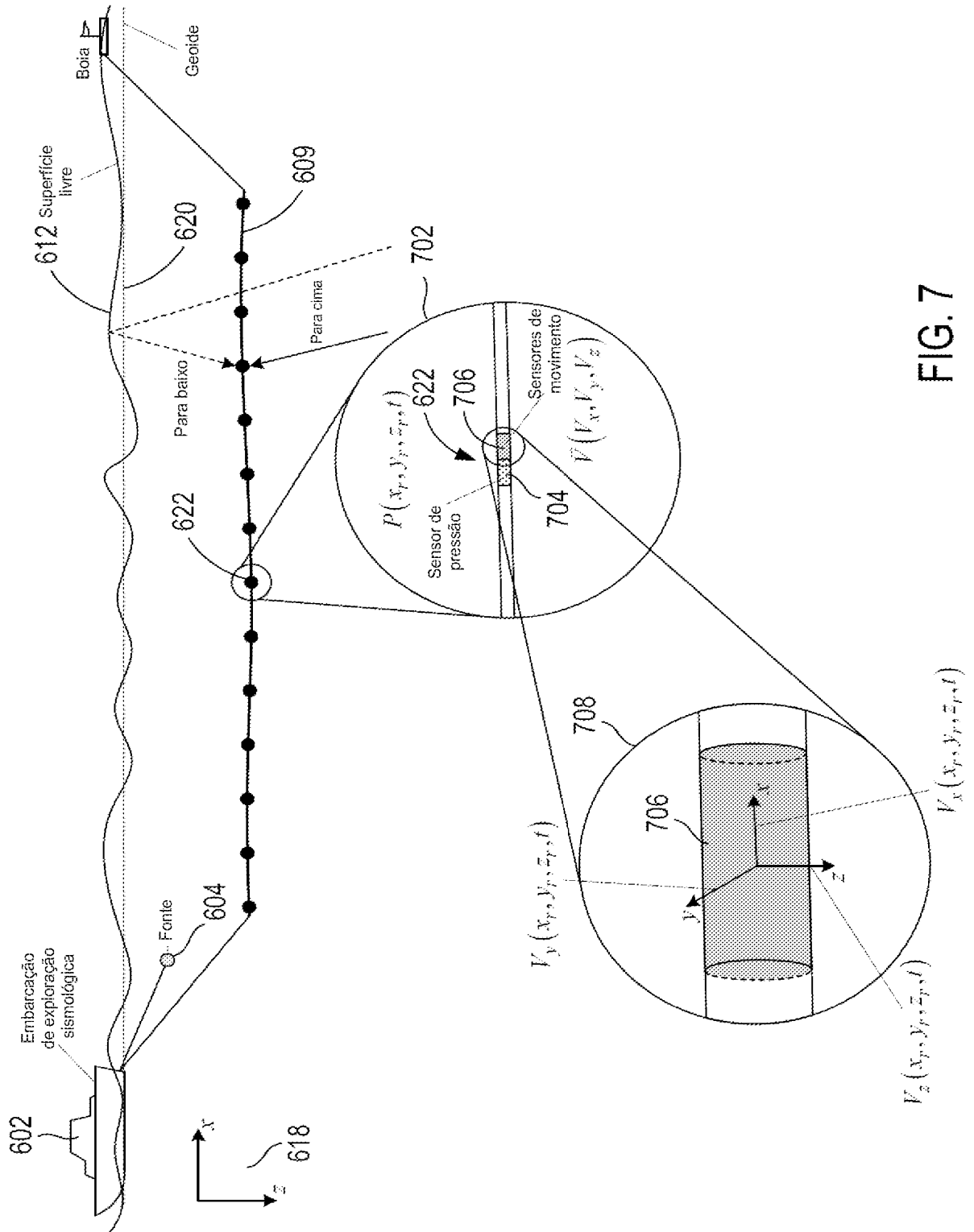


FIG. 7

Vetor de velocidade

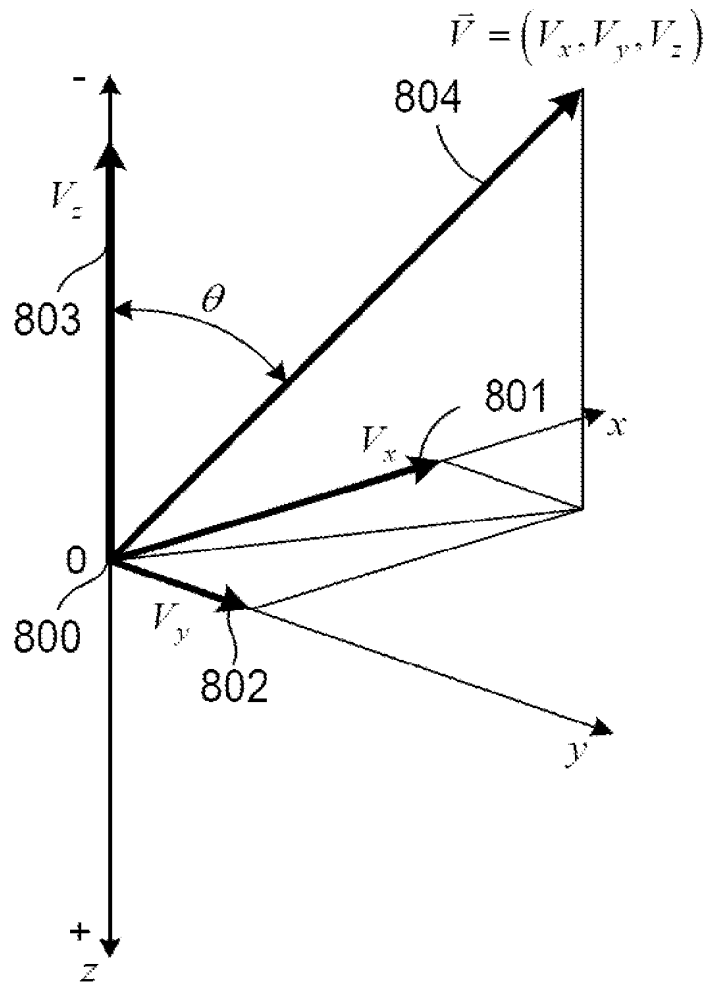


FIG. 8

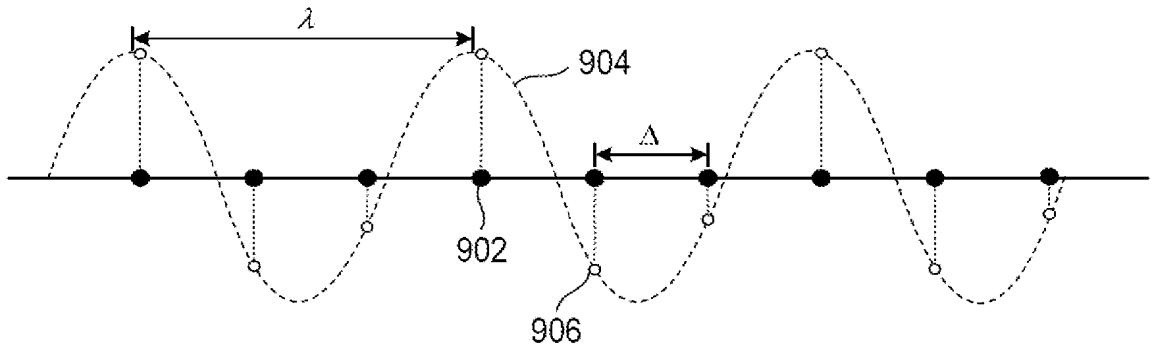


FIG. 9A

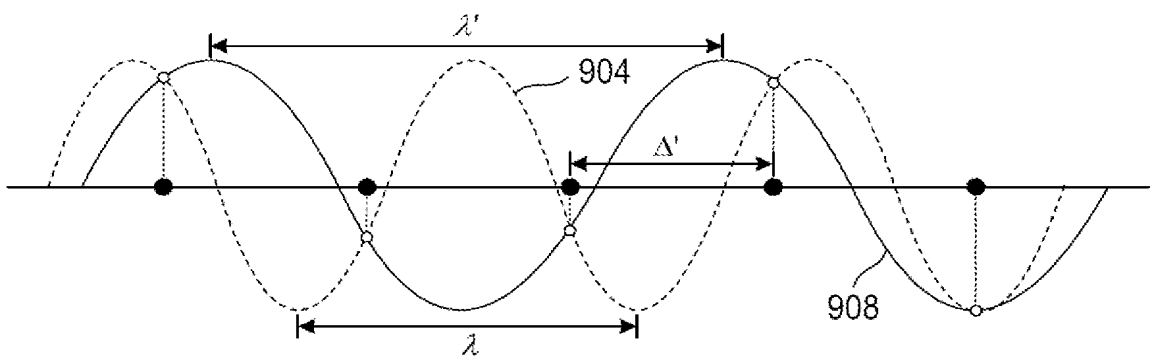


FIG. 9B

Vetor de lentidão

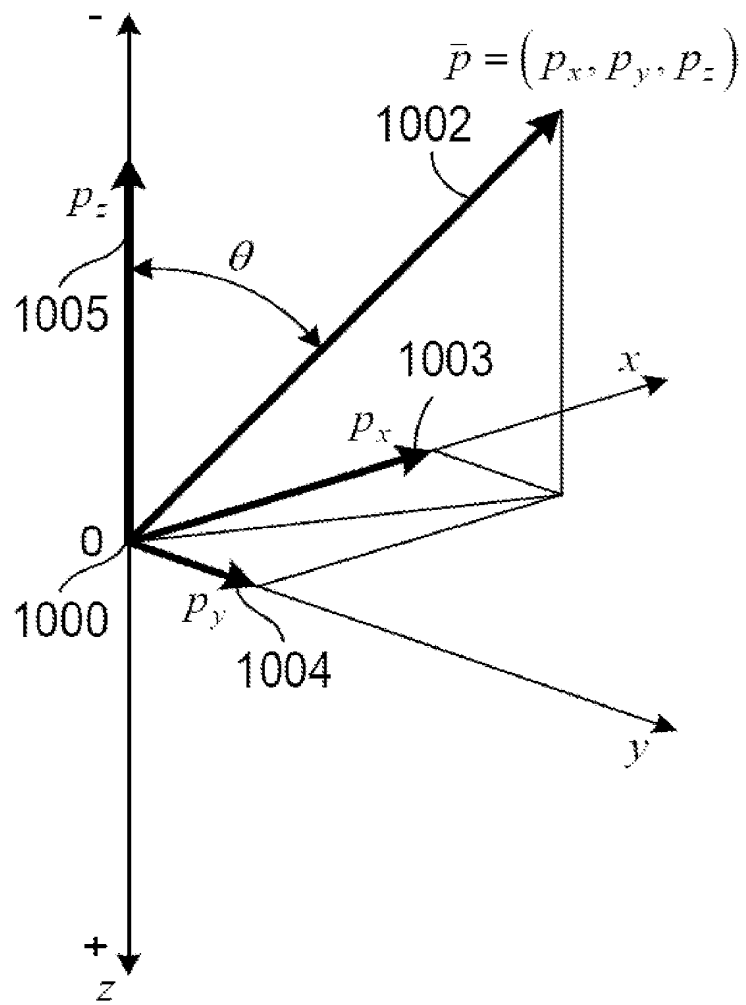


FIG. 10

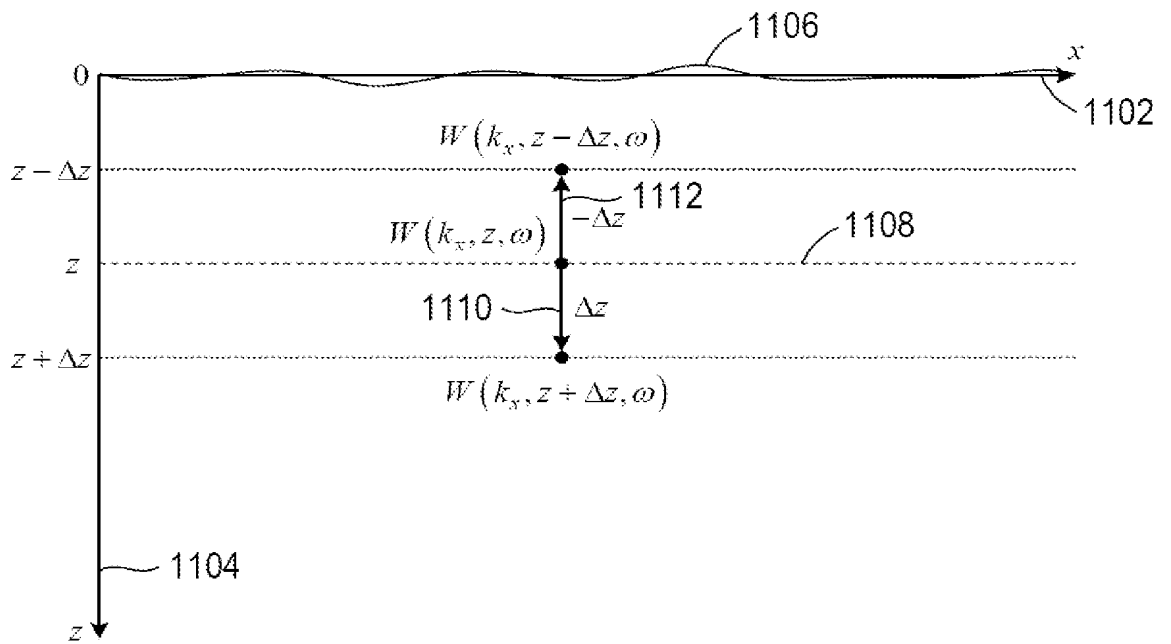


FIG. 11

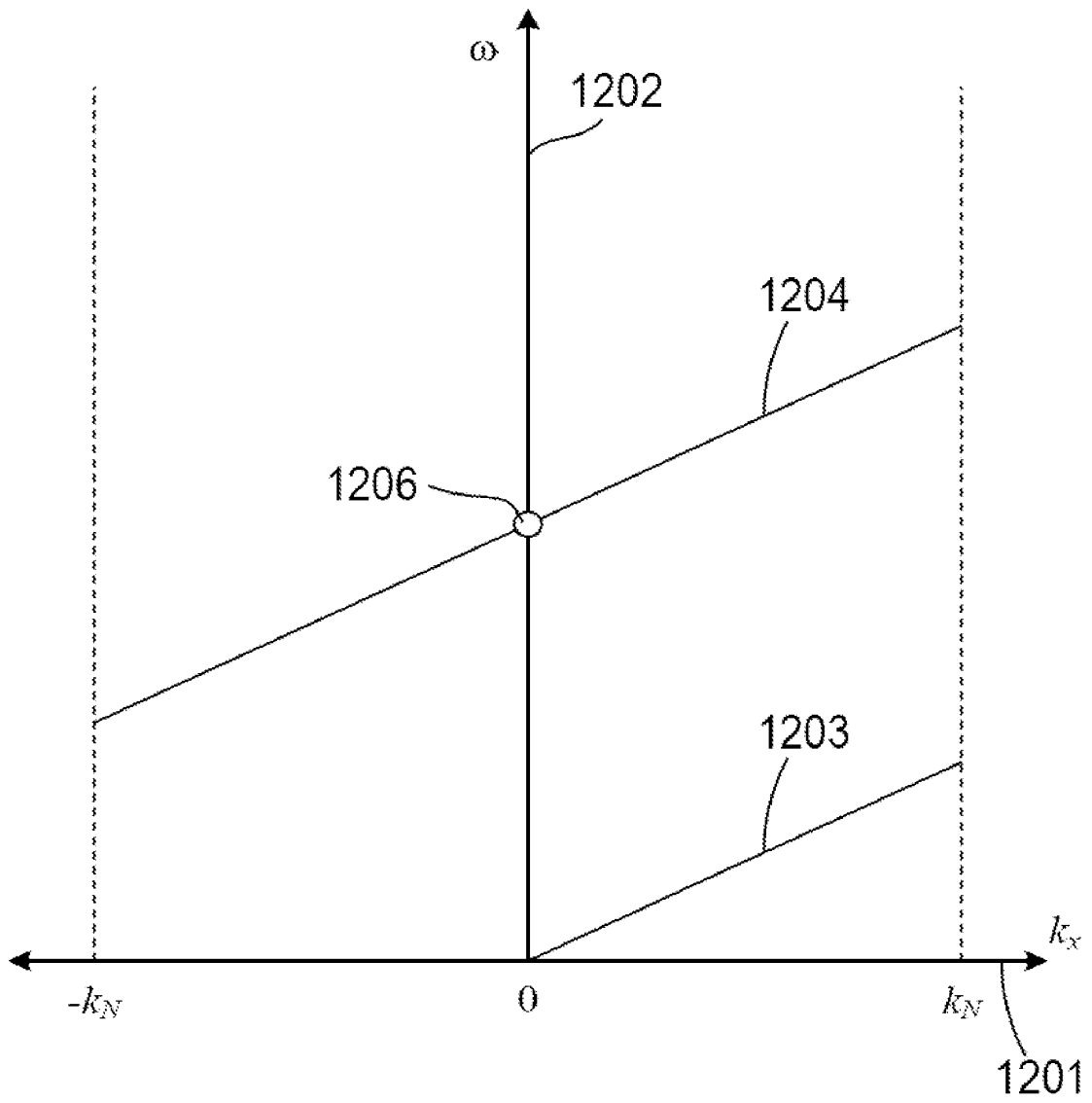


FIG. 12

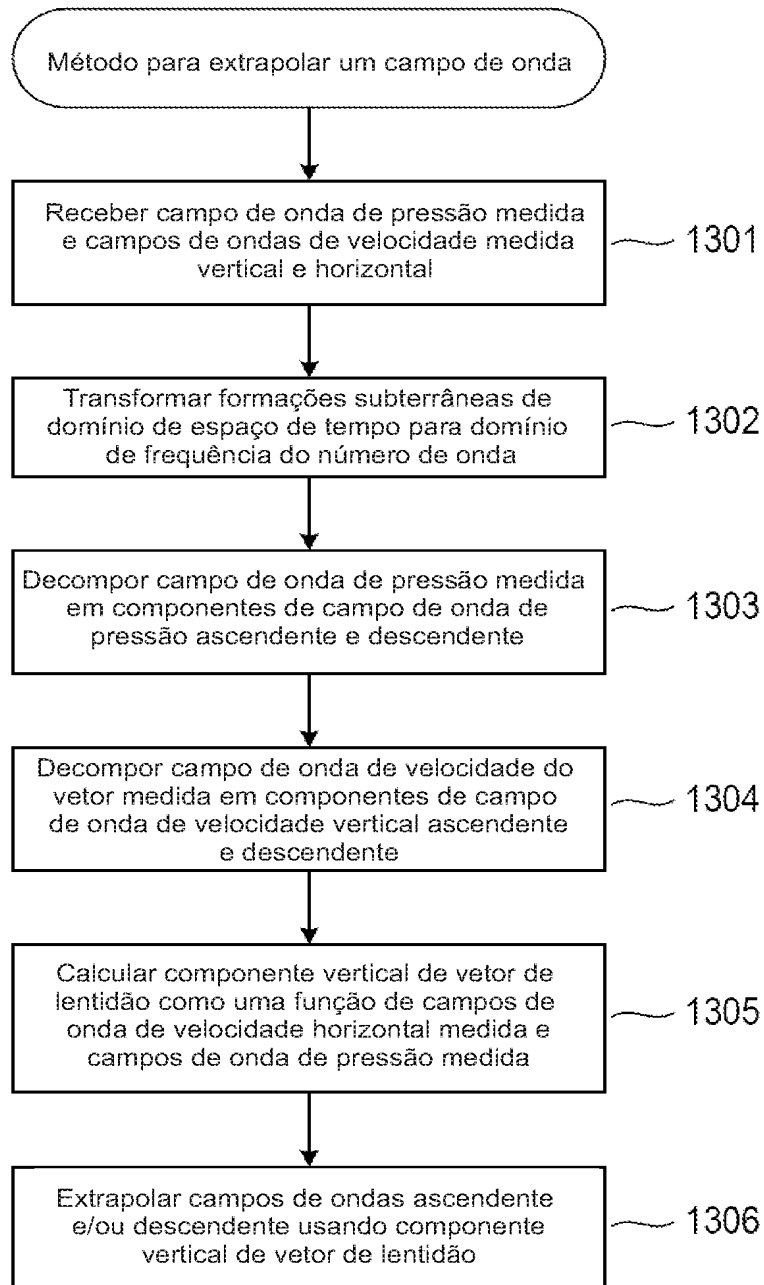


FIG. 13A

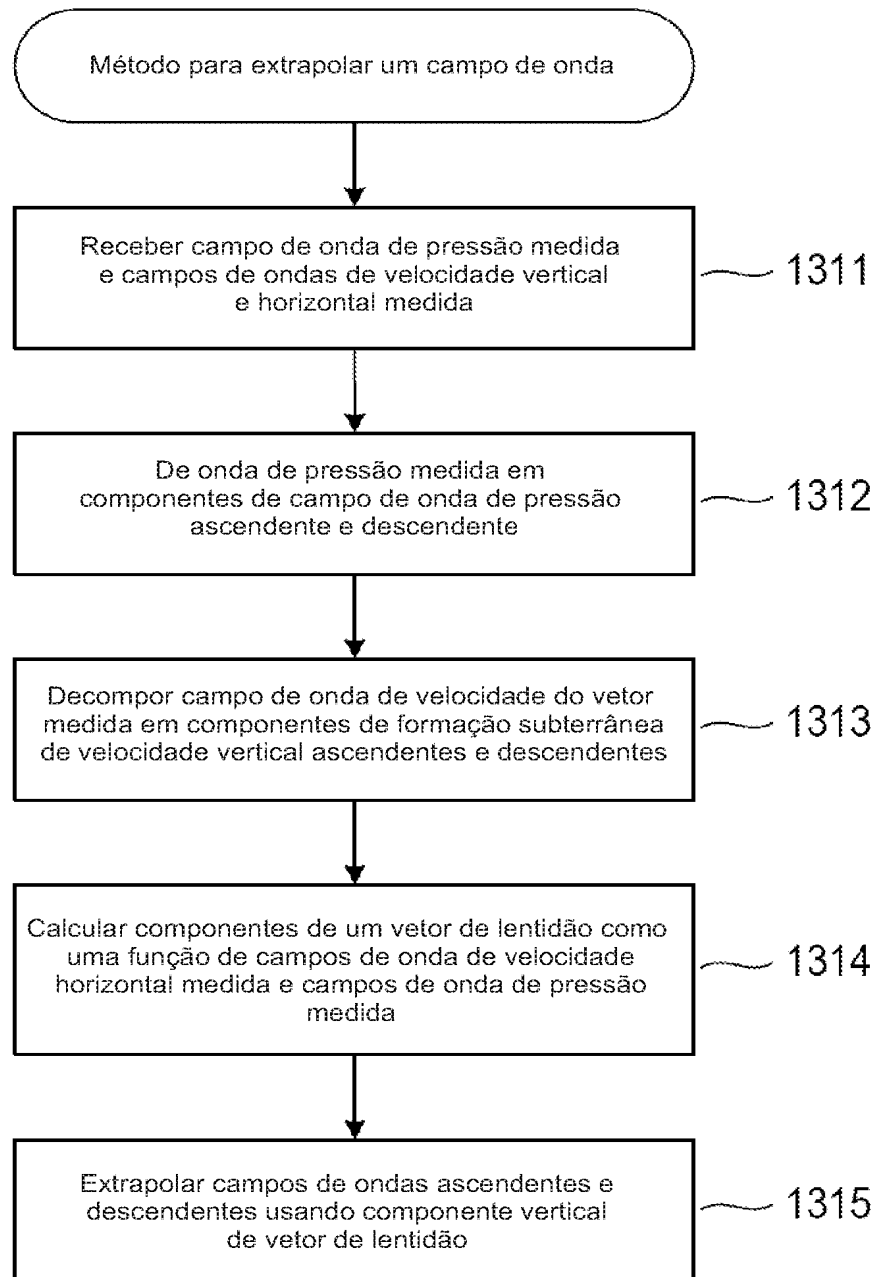


FIG. 13B

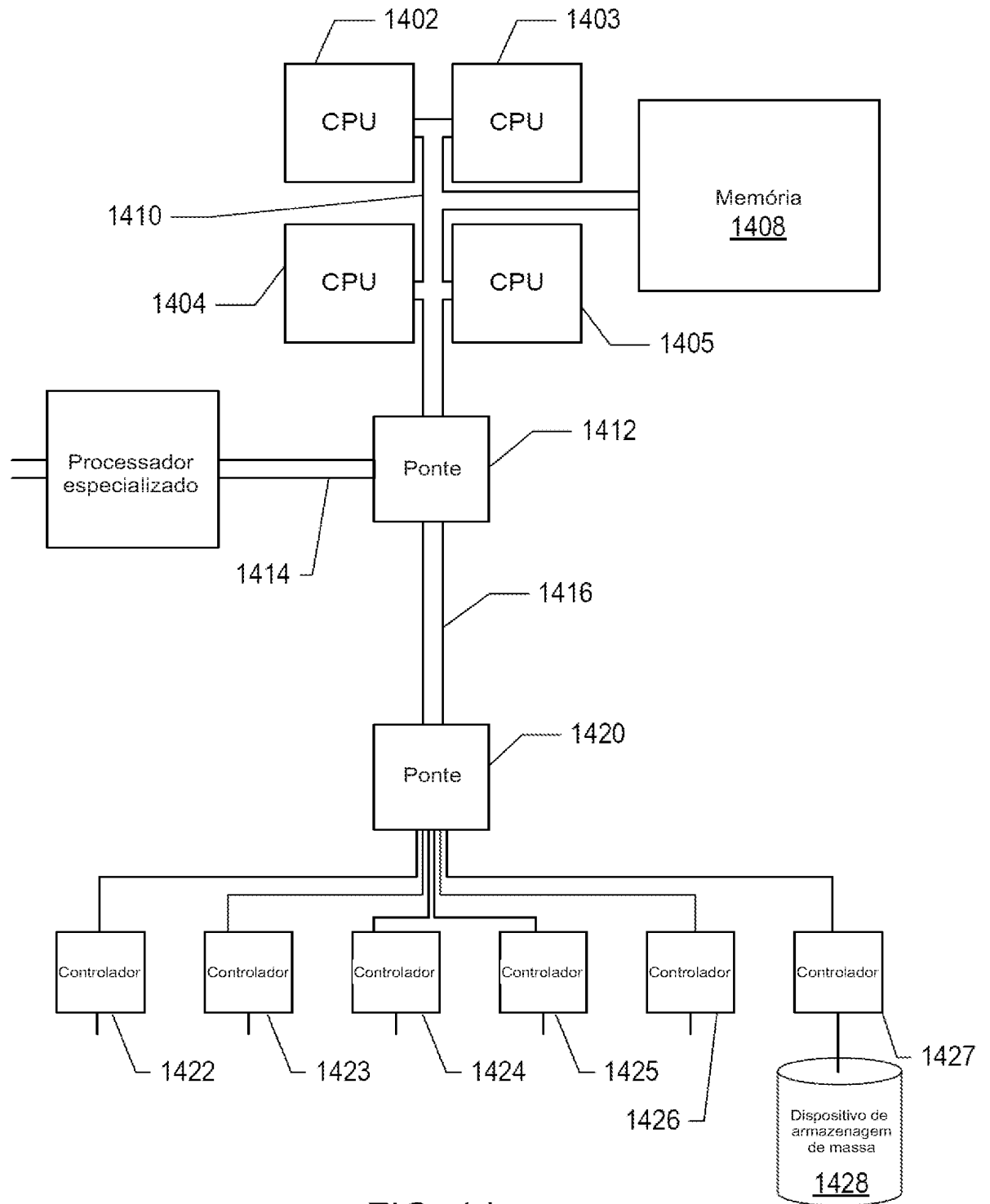


FIG. 14

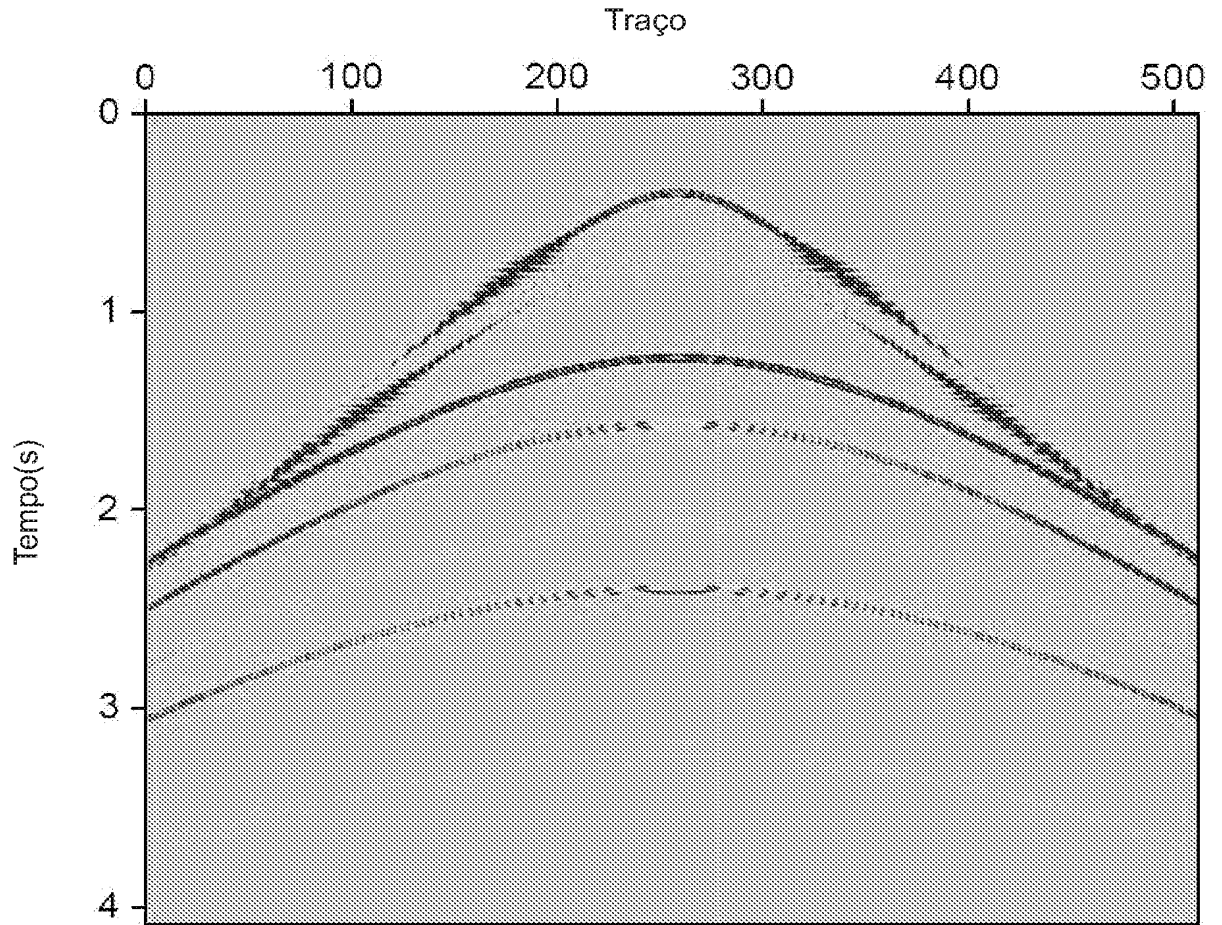


FIG. 15A

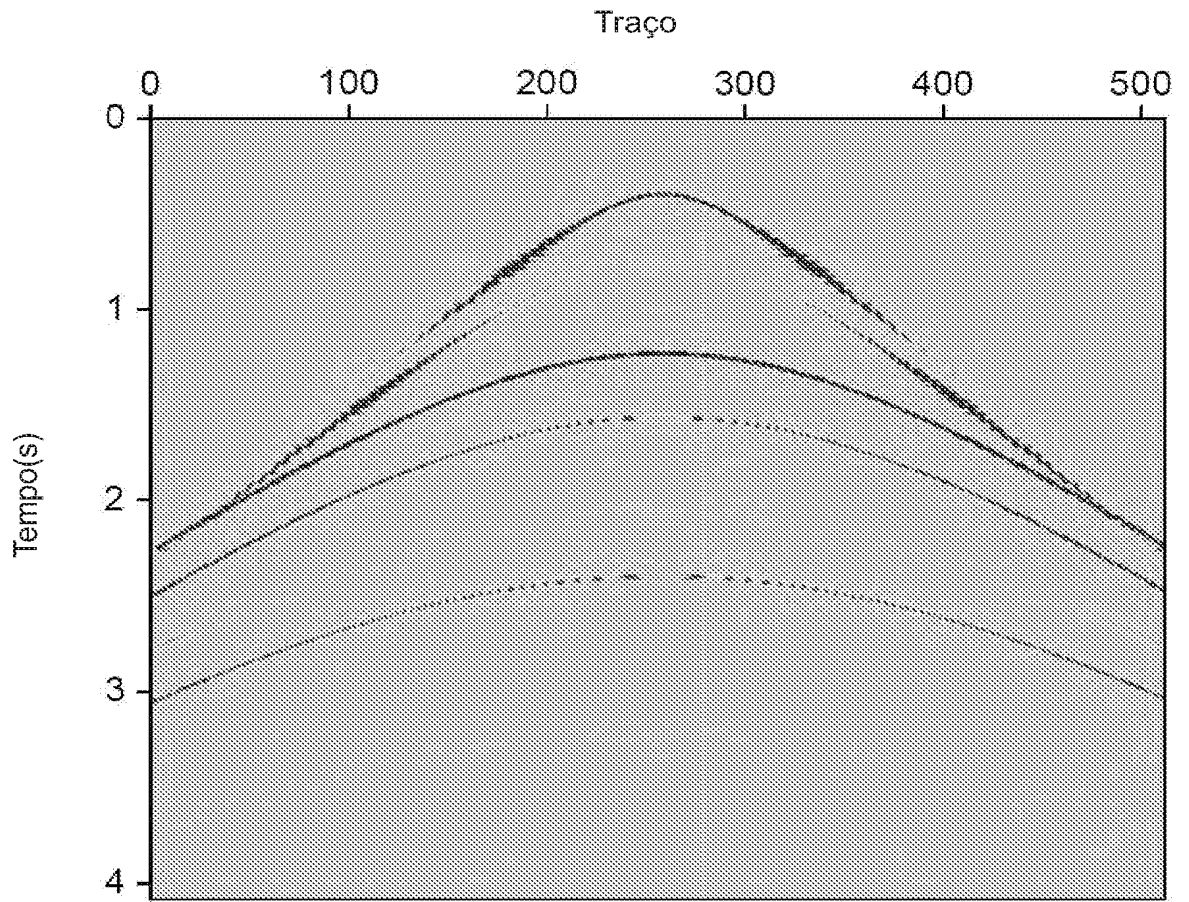


FIG. 15B

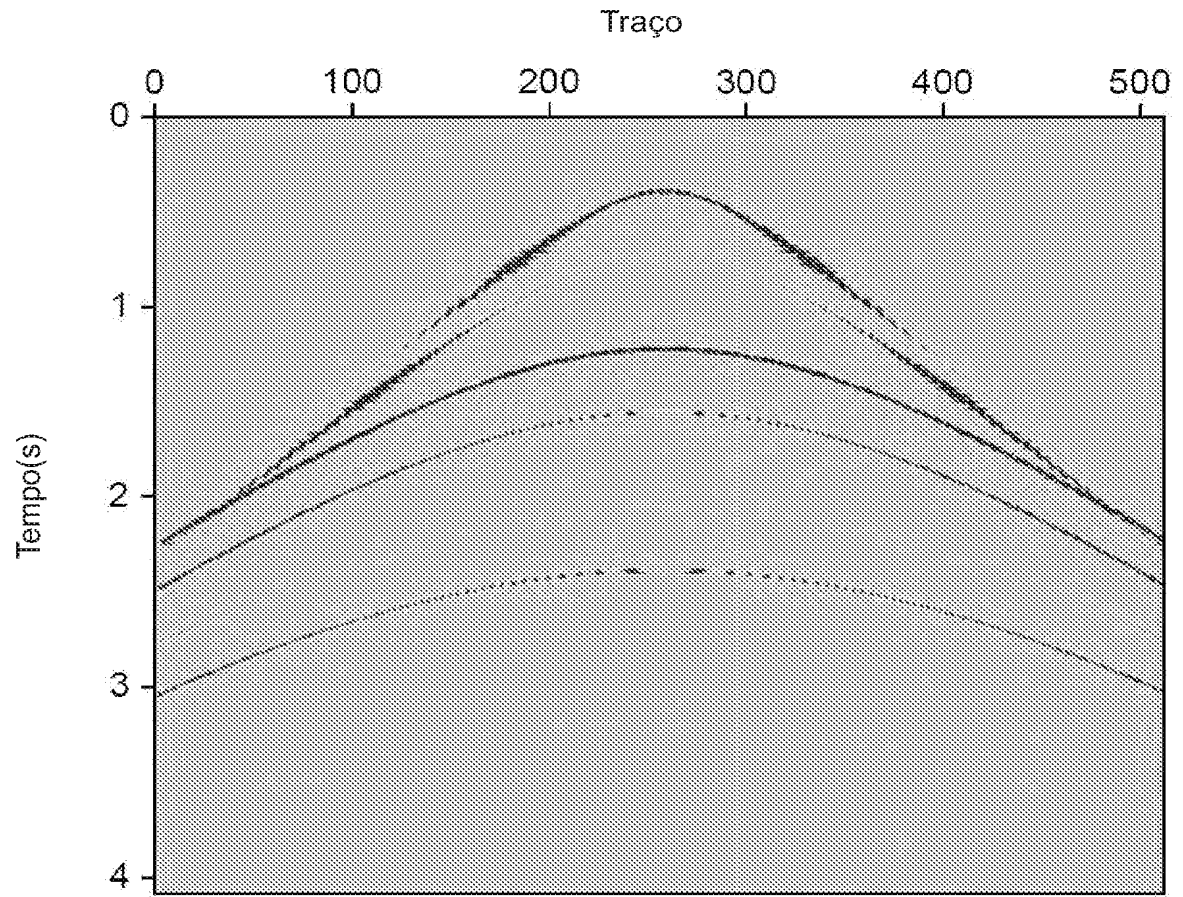


FIG. 15C

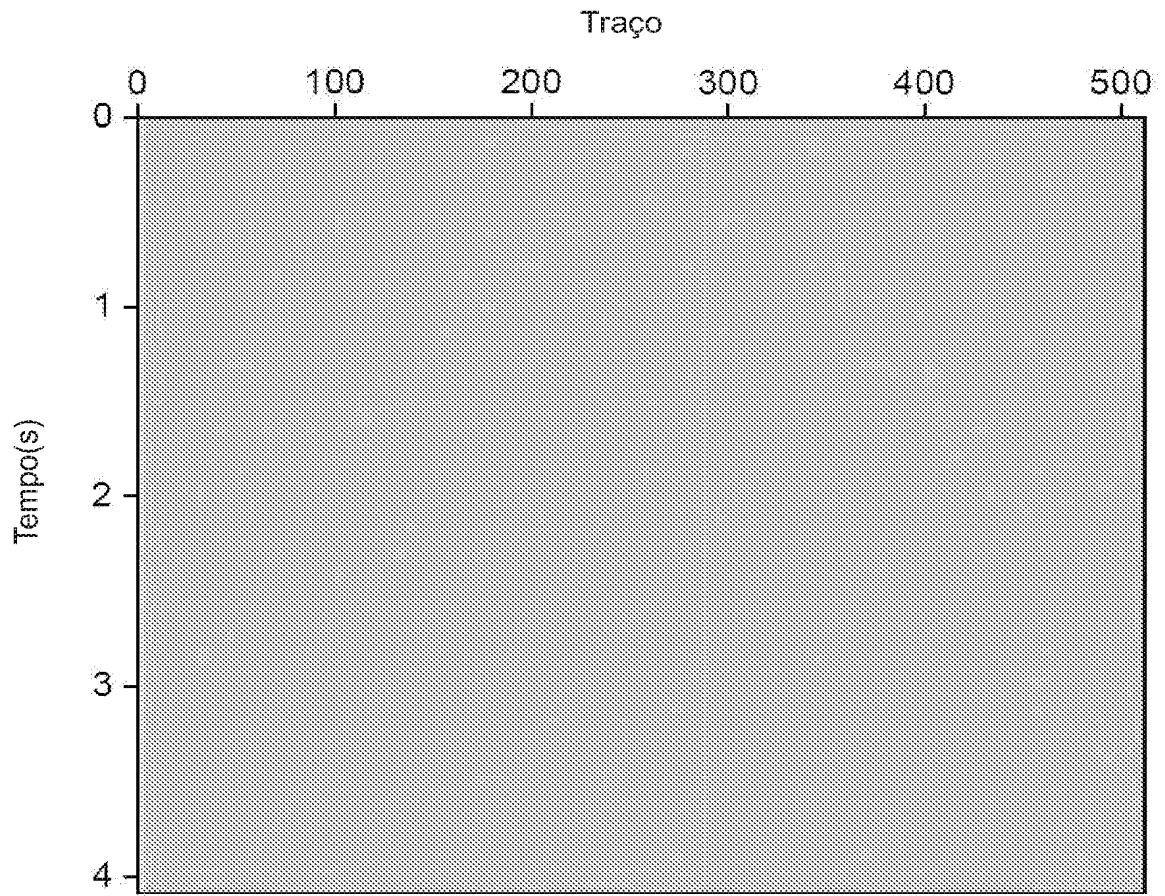


FIG. 15D

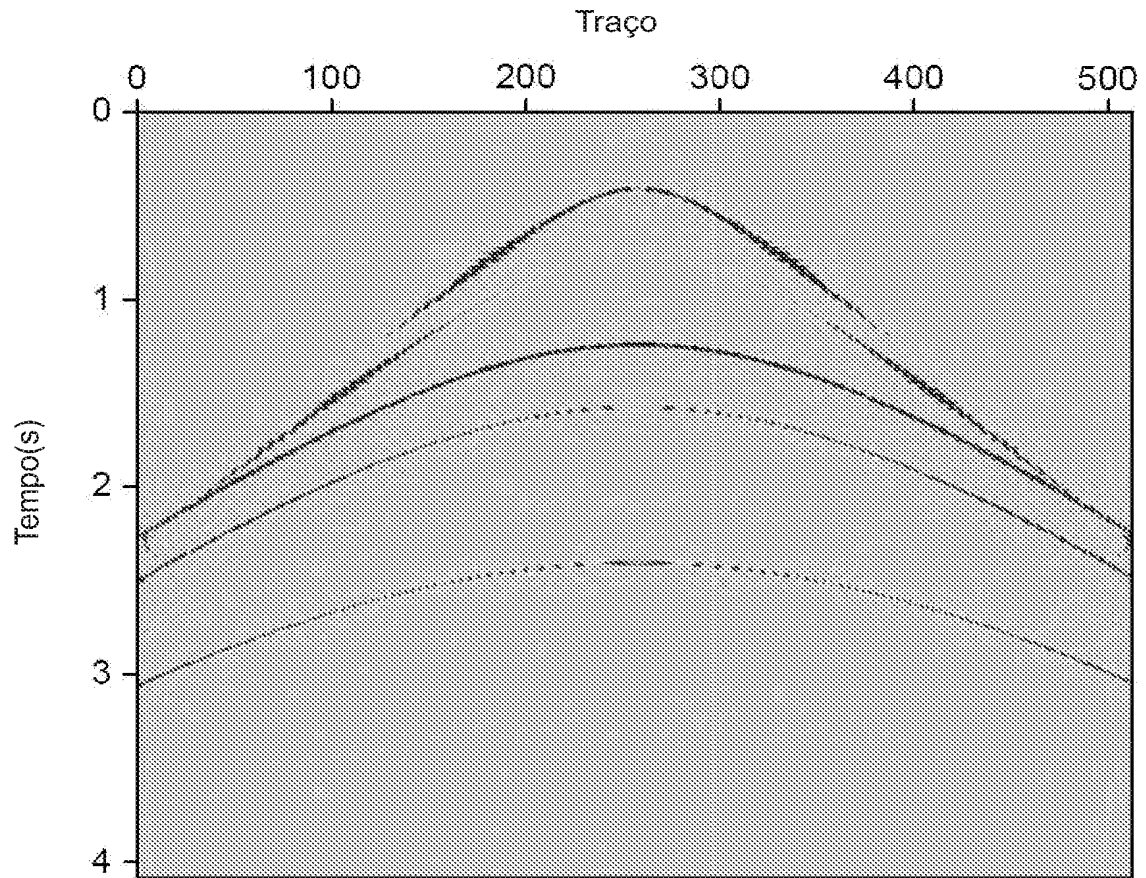


FIG. 15E

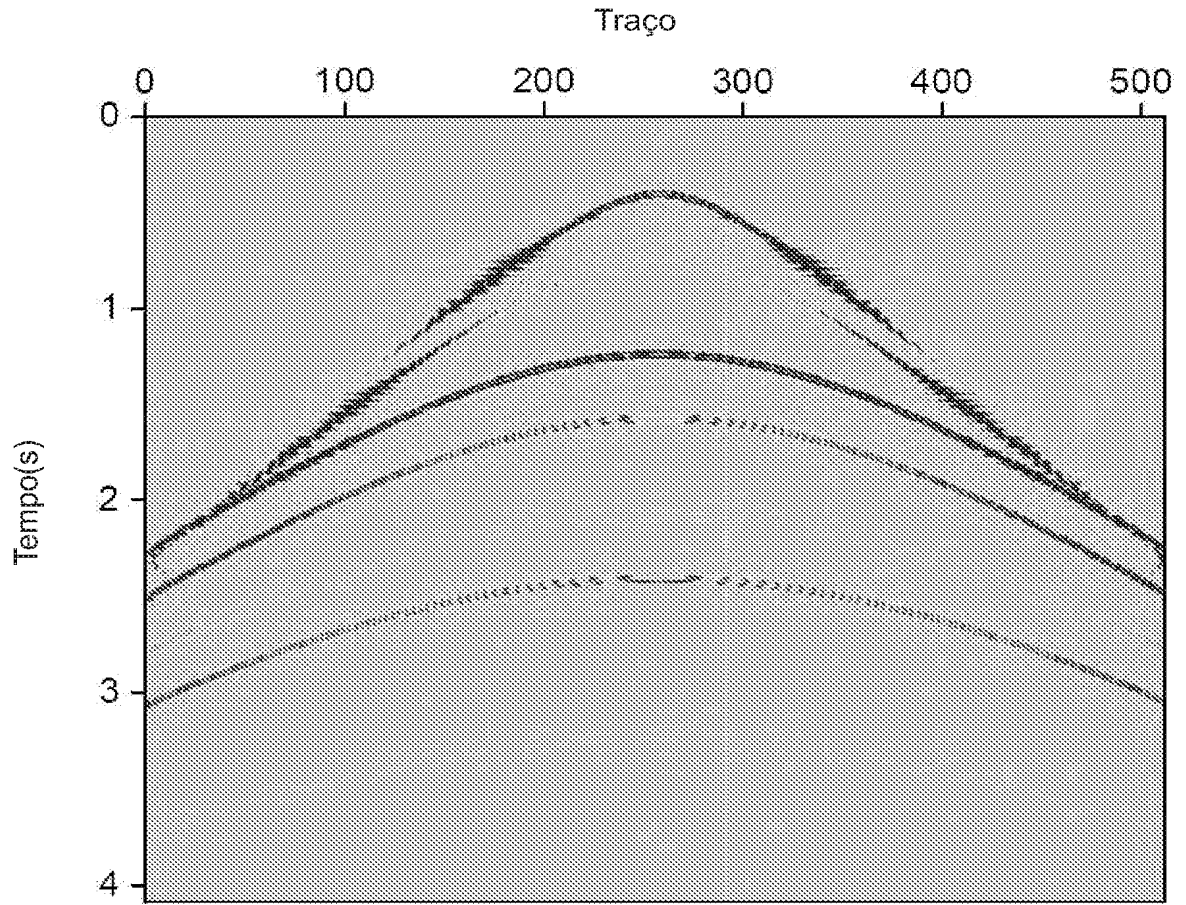


FIG. 15F

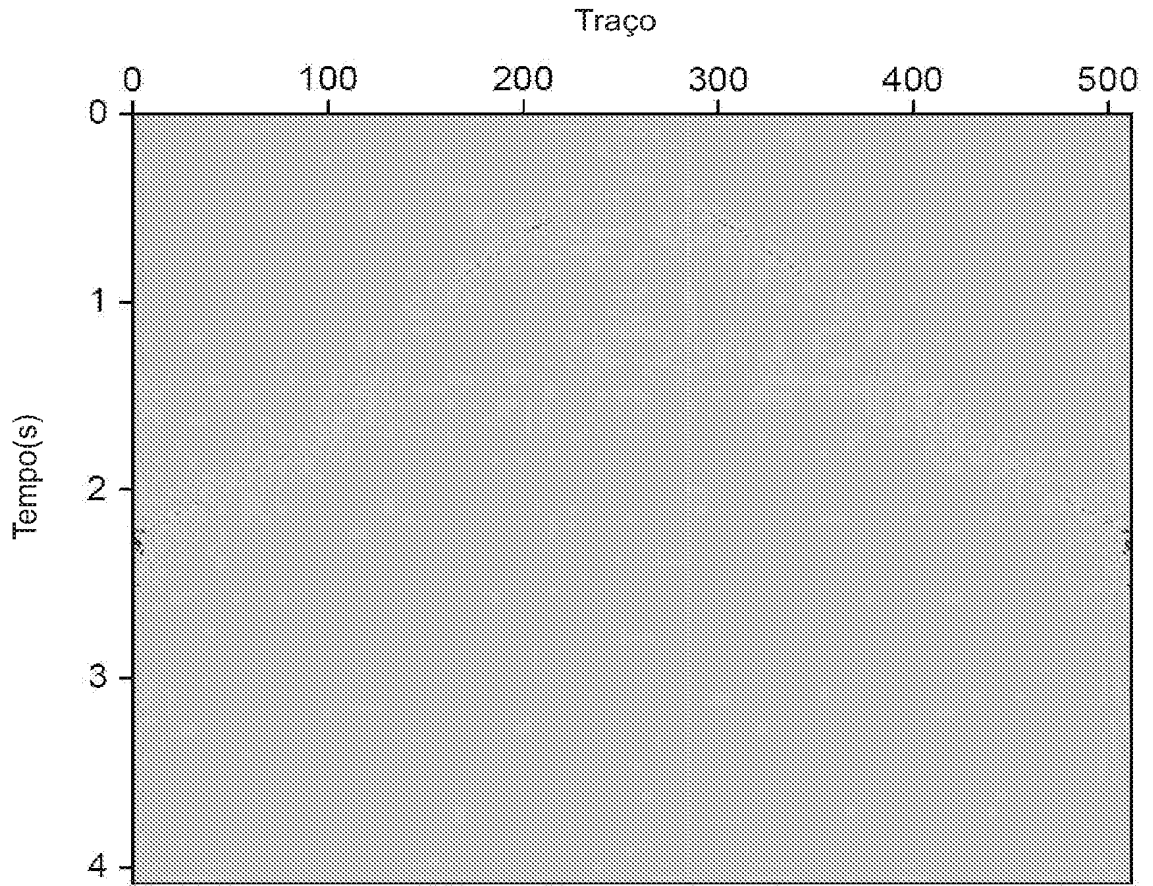


FIG. 15G

RESUMO

Patente de Invenção: **"MÉTODOS E SISTEMAS PARA EXTRAPOLAR CAMPOS DE ONDA"**.

5 A presente invenção refere-se a métodos e sistemas descritos, para extrapolar campos de ondas enquanto impedem interrupções devido ao serrilhamento espacial. Os campos de ondas de pressão medidos com sensores de pressão e campos de ondas de velocidade vertical e horizontal medidos com três movimentos axiais podem ser espacialmente serrilhados em pelo menos uma direção horizontal. O campo de onda de pressão e/ou o
10 campo de onda de velocidade vertical são decompostos em um de um campo de onda ascendente e de um campo de onda descendente. o campo de onda ascendente ou descendente é extrapolado usando um extrapolador que depende de componentes de um vetor de lentidão. De modo a impedir interrupções no campo de onda extrapolado devido ao serrilhamento espacial,
15 al, os componentes do vetor de lentidão são calculados de um campo de onda de pressão medida e dos dois campos de ondas de velocidade horizontal.